

Mining Science and Technology

Горные науки
и технологии

Vol. 8 №4
2023





Деятельность научно-практического журнала «Горные науки и технологии» (Mining Science and Technology (Russia)) направлена на развитие международного научного и профессионального сотрудничества в области горного дела.

Целевая аудитория журнала – исследователи, специалисты в области горного дела, представители академического и профессионального сообществ.

В журнале публикуются оригинальные статьи, описывающие результаты исследований, опыт реализации проектов в горнопромышленном комплексе, обзорные публикации.

Журнал стремится развивать такие междисциплинарные направления, как технологическая и экологическая безопасность, организация и управление проектами в горной промышленности, развитие территорий, правовые аспекты использования природных ресурсов и другие, которые способствуют прогрессу в горном деле и реализуются исследователями и практиками.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Петров Вадим Леонидович, проф., д.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Казанин Олег Иванович, проф., д.т.н., Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Эпштейн Светлана Абрамовна, д.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агиутантис Зак, проф., д-р наук, Университет Кентукки, г. Лексингтон, Кентукки, США

Богдасаров Максим Альбертович, проф., д.г.-м.н., Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина, г. Брест, Беларусь

Боярко Григорий Юрьевич – проф., д.э.н., к.г.-м.н., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

Буи Суан Нам, проф., д-р наук, Ханойский университет горного дела и технологии, г. Ханой, Вьетнам

Валиев Нияз Гадым оглы, проф., д.т.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Герел Очир, проф., д.г.-м.н., Центр геолого-геофизических исследований, Монгольский университет науки и технологии, г. Улан-Батор, Монголия

Глигорич Зоран, проф., д-р наук, Белградский университет, г. Белград, Республика Сербия

Дребенштедт Карстен, проф., д-р наук, Технический университет Фрайбургская горная академия, г. Фрайберг, Германия

Дулати Ардежани Фарамарз, проф., д-р наук, Инженерный колледж, Тегеранский университет, г. Тегеран, Иран

Ершов Михаил Сергеевич, проф., д.т.н., Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

Журавлева Наталья Викторовна, проф., д.т.н., АО «Западно-Сибирский испытательный центр» (АО «ЗСИЦентр»), г. Новокузнецк, Российская Федерация

Илиаш Николае, проф., д.т.н., Университет Петрошани, г. Петрошани, Румыния

Кецоджевич Владислав, проф., д-р наук, Институт инженерного дела и минеральных ресурсов им. Бенджамина М. Статлера Университета Западной Вирджинии, г. Моргантаун, Западная Вирджиния, США

Клишин Владимир Иванович, проф., д.т.н., Институт угля Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация

Кошелев Владимир Николаевич, проф., д.х.н., Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

Кумар Джьянт, проф., д-р наук (геотехнический инжиниринг), Индийский институт науки (Indian Institute of Science), г. Бангалор, Индия

Макаров Владимир Александрович, проф., д.г.-м.н., Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

Малафеев Сергей Иванович, проф., д.т.н., Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация

Мисников Олег Степанович, проф., д.т.н., Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Российская Федерация

Морозов Валерий Валентинович, проф., д.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

Петров Игорь Михайлович, д.т.н., ООО «Исследовательская группа «Инфолайн»», г. Москва, Российская Федерация

Раимжанов Бахадиржан Раимжанович, проф., д.т.н., Узбекский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт геотехнологии и цветной металлургии «O'zGEORANGMETLIT», г. Ташкент, Узбекистан

Ракишев Баян Ракишевич, проф., д.т.н., Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алма-Ата, Казахстан

Рестрепо Баэна Оскар Хайме, проф., д-р наук, Национальный университет Колумбии, г. Медельин, Колумбия

Тарасов Вадим Петрович, проф., д.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

Тиболов Денис Петрович, проф., д.э.н., Московский государственный институт международных отношений (Университет) Министерства иностранных дел России, г. Москва, Российская Федерация

Фейзуллаев Акпер Акпер оглы, проф., д.г.-м.н., Институт геологии и геофизики (ИГГ) Национальной Академии Наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

Хорешок Алексей Алексеевич, проф., д.т.н., Кузбасский государственный технический университет им. М.С. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

Шашенко Александр Николаевич, проф., д.т.н., Национальный горный университет, г. Днепр, Украина

Хардигора Моника, проф., д-р наук, Вроцлавский технологический университет, г. Вроцлав, Польша

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УРО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

ПЕРИОДИЧНОСТЬ 4 раза в год

ОСНОВАН в 2016 году

РЕГИСТРАЦИЯ

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 10 августа 2015 года.

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-62652.

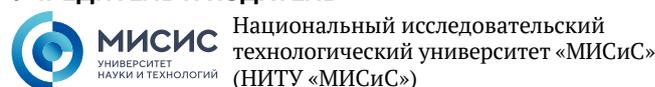
ИНДЕКСИРОВАНИЕ

Scopus, CAS, EBSCO, DOAJ, РИНЦ, ВИНТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.



Журнал открытого доступа.

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ

119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

Телефон: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



Activities of the *Mining Science and Technology (Russia) (Gornye nauki i tekhnologii)* international journal are aimed at developing international scientific and professional cooperation in the field of mining.

The journal target audience comprises researchers, specialists in the field of mining, representatives of academic and professional communities.

The journal publishes original papers describing research findings, experience in the implementation of projects in mining industry, review publications.

The journal seeks to develop interdisciplinary areas that contribute to progress in mining, for example, technological and environmental safety, project organization and management in mining industry, development of territories, legal aspects of natural resource use, and other areas studied by researchers and practitioners. The journal always welcomes new developments. Papers are accepted in English or Russian.

EDITOR-IN-CHIEF

Vadim L. Petrov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF

Oleg I. Kazanin, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National Mineral Resources University "University of Mines", St. Petersburg, Russian Federation

Svetlana A. Epshtein, Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

Zach Agioutantis, Prof., Ph.D., University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA

Maksim A. Bogdasarou, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Brest State A. S. Pushkin University, Brest, Belarus

Grigory Yu. Boyarko, Prof. Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Geol. and Miner.), National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Xuan Nam Bui, Prof., Dr.Sci., Hanoi University of Mining and Geology, Duc Thang – Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

Carsten Drenstedt, Prof., Ph.D., Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg, Germany

Faramarz Doulati Ardejani, Prof., Ph.D., Colledge of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Mikhail S. Ershov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation

Akper A. Feyzullaev, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Institute of Geology and Geophysics of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

Ochir Gerel, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Geoscience Center, the Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

Zoran Gligorić, Prof., Dr.Sci. (Mining-Underground Mining), University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia

Monika Hardygora, Prof., Ph.D., Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland

Nikolae Ilias, Prof., Dr.Sci.(Eng.), University of Petrosani, Petrosani, Romania

Vladislav Kecojevic, Prof., Ph.D., Benjamin M. Statler College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA

Aleksey A. Khoreshok, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Vladimir I. Klishin, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Institute of Coal, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

Vladimir N. Koshelev, Prof., Dr.Sci.(Chem.), National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Gubkin University), Moscow, Russian Federation

Jyant Kumar, Prof., Ph.D-Geotech.Eng., Indian Institute of Science, Bengaluru, India

Vladimir A. Makarov, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Sergey I. Malafeev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

Oleg S. Misnikov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Tver State Technical University, Tver, Russian Federation

Valery V. Morozov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Igor M. Petrov, Dr.Sci.(Eng.), Infomine Research Group LLC, Moscow, Russian Federation

Bakhadirzhan R. Raimzhanov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Uzbekistan Research, Design and Survey Institute for Geotechnology and Nonferrous Metallurgy – O'zGEORANGMETLITI, Tashkent, Uzbekistan

Bayan R. Rakishev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Alma-Ata, Kazakhstan

Oscar Jaime Restrepo Baena, Prof., Ph.D., National University of Colombia, Medellín, Colombia

Alexander N. Shashenko, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National Mining University, Dnipro, Ukraine

Vadim P. Tarasov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Denis P. Tibilov, Prof., Dr.Sci.(Econ.), Moscow State Institute of International Affairs (University) under the Ministry of Foreign Affairs of Russia, Moscow, Russian Federation

Niyaz G. Valiev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), The Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

Natalia Zhuravleva, Prof., Dr.Sci.(Eng.), West Siberian Testing Center JSC (WSTCenter JSC), Novokuznetsk, Russian Federation

Vera V. Yurak, Assoc. Prof., Dr. Sci. (Econ.), Ural State Mining University, Yekaterinburg; Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

EDITORIAL COUNCIL

Yuri G. Agafonov, Assoc. Prof., Cand.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Michael R. Filonov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Leonid A. Plaschansky, Prof., Cand.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Yuri I. Razorenov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

EXECUTIVE SECRETARY

Daria P. Galushka, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

QUARTERLY

FOUNDED in 2016

REGISTRATION

The journal science and applied research journal is registered by the Federal Service for Communication, IT and Mass Communication Control on August 10, 2015. Registration Certificate E-No. ФС77-62652

INDEXATION

Scopus, CAS, EBSCO, DOAJ, РИНЦ, ВИНТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

FOUNDER AND PUBLISHER



MISIS
UNIVERSITY

The National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS)

CONTACT

4 Leninsky Prospect, Moscow 119049, Russian Federation

Phone: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



This work is licensed under a
Creative Commons Attribution 4.0 License.



СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Мировые ресурсы барита – критического минерального сырья 264
Г.Ю. Боярко, Л.М. Болсуновская

Анализ и оценка перспективных участков высококачественного кварцевого сырья
на территории Северного Кавказа 278
И.И. Босиков, Р.В. Ключев, В. Ч. Ревазов, Н.В. Мартюшев

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов
горных пород при термобарических условиях больших глубин..... 290
М.Д. Ильинов, Д.Н. Петров, Д.А. Карманский, А.А. Селихов

Моделирование устойчивости ограждающих сооружений золотоотвала..... 303
О.Г. Бесимбаева, Е.Н. Хмырова, Е.А. Олейникова, А.Е. Касымжанова

ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Оптимизация состава и режима применения реагентов-модификаторов
спектральных характеристик алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации ... 313
В.А. Чантурия, В.В. Морозов, Г.П. Двойченкова, Ю.А. Подкаменный, А.С. Тимофеев

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Оценка эффективности и экологичности сорбент-ориентированного метода
восстановления загрязненных тяжелыми металлами и металлоидами почв 327
В.В. Юрак, Р.А. Апакашев, М.С. Лебзин, А.Н. Малышев

Добавка на основе олеата натрия и льняного масла
для углепылеподавляющих растворов..... 341
В.А. Голубков, Г.А. Горенкова, Е.П. Ворожцов, М.А. Беспалова, С.В. Бортников

Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах 350
С.В. Баловцев

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Обоснование системы воздухораспределения погружного пневмоударника
с экономичным рабочим циклом..... 360
П.Н. Тамбовцев, Е.П. Русин



CONTENTS

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

World's barite resources as critical raw material 264

G. Yu. Boyarko, L. M. Bolsunovskaya

Analysis and evaluation of prospects for high-quality quartz resources
in the North Caucasus 278

I. I. Bosikov, R. V. Klyuev, V. Ch. Revazov, N. V. Martyushev

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Physical simulation aspects of structural changes in rock samples
under thermobaric conditions at great depths 290

M. D. Ilyinov, D. N. Petrov, D. A. Karmanskiy, A. A. Selikhov

Simulation of ash dump embankment stability 303

O. G. Bessimbayeva, E. N. Khmyrova, E. A. Oleinikova, A. E. Kasymzhanova

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Optimizing composition and application conditions of agents for modifying
spectral characteristics of diamonds in X-ray luminescence separation 313

V. A. Chanturiya, V. V. Morozov, G. P. Dvoichenkova, Yu. A. Podkamennyi, A. S. Timofeev

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Assessment of performance and environmental friendliness of a sorbent-based remediation
method for heavy metal and metalloids contaminated soils 327

V. V. Yurak, R. A. Apakashev, M. S. Lebzin, A. N. Malyshev

Chemical additive based on sodium oleate and linseed oil
for preparation coal dust suppression composition 34я

V. A. Golubkov, G. A. Gorenkova, E. P. Vorozhtsov, M. A. Bespalova, S. V. Bortnikov

Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines 350

S. V. Balovtsev

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Justification of the air distribution system of a down-the-hole hammer
with an efficient operating cycle 360

P. N. Tambovtsev, E. P. Rusin



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обзорная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-85>

УДК 553.04:553.689.2



Мировые ресурсы барита – критического минерального сырья

Г. Ю. Боярко , Л. М. Болсуновская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация
 gub@tpu.ru**Аннотация**

Актуальность работы обусловлена статусом барита как критического минерального сырья, принятым в большинстве промышленно развитых стран.

Цель: изучение динамики товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) барита по странам мира, его мировых цен, сырьевой базы барита и перспектив его добычи и потребления.

Методы: статистический, графический, логический.

Результаты. Производство баритового сырья с 0,3 млн т в 1920 г. непрерывно растет и достигло в 2010-х годах 8,0–9,6 млн т/год. Первоначально и добывающие, и перерабатывающие баритовое сырье производства располагались непосредственно в США, Германии, Британии, Италии и Франции, на которые приходилось свыше 90 % его мировой добычи и 80–95 % мирового потребления. В 1950-х годах началось резкое увеличение потребления барита в качестве утяжелителя буровых растворов, что привело к увеличению его добычи в крупных нефтегазодобывающих странах (США, СССР, Мексика, Канада), появлению экспортных потоков (из Марокко и других стран), прекращению экспорта из Германии, Британии и Франции. Доля международной торговли баритом также возросла с 0,3–0,5 млн т/год в 1950-е годы до 4,2–6,0 млн т/год (55–70 % от его мировой добычи) в 2010-е годы. Накопленная мировая добыча барита за 1920–2020 гг. составила 550 млн т, имеющиеся мировые ресурсы барита в подготовленных для эксплуатации месторождениях оцениваются в 740 млн т. Группа критичных стран-импортеров баритового сырья (импорт свыше 50 %) представляет 38,8 % ВВП мировой экономики (США, Европейский союз, Германия, Италия, Саудовская Аравия, Канада, Кувейт, Норвегия, Оман, Алжир, Малайзия, Индонезия, ОАЭ, Азербайджан, Аргентина). Группа стран-экспортеров баритового сырья включает 31,0 % ВВП мировой экономики (Индия, Марокко, Китай, Казахстан, Турция, Иран, Лаос, Мексика, Пакистан, Болгария). Снижение критичности обеспеченности баритовым сырьем возможно путем снижения его потребления (что и осуществляется в Японии, Франции, Италии и Чехии), увеличения мировой добычи барита с вводом в эксплуатацию других баритовых месторождений, учитывая значительные подготовленные ресурсы этого сырья в Иране, Казахстане и Пакистане, а также поиска новых месторождений барита, в том числе хемогенных морских донных осадков.

Ключевые слова

критический минеральный продукт, барит, ресурсы, добыча, мировая торговля, потребление

Благодарности

Статья написана в рамках выполнения гранта Российского научного фонда на 2022–2023 гг. по теме «Критические минеральные продукты в российском и мировом хозяйстве» (проект № 22-28-01742).

Для цитирования

Boyarko G. Yu., Bolsunovskaya L.M. World's barite resources as critical raw material. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):264–277. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-85>

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Review paper

World's barite resources as critical raw material

G. Yu. Boyarko , L. M. Bolsunovskaya

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation gub@tpu.ru**Abstract**

The relevance of the work is connected with the status of barite as a critical mineral raw material, as accepted in most industrialized countries.

Purpose: to study the dynamics of commodity flows (production, import, export, consumption) of barite throughout the countries, its world prices, sources of barite raw materials and the prospects for its production and consumption.



Methods: statistical, graphic, logical.

Results. The production of barite raw materials from 0,3 Mt/year in 1920s grew intensively and reached 8.0–9.6 Mt/year in the 2010. Initially, both the mining and processing of barite raw materials industries were located directly in the USA, Germany, Britain, Italy, and France. These countries accounted for over 90% of world production and 80–95% of world consumption. In the 1950s, a sharp increase in the consumption of barite as a weighting agent for drilling fluids began. This led to an increase in its production in large oil and gas producing countries (the USA, the USSR, Mexico, Canada), export flows (from Morocco and other countries), and cessation of exports from Germany, Britain and France. The share of international trade in barite also increased from 0,3–0,5 Mt/year in the 1950s to 4.2–6.0 Mt/year (55–70% of his income) in the 2010s. The cumulative world production of barite between 1920–2020 is expected to be 550 Mt. World barite resources in deposits prepared for exploitation are estimated at 740 Mt. The group of critical countries importing barite raw materials (imports over 50%) represents 38.8% of the GDP of the world economy (USA, European Union, Germany, Italy, Saudi Arabia, Canada, Kuwait, Norway, Oman, Algeria, Malaysia, Indonesia, UAE, Azerbaijan, Argentina). The group of countries exporting barite raw materials includes 31.0% of the GDP of the world economy (India, Morocco, China, Kazakhstan, Turkey, Iran, Laos, Mexico, Pakistan, Bulgaria). A decrease in the criticality of barite raw material supply is possible as a result in reducing consumption (Japan, France, Italy and the Czech Republic), increasing world barite production with the commissioning of new deposits, given the significant prepared resources of this raw material in Iran, Kazakhstan and Pakistan, as well as the search for new barite deposits, including chemogenic marine bottom sediments.

Keywords

critical minerals, barite, resources, production, world trade, consumption

Acknowledgements

The article was written as part of the grant from the Russian Science Foundation for 2022–2023 on the topic “Critical Mineral Products in the Russian and World Economy” (project No. 22-28-01742).

For citation

Boyarko G. Yu., Bolsunovskaya L.M. World's barite resources as critical raw material. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):264–277. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-85>

Введение

Барит (природный сульфат бария) в настоящее время используется преимущественно в качестве утяжелителя буровых растворов (75–88 % потребления), инертного наполнителя в лакокрасочной, резиновой, бумажной, стекольной, цементной и строительной промышленности, в производстве пластмасс, керамики (6–16 %) и в качестве химического сырья для производства соединений бария (до 6 %) [1–3].

Лидерами мировой добычи барита являются Китай, Индия и Марокко, а лидерами потребления – США, Китай, Индия и Саудовская Аравия. В США, несмотря на значительную собственную добычу барита (400–700 тыс. т/год), ввиду импорта до 87 % от его потребления этот товарный продукт относится к критическим материалам [3, 4]. Такая же ситуация имеет место с баритовым сырьем и в Европейском Союзе, импортирующем до 82 % от его потребления¹. В Китае, несмотря на его мировое лидерство в добыче, барит также является критическим (стратегическим) товарным продуктом [3, 5, 6]. В России спрос на бариты удовлетворяется его добычей из единственного источника (Толчинского месторождения в Республике Хакасия), что является рискованным фактором появления значительной импортной зависимости [3].

Наиболее раннее упоминание о минеральном сырье как критическом материале приводится в слу-

шаниях Сената США при обсуждении «Запасов и доступности стратегических и критически важных материалов для Соединенных Штатов во время войны» в 1953 г.² В конце 1990-х годов понятие «критическое минеральное сырье» (Critical minerals raw materials) прочно утвердилось в экономиках ведущих промышленно развитых и бурно развивающихся стран, обозначая практически незаменимый для новейших промышленных технологий материал, но крайне рискованный в своем получении потребителем по логистике поставок [7]. Главным показателем критичности минерального сырья признается уровень его импортозависимости для национальной экономики. В списке критических минеральных продуктов США предложена градация импорта с порогами в 15, 50, 70, 85, 90 и 95 % от потребления³. Для России пред-

² Stockpile and accessibility of strategic and critical materials to the United States in time of war. Hearings before the Special Subcommittee on Minerals, Materials, and Fuel Economics of the Committee on Interior and Insular Affairs, United States Senate, Eighty-third Congress, first-[second] session, pursuant to S. Res. 143. A resolution to investigate the accessibility and availability of supplies of critical raw materials. Part 6. Petroleum, gas, and coal. Industrial and labor representatives; state administrative and production experts on petroleum, gas, coal, and synthetic fuels. United States. Congress. Senate. Committee on Interior and Insular Affairs. Washington, U.S. Govt. Print. Off.; 1953.

³ Final List of Critical Minerals 2018. Department of the Interior U.S. 83 Fed. Reg. 23295. 2018. URL: <https://www.federalregister.gov/documents/2018/05/18/2018-10667/final-list-of-critical-minerals-2018>

¹ Study on the review of the list of critical raw materials: critical raw materials factsheets. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. Publications Office; 2017. <https://doi.org/10.2873/398823>



ложена градация импортозависимости из трех диапазонов: незначительного импорта (до 25 %), существенного импорта (25–75 %) и тотального импорта (свыше 75 %) [8]. Вторым показателем критичности минерального сырья определяется уровень неопределенности его поставок от производителей к потребителям, причем имеет место субъективизм его оценки [9]. Поэтому и необходим анализ логистики критического минерального сырья для индивидуальных его видов.

Включение барита ведущими промышленными странами в перечень видов критического минерального сырья требует анализа мировой ресурсной базы баритового сырья, географии центров его добычи, тенденций спроса и предложения барита на мировом рынке, а также выработки предложений по решению проблемы импортозависимости.

Методы исследований

С целью изучения мировых ресурсов барита и его товарных рынков были обработаны данные по мировой добыче и мировой торговле баритового сырья за 1920–2020 гг., а также по его мировым ценам. Источники информации: бюллетени и обзоры Геологической службы США⁴ и Британии⁵, базы данных Федеральной таможенной службы России⁶, Госкомстата России⁷ и отдела международной торговли ООН⁸, обзоры информационных центров⁹. Проведен контент-анализ научных источников литературы, национальных зарубежных и российских отчетов и докладов, периодических и продолжающихся изданий, посвященных тематике мировой минерально-сырьевой базы барита. Ресурсы, запасы, объемы добычи, торговли и потребления баритового сырья приводятся в метрических тоннах, цены – в долларах США за тонну барита. Показатели доли импорта и экспорта барита для отдельных стран и мира определены соотношением их объемов к сумме предложения этого товара (производство + импорт). Среднемировые цены барита рассчитаны по данным суммарных объемов и стоимости мирового экспорта.

⁴ Геологическая служба США. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs>

⁵ Британская геологическая служба. URL: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html>

⁶ Федеральная таможенная служба России. URL: <http://stat.customs.gov.ru/analysis>

⁷ Федеральная служба государственной статистики России. URL: <https://gks.ru/emiss>

⁸ UNdata. A world of information. URL: <https://data.un.org/Default.aspx>

⁹ Информационно-аналитический центр «Минерал». URL: <http://www.mineral.ru/Center/index.html>

Информационная группа «Инфомайн». URL: <https://infomine.ru/>

TrendEconomy – Портал открытых данных. URL: <https://trendeconomy.ru/>

Обзор мировых ресурсов и товарных потоков баритового сырья

Барит является довольно распространенным минералом, присутствующим во многих геологических формациях (осадочных, гидротермальных, экзогенных и др.) и формирующим самостоятельные мономинеральные месторождения, а также присутствующим в качестве попутного компонента в комплексных (преимущественно полиметаллических) месторождениях.

Промышленно значимые месторождения барита представлены четырьмя минеральными типами [3, 10]:

- стратиформные осадочные;
- стратиформные вулканогенно-осадочные;
- гидротермально-метасоматические (включая карбонатиты);
- остаточные (коры выветривания).

Геологических формаций баритовых месторождений можно выделить значительно больше (карбонатитовая, конкреционная, барит-флюоритовая, барит-целестиновая и др.) [10, 11], но основная масса добычи барита осуществляется преимущественно из месторождений вышеперечисленных четырех типов.

Баритовые месторождения в геологическом плане достаточно широко распространены и в плане размещения добывающих и потребляющих производств, и первоначально в мировом пространстве осваивались наиболее близкие объекты на собственной национальной территории (рис. 1).

За столетний период – с 1920 по 2020 г. – накопленная мировая добыча барита составила 550 млн т. На 01.01.2021 мировые ресурсы барита в подготовленных для эксплуатации месторождениях оцениваются в 740 млн т¹⁰ (рис. 2), что при современном уровне спроса достаточно на 70–80 лет потребления.

Если в 1920 г. мировое производство и потребление барита составляло 0,3 млн т, к 1940 г. увеличившись до 1,0 млн т/год, то уже с 1946 г. наметился их прогрессивный рост вплоть до локального максимума в 1981 г. (8,4 млн т), а после спада потребления бурового барита в 1980–1990-х годах до уровня 4,4–5,7 млн т/год опять возобновился рост, вплоть до 9,6 млн т в 2012 г. (рис. 3, 4).

В первой половине XX в. и добывающие, и перерабатывающие баритовое сырье производства располагались непосредственно в США, Германии, Британии, Италии и Франции, на которые проходило свыше 90 % его мировой добычи и 80–95 % мирового потребления. Использование барита шло в основном на производство лакокрасочного наполнителя (свыше 50 % потребления) и бариевых химикатов. Но со временем национальные ресурсы барита сокращались и происходила трансформация товарных потоков от производителей к потребителям [3].

¹⁰ Геологическая служба США. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs>

Информационно-аналитический центр «Минерал». URL: <http://www.mineral.ru/Center/index.html>

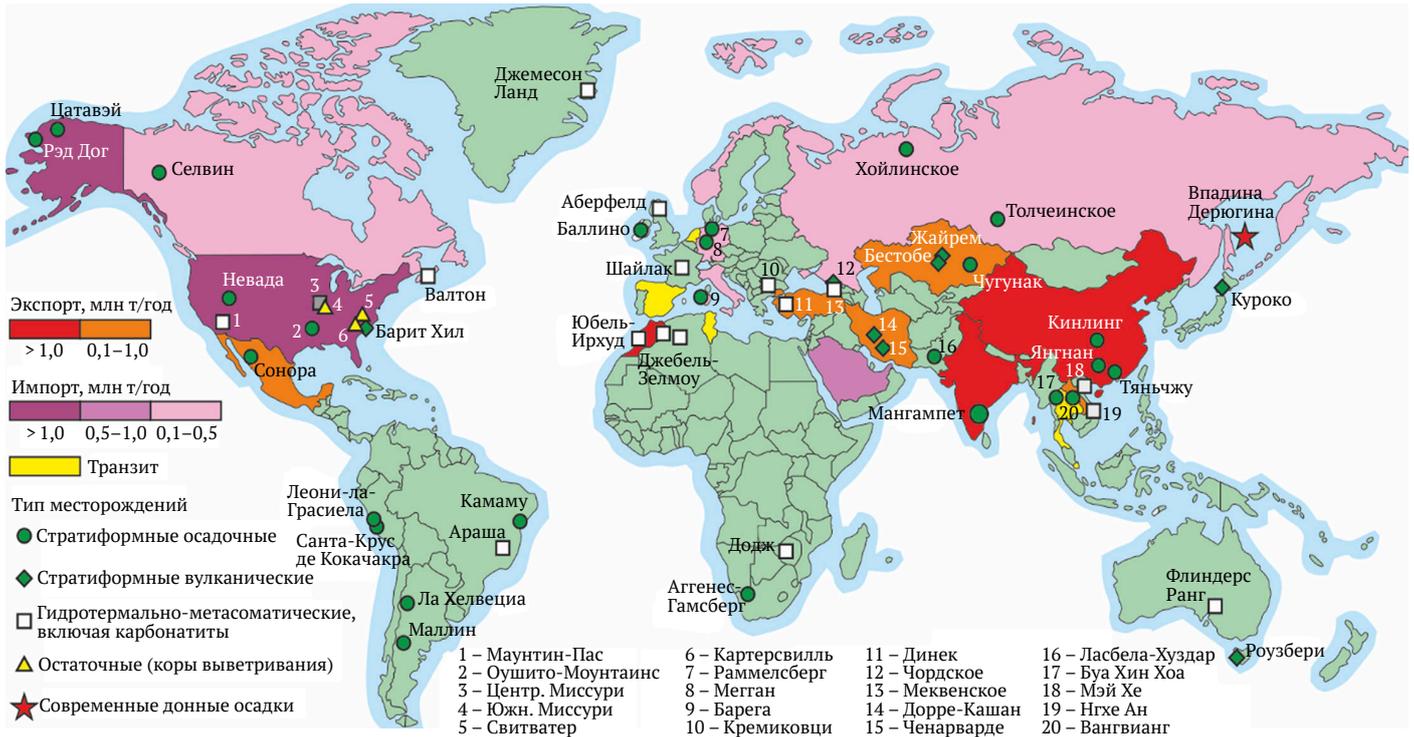


Рис. 1. Карта мира с локализацией баритовых месторождений и стран – лидеров международной торговли баритовым сырьем (экспортеры, импортеры и транзитеры)

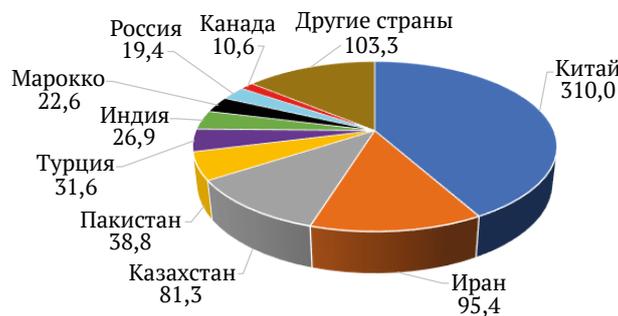


Рис. 2. Мировые ресурсы барита в подготовленных для эксплуатации месторождениях, млн т
 Составлено по данным Геологической службы США (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs>), Информационного центра «Минерал» (<http://www.mineral.ru/Center/index.html>) и Информационной группы «Инфомайн» (<https://infomine.ru/>)

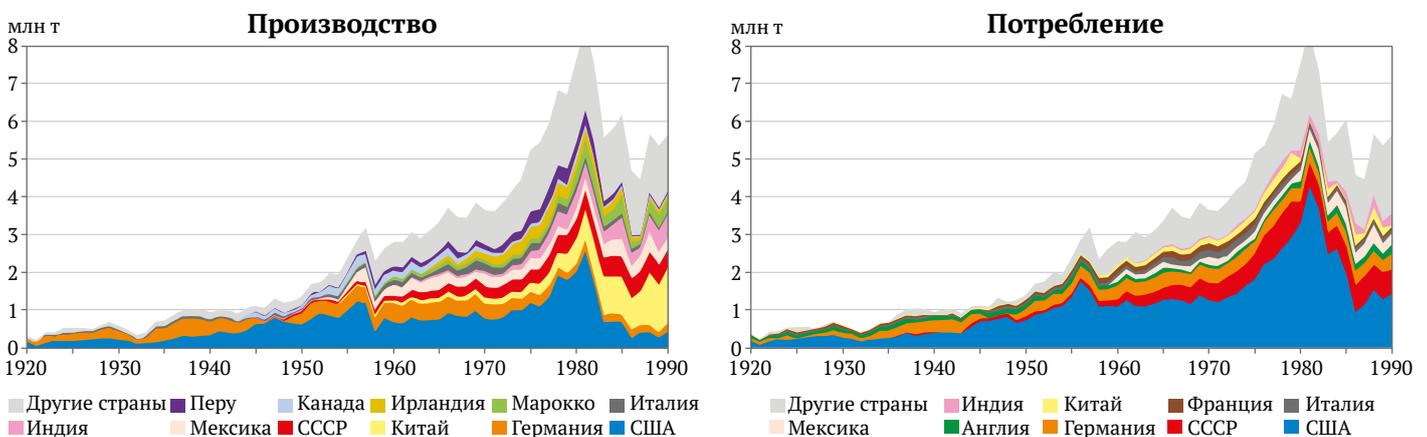


Рис. 3. Динамика мировой добычи и потребления барита за 1920–1990 гг.

Составлено по данным Геологических служб США (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs>) и Британии (<http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html>), Госкомстата РФ (<http://stat.customs.gov.ru/analysis>)

В конце 1950-х годов началось резкое увеличение потребления барита в качестве утяжелителя буровых растворов, что привело к увеличению его добычи в крупных нефтегазодобывающих странах (США, СССР, Мексика, Канада), появлению новых экспортных потоков (из Марокко, Мексики, Канады и других стран), импортных потоков в другие добывающие страны (Алжир, Венесуэла, Тринидад/Табаго), а также формированию транзитных потоков баритового сырья через Нидерланды, Бельгию и Сингапур [3].

В 1980-е годы вследствие завершения энергетического кризиса 70-х годов произошло сокращение объемов буровых работ и, соответственно, потребления баритового сырья, в первую очередь в США.

В 1990-е годы и в начале XXI в. происходит трансформация мировой экономики, в первую очередь промышленного потенциала Китая. Резко выросла собственная добыча барита в самом Китае, а также в Индии, Казахстане, Иране, Пакистане.

В последние годы ввиду истощения длительно разрабатываемых нефтяных месторождений значительно возросли объемы эксплуатационного бурения и произошло увеличение потребления баритового утяжеля-

теля (и, соответственно – импорта) не только в США, Канаде, России, но и в Саудовской Аравии, Казахстане, Кувейте, Аргентине, Индонезии, ОАЭ и Омане [3].

Главные баритодобывающие страны. США являются безусловным мировым лидером потребления барита в течение всего исследуемого периода, а в 1941 г. стали еще и лидером по добыче, утратив последний только в 1983 г. Накопленная национальная добыча составила 63,3 млн т, накопленное потребление – 146,6 млн т, а остаточные ресурсы месторождений – 7,6 млн т. На территории США разрабатывались многочисленные месторождения барита стратиформного (Уошито Моунтаинс, Ред Дог, Бассейн Цатавэй и в штате Невада), вулканогенно-осадочного (Барит Хилл), гидротермального (Моунтаин Пасс и в штате Миссури) и остаточного (Светватер, Цартерсвилль и в штате Миссури) типа [1, 12, 13, 14]. В период с 1939 по 1964 г. разработка только группы месторождений Уошито Моунтаинс давала около 25 % мировой добычи [13]. Максимальный уровень добычи баритового сырья в США был достигнут в 1981 г. (2,6 млн т), но к 1985 г. он упал до минимума в 269 тыс. т. В дальнейшем уровень добычи барита в США составляет

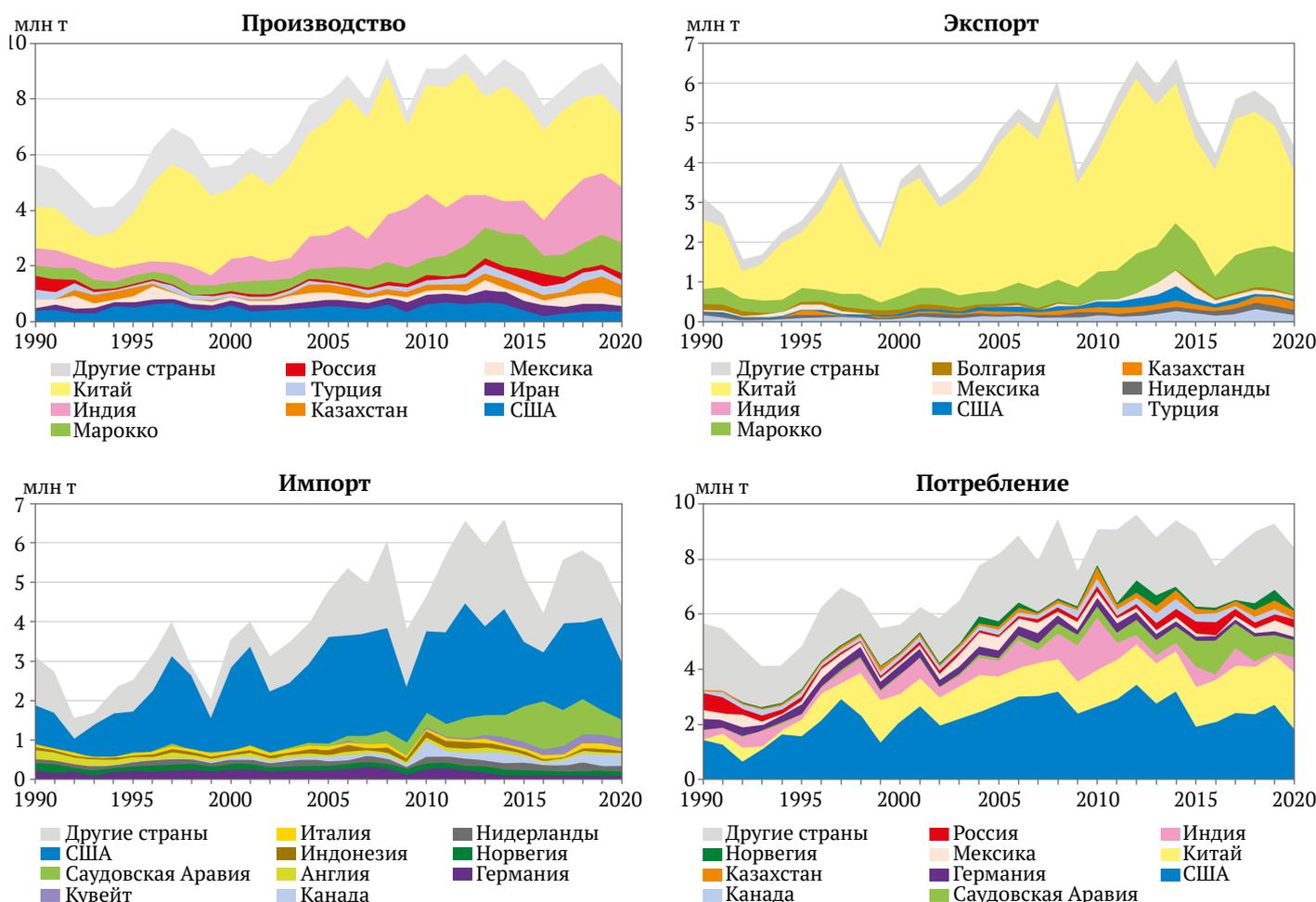


Рис. 4. Динамика мировой добычи, экспорта, импорта и потребления потоков барита за 1990–2020 гг.

Составлено по данным Геологических служб США (<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs>) и Британии (<http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html>), Госкомстата РФ (<https://gks.ru/emiss>) и Таможенной службы РФ (<http://stat.customs.gov.ru/analysis>), отдела международной торговли ООН (<https://data.un.org/Default.aspx>)



400–700 тыс. т/год. Начиная с 1986 г. США является нетто-импортером баритового сырья, ввоза 0,9–2,9 млн т/год (70–90 % от потребления). Национальное потребление барита в США выросло на фоне бурного роста нефтедобывающей промышленности с 0,7 млн т в 1946 г. до 1,7 млн т в 1956 г., в 1957–1974 гг. находилось на уровне 1,1–1,7 млн т/год, в связи с развитием вторичных и третичных технологий добычи нефти с 1975 г. начался рост потребления вплоть до 4,3 млн т в 1981 г. с последующим спадом до 0,9–1,5 млн т/год в 1986–1995 гг. В XXI в. национальное потребление баритового сырья в США составляет 1,7–3,4 млн т/год.

Китай, добывший в 1955 г. всего 25 тыс. т баритового сырья, интенсифицировал в 1980-е годы работы по развитию баритодобывающей отрасли и нарастил объемы его добычи, став мировым лидером в 1983 г., продолжая увеличение объемов производства вплоть до максимума в 5,0 млн т в 2008 г. [3]. Накопленная национальная добыча барита в Китае составляет 108,3 млн т, накопленное потребление – 39,1 млн т, остаточные ресурсы – 310 млн т. Основной объем добычи баритового сырья в основном приходится на месторождения Кинлинг, Янгнан и Тяньчжу [12, 15–17]. Большая часть добытого барита направляется на экспорт, при этом с 1980 по 2017 г. Китай был мировым лидером международной торговли. Доля экспорта баритового сырья из Китая в 1980–1987 гг. составляла 20–36 % от мировой торговли, в 1988–2012 гг. она увеличилась до 45–66 %, но начиная с 2013 г., ввиду увеличения внутреннего потребления барита, снизилась до 12–39 %. Национальное потребление баритового сырья в Китае выросло с уровня 100–200 тыс. т/год в 1964–1994 гг. до 1,5 млн т в 1998 г., стабилизировалось на уровне 1,0–1,3 млн т/год в 2000–2009 гг. и продолжило рост вплоть до 2,0 млн т в 2020 г. Преимущественное направление использования барита в Китае – в качестве лакокрасочного наполнителя.

В СССР, как и в Китае, массовая добыча барита началась поздно, после Второй мировой войны и наращивалась с 30 тыс. т в 1946 г. вплоть до максимума в 540 тыс. т в 1978 г. В дальнейшем в России произошел спад промышленного баритового производства, сопровождавшийся снижением уровня добычи до 50–85 тыс. т/год в 1993–2007 гг., но с 2008 г. наметился рост производства вплоть до 434 тыс. т в 2016 г. Накопленная добыча барита в СССР/России составила 16,9 млн т, накопленное потребление – 24,3 млн т, остаточные ресурсы – 19,4 млн т. Добыча баритового сырья ведется на Толчеинском месторождении в Республике Хакасия, работы на других ранее разрабатываемых месторождениях (Хойлинское, Кварцитовая Сопка) остановлены [3]. Осуществлялся также импорт барита: в 1940–1950-е годы – 20–70 тыс. т/год (30–88 % от потребления), в 1960–1980-е годы – 100–400 тыс. т/год (6–38 %), в 1990-е и в XXI в. – 25–65 тыс. т/год (10–30 %). Национальное потребление барита в СССР в 1920–1940-е годы составляло 5–20 тыс. т/год, с 1944 г. начало увеличиваться с 55–78 тыс. т/год в 1944–1957 гг. до 950 тыс. т в 1979 г. и находилось на уровне 550–750 тыс. т/год в 1980-е го-

ды. Национальное потребление барита в России в 1990-е годы и в XXI в. составляет 100–450 тыс. т/год.

Индия также начала интенсифицировать добычу баритового сырья в 1975 г., доведя ее до максимума в 2,3 млн т в 2010 г. Большая часть добытого барита идет на экспорт и начиная с 2018 г. Индия стала мировым лидером международной торговли баритовым сырьем (до 37 % рынка), опередив Китай [3]. Накопленная добыча барита в Индии составила 43,0 млн т, накопленное потребление – 20,0 млн т, остаточные ресурсы – 26,9 млн т. Основной объем добычи баритового сырья приходится на уникальное месторождение Мангампет [12, 18]. Национальное потребление барита в Индии в 1920–1950-е годы составляло 5–20 тыс. т/год, в 1960–1970-е – 30–55 тыс. т/год, с 1977 г. начался его рост – до 547 тыс. т в 1993 г. и до 1,9 млн т в 2010 г. В дальнейшем потребление барита в Индии находится на уровне 500–600 тыс. т/год.

Марокко, начав в 1958 г. разработку собственных месторождений барита Джебель-Ирхуд и Джебель-Зельму, полностью ориентировалось на экспорт этого сырья [19, 20]. Длительное время (1980–2005 гг.) уровень добычи и экспорта барита составлял 0,4–0,5 млн т/год, в дальнейшем он увеличился до 0,7–1,2 млн т/год, и Марокко традиционно занимает третье место в международной торговле баритовым сырьем (10–24 % рынка) [3]. Накопленная добыча барита в Марокко составила 24,6 млн т, накопленное потребление – 2,8 млн т, остаточные ресурсы – 22,6 млн т, имеется возможность значительного наращивания ресурсной базы барита [21, 22].

Мексика, начав в 1953 г. разработку месторождения Сонора [23], быстро довела к 1960-м годам уровень добычи барита до 200–400 тыс. т/год и сохраняет такую производительность до настоящего времени, направляя значительную часть (100–200 тыс. т/год) для потребления в национальной нефтяной отрасли. Накопленная добыча баритового сырья в Мексике составляет 17,4 млн т, накопленное потребление – 12,9 млн т, остаточные ресурсы – 3,8 млн т. В 1950–1970-е годы на экспорт отправлялось (в основном в США) 100–200 тыс. т/год, но ввиду увеличения национального потребления нефтяной отрасли объемы экспорта сократились в 1980-е годы до 30–65 тыс. т/год, а в 1997 г. экспорт баритового сырья был практически прекращен, возобновившись лишь после 2011 г.

Турция удачно располагает близ европейских потребителей баритового сырья. С 1973 г. в разработке находится месторождение Динек [24], поставляется на экспорт 100–300 тыс. т/год, для собственного потребления направляется 50–100 тыс. т/год. Накопленная добыча Турции – 9,2 млн т, накопленное потребление – 3,4 млн т, остаточные ресурсы баритового сырья – 31,6 млн т.

Баритодобывающие страны, утратившие статус экспортера. Многие страны – экспортеры баритового сырья ввиду истощения собственных месторождений практически ушли с этого рынка международной торговли: Югославия в 1966 г., Германия в 1973 г., Греция в 1976 г., Перу в 1985 г., Ирландия в 1995 г. и Болгария в 2009 г. [3].



Германия в 1920–1930-е годы была мировым лидером добычи и потребления барита. Добыча осуществлялась на месторождениях Раммелсберг и Мегган [25, 26]. К 2020 г. национальная накопленная добыча баритового сырья составила 23,3 млн т, накопленное потребление – 26,8 млн т, а остаточные ресурсы собственных месторождений – 1,2 млн т. Объемы добычи барита увеличились со 100 тыс. т/год в 1920-х годах до 400 тыс. т/год в 1930–1960-х годах (с просадкой вплоть до 2 тыс. т/год во время Второй мировой войны), но с 1972 г. начали снижаться – вплоть до 34 тыс. т в 2017 г. В это же время появился импортный поток баритового сырья (с 10 % импорта от потребления в 1960-х годах до 70 % в конце 1990-х годов) и уже к 1979 г. Германия стала его нетто-импортером. Ввозится 100–300 тыс. т/год барита. Уровень потребления баритового сырья Германии длительное время составляет 300–400 тыс. т/год с просадкой лишь во время экономического кризиса 2008–2009 гг. (174 тыс. т в 2009 г.) и снижением спроса начиная с 2014 г. до настоящего времени (до 130–160 тыс. т/год).

Перу, начав в 1951 г. разработку месторождения Леони-ла-Грасиела (100–435 тыс. т/год, подавляющая часть шла на экспорт), вплоть до 1985 г. была значимым экспортером барита (до 13 % мирового рынка). Накопленная добыча Перу составила 7,1 млн т, остаточные ресурсы – 3,4 млн т. В настоящее время в Перу разрабатывается месторождение Санта-Крус де Кокачакра с уровнем добычи 15–105 тыс. т/год.

Ирландия, начав в 1955 г. разработку месторождения Баллино (100–370 тыс. т/год), практически весь добытый барит отправляла на экспорт (наполняя иногда до 22 % мирового рынка) вплоть до остановки производства в 1994 г. Накопленная добыча Ирландии составила 5,7 млн т, остаточные ресурсы – 1,0 млн т.

Болгария с 1974 г. добывает барит в качестве побочного полезного компонента на железорудном месторождении Кремиковци (100–250 тыс. т/год), большую часть которого направляет на экспорт. В 2009 г. в результате мирового экономического кризиса производство было остановлено и возобновилось лишь в 2014 г. на уровне 40–70 тыс. т/год. Накопленная добыча Болгарии составила 4,5 млн т, остаточные ресурсы – 9,5 млн т.

Новые страны, добывающие баритовое сырье.

Появились новые страны с масштабной добычей баритового сырья: Казахстан, Иран (до 450 тыс. т/год) и Лаос (до 400 тыс. т/год) [3].

В Казахстане в 1990-е годы в экономически неблагоприятной обстановке добыча на имеющихся разрабатываемых баритовых месторождениях (Карагайлы, Жайрем, Бестобе и Чугунак [27]) составляла всего 10–50 тыс. т/год. Но начиная с 2003 г. выпуск баритового сырья увеличился до 170–270 тыс. т/год, а к 2019 г. вырос до 600 тыс. т/год. Значительная часть добытого барита (100–220 тыс. т/год) отправляется на экспорт в Азербайджан, Туркмению, Узбекистан и Россию. Ведутся интенсивные геологоразведочные работы для наращивания сырьевой базы баритового сырья Казахстана. Накопленная добыча барита в Казахстане

за достаточно небольшой срок – с 1992 г. – составила 6,0 млн т, накопленное потребление 3,6 млн т, остаточные же ресурсы весьма велики – 81,3 млн т.

Иран, разрабатывающий с 1991 г. (15–90 тыс. т/год) уникальные месторождения Дорре Кашан и Ченарварде [28, 29], ранее выпускавший до 75 тыс. т/год, начиная с 1991 г. увеличил выпуск баритового сырья до 150–230 тыс. т/год, а с 2009 г. – до 300–435 тыс. т/год. Часть добытого барита идет на экспорт – 50–150 тыс. т/год. Накопленная добыча барита в Иране составляет 10,0 млн т, накопленное потребление 8,5 млн т, остаточные ресурсы весьма велики – 95,4 млн т.

В Лаосе, ранее не представлявшем интереса в части полезных ископаемых, после обнаружения месторождения Вангвианг [30] начался бурный рост добычи барита – с 27 тыс. т в 2013 г. до 420 тыс. т в 2019 г. На экспорт отправляется 60–100 тыс. т/год.

Страны транзитной торговли баритовым сырьем. Между добывающими странами и конечными потребителями баритового сырья появились и торговые посредники – Нидерланды, Испания, Тунис, Таиланд, Бельгия, Гонконг и Сингапур.

Нидерланды находятся в удобной логистической позиции получения товарных грузов в крупнейших портах Амстердам и Роттердам с дальнейшей их перевалкой в страны центральной части Европейского Союза. При отсутствии добычи барита и минимальных объемах национального потребления 10–40 тыс. т/год объемы импорта и экспорта составляют 100–200 тыс. т/год.

Испания до 2009 г. самостоятельно добывала до 50–100 тыс. т/год барита при собственном потреблении 50–70 тыс. т/год. В 2010 г. национальное производство баритового сырья было прекращено, потребление сократилось до 20–40 тыс. т/год, но увеличился импорт до 50–100 тыс. т/год и экспорт (30–50 тыс. т/год).

Тунис добывает до 10 тыс. т/год баритового сырья при потреблении до 5 тыс. т/год, но с 2008 г. импортирует и экспортирует 30–80 тыс. т/год барита.

Таиланд осуществляет добычу барита на месторождении Буа Хин Хоа – 50–200 тыс. т/год при внутреннем потреблении 50–150 тыс. т/год. Импорт и экспорт баритового сырья ранее находился на уровне 20–30 тыс. т/год, но с 2010 г. объемы увеличились до 60–130 тыс. т/год. Отчасти это результат транзитной торговли баритом, поступающим из Лаоса, причем первое время сырую лаосскую руду обогащали непосредственно на предприятиях Таиланда.

Транзитные потоки баритового сырья через Бельгию, Сингапур и Гонконг небольшие – 20–40 тыс. т/год.

Другие баритодобывающие страны из числа G20. Британия в 1920–1930-е годы производила баритового сырья 40–80 тыс. т/год, максимальный уровень добычи 100–120 тыс. т/год был достигнут в 1940-е годы, после чего идет стабильное производство 30–60 тыс. т/год вплоть до настоящего времени. В разработке находится месторождение Аберфелд [31]. Национальное потребление также держится на достаточно стабильном уровне – 90–130 тыс. т/год, что требует обеспечения по импорту 60–90 тыс. т/год. Накопленная добыча Британии составила 6,4 млн т,



накопленное потребление – 12,3 млн т, остаточные ресурсы – 2,4 млн т.

Канада, разрабатывающая с 1944 г. месторождения Селвун и Валтон (100–300 тыс. т/год), с 1982 г. сократила добычу до 30–50 тыс. т/год, сохраняя этот уровень до настоящего времени. В 1940–1970-е годы добытое баритовое сырье направлялось на экспорт (100–200 тыс. т/год), преимущественно в США. Но потребности национальной нефтегазовой промышленности Канады переориентировали товарные потоки, с 1979 г. экспорт практически прекратился, а с 1999 г. начали расти объемы импорта барита (100–400 тыс. т/год). Накопленная добыча Канады составила 6,8 млн т, накопленное потребление – 6,0 млн т, остаточные ресурсы баритового сырья – 10,6 млн т.

Италия в 1920–1950-е годы производила баритового сырья 20–100 тыс. т/год, в 1960–1980-е годы – 100–200 тыс. т/год, в 1990-е снизила уровень добычи до 40–70 тыс. т/год. В разработке находились месторождения Барега и Монт-Эга. По импорту баритового сырья приобреталось всего 20–40 тыс. т/год. До 1950-х годов уровень национального потребления барита в Италии составлял 20–50 тыс. т/год, но в 1960–1980-е годы на фоне развития химической промышленности он увеличился до 100–200 тыс. т/год, в дальнейшем стабилизировался на уровне 90–110 тыс. т/год. Накопленная добыча Италии составила 7,2 млн т, накопленное потребление – 8,8 млн т, остаточные ресурсы – 2,0 млн т.

Франция в 1920–1960-е годы производила баритового сырья 30–100 тыс. т/год, в 1970–1980-е годы – 100–200 тыс. т/год, в 1990-е годы 40–70 тыс. т/год, а в 2007 г. полностью прекратила добычные работы. В разработке находилось месторождение Шайлак. По импорту баритового сырья приобреталось всего 20–40 тыс. т/год. Накопленная добыча Франции составила 6,4 млн т, накопленное потребление – 7,3 млн т, остаточные ресурсы – 0,8 млн т.

Европейский союз (ЕС) представляет собой сложный конгломерат, среди которых есть страны, добывающие барит (Болгария, Британия, Германия, Словакия), страны, только потребляющие баритовое сырье (Италия, Польша, Чехия, Австрия), и страны транзитной торговли (Нидерланды, Испания, Бельгия). В ре-

зультате, несмотря на критичность для ЕС баритового сырья в целом (68–82 % импорта от спроса), имеет место и значительный встречный экспортный поток (до 25 %). Накопленная добыча ЕС составляет 63,0 млн т, накопленное потребление – 77,5 млн т, остаточные ресурсы – 0,8 млн т.

Страны – чистые импортеры баритового сырья. *Саудовская Аравия*, длительное время потреблявшая баритовое сырье на уровне 10–30 тыс. т/год, с 2004 г. в связи с переходом на вторичные и третичные технологии добычи нефти значительно увеличила объемы буровых работ и, соответственно, потребления барита (вплоть до максимума в 1,2 млн т в 2016 г.). Накопленное национальное потребление баритового сырья в Саудовской Аравии составляет 9,8 млн т.

Норвегия, начавшая осваивать нефтегазовые месторождения Северного моря, с 1979 г. импортирует значительные объемы баритового сырья (100–300 тыс. т/год) [3]. Накопленное национальное потребление барита в Норвегии составляет 5,6 млн т.

В последнее время наращиваются объемы потребления барита также в Кувейте (до 215 тыс. т/год), Аргентине (до 180 тыс. т/год), Индонезии (до 150 тыс. т/год) и ОАЭ (до 80 тыс. т/год) [3].

Критичность мировой торговли баритовым сырьем. Доля международной торговли баритовым сырьем непрерывно растет – с 5–14 % в 1940-х годах до 55–70 % в 2010-х годах (рис. 5).

По соотношению долей импорта и экспорта баритового сырья (рис. 6) можно выделить следующие группы стран:

- страны-импортеры критического уровня (импорт свыше 50 %) – Алжир, Германия, США, Европейский союз, Малайзия, Канада, Аргентина, Италия, Азербайджан, Оман, Кувейт, Саудовская Аравия, Индонезия, ОАЭ, Норвегия;

- страны-импортеры с умеренным импортом – Британия, Россия, Бразилия;

- страны-экспортеры с малой долей экспорта (до 50 %) – Болгария, Китай, Мексика, Казахстан;

- страны-экспортеры с высокой долей экспорта – Марокко, Турция, Индия, Пакистан, Лаос, Иран;

- страны транзитной торговли баритовым сырьем – Нидерланды, Тунис, Испания, Таиланд.

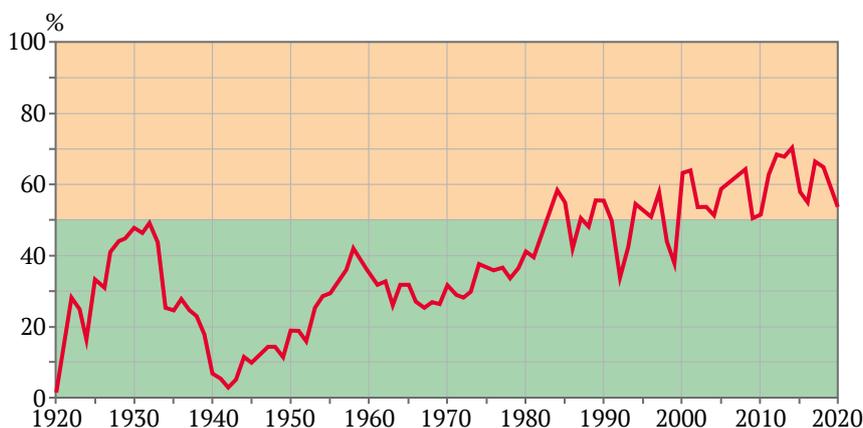


Рис. 5. Соотношение объемов международной торговли (экспорта/импорта) и предложения (добычи) баритового сырья, %

Суммарный валовой национальный продукт стран-импортеров баритового сырья критического уровня составляет 38,8 % от мирового ВВП, стран-экспортеров (и с малой, и с высокой долями экспорта) – 31,0 %, стран транзитной торговли – 3,2 %. Таким образом, критичность рынка международной торговли баритом весьма высока, в первую очередь для членов G20 (США, Европейский союз, Саудовская Аравия, Индонезия и Аргентина).

Снижение критичности обеспеченности баритовым сырьем возможно путем снижения его потребления и увеличения добычи барита с вводом в эксплуатацию новых месторождений.

Сокращение потребления баритового сырья путем нахождения заменителей или отказа от его использования. В лакокрасочной промышленности баритовый наполнитель успешно замещается диоксидом титана и отбеленным каолином, но этот процесс весьма медленный. Все упирается в традиционный консерватизм потребителей, привыкших к знакомым товарным продуктам. Тем не менее Япония с потреблением барита 100–150 тыс. т/год в 1980–1990-годы сократила к 2010-м годам его спрос до 25–40 тыс. т/год. Сократилось потребление баритового сырья также во Франции, Италии, Чехии. В Южной Корее изначально были малые объемы использования барита (25–40 тыс. т/год), что свидетельствует о планируемом

ограничении его применимости (плановом ограничении его применения). В принципе, возможно также замещение барита в главном сегменте его потребления – в буровых растворах – чешуйчатым гематитом (по физическим и эксплуатационным свойствам), но на практике такая замена не получила распространения. Даже в новых сверхтяжелых буровых растворах на основе бромидов используется барит, по сути, дело уже не в качестве утяжелителя, а в наполнителе и загустителе жидкости.

Имеющихся подготовленных мировых ресурсов баритового сырья (740 млн т) при современном уровне его спроса достаточно на 70–80 лет потребления. Наиболее благоприятная ситуация с ресурсами барита в Китае, Иране и Казахстане. Сложности проявляются в том, что большая их часть находится вне национальных территорий критичных стран-импортеров барита. Их освоение является проблемой – относительная дешевизна баритового сырья делает проекты их освоения малопривлекательными. Проблемными являются проекты разработки баритовых месторождений в условиях Заполярья – Хойлинская группа в России, Бассейна Джемесон Лэнд в Гренландии и Бассейна Цутавэй на Аляске. По условиям логистики тоже есть проблемы, к примеру, центры добычи баритового сырья в Казахстане находятся вдали от морских портов, что значительно увеличи-

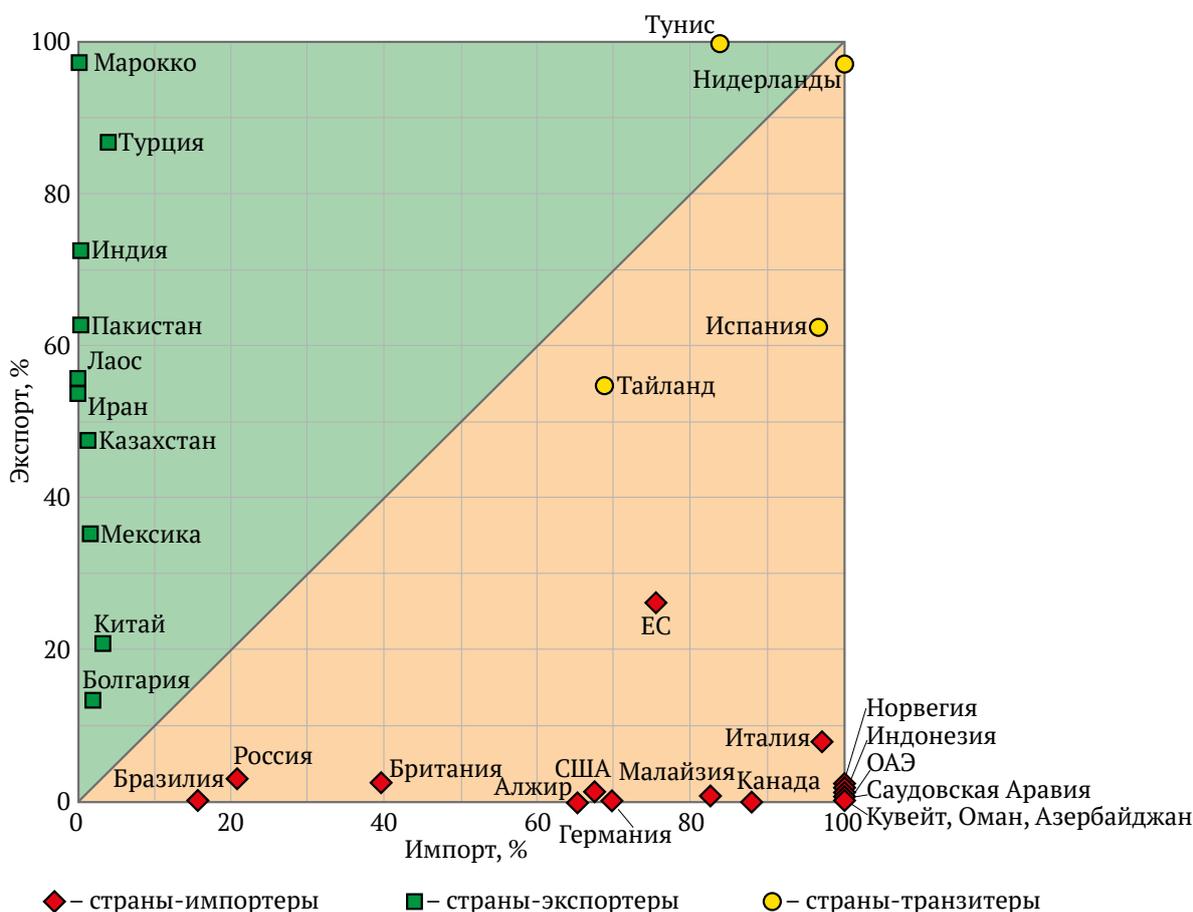


Рис. 6. Диаграмма соотношения объемов импорта экспорта и объемов предложения (добыча + импорт) баритового сырья в 2020 г. для стран с товарными потоками барита свыше 50 тыс. т, %



вает транспортную составляющую в себестоимости отгружаемой продукции. Кроме того, негативными сигналами являются политические санкции против отдельных стран (Ирана, России, Китая и др.), что уже привело к снижению экспортных поставок барита из Китая и Ирана. Тем не менее имеются возможности решать эти сложные вопросы, возобновить добычу на остановленных производствах в Австралии, ЮАР, Грузии, а также осуществлять новые геолого-разведочные проекты на территориях новых стран (по примеру открытий баритовых месторождений в Лаосе).

Принципиально новым источником баритового сырья могут стать современные хемогенные осадки барита, обнаруженные на дне впадины Дерюгина в Охотском море (см. рис. 1) [32]. Они обнаружены на площади до 16 км² на относительно небольших глубинах 1470–1480 м в виде травертиноподобных скоплений, конкреций и корок. Ресурсы баритовых осадков этого поля составляют до 10 млн т BaSO₄, что отвечает средней концентрации баритовых образований до 600 кг/м² [33, 34]. Подобные современные морские баритовые осадки обнаружены и на других участках морского дна мирового океана [35], причем кроме хемогенного их образования предлагается и биогенный генезис современного морского барита [36]. Ранее бариты донных осадков морей даже не рассматривались как потенциально полезный ресурс. По аналогии с проектами освоения месторождений глубоководных железомарганцевых конкреций разработка подводных баритовых осадков технически и экономически возможна. Кроме того, появление нового хемогенного типа баритовых месторождения требует переосмысления геологических прогнозов поиска подобных месторождений в древних батинальных и абиссальных осадочных формациях.

Выводы

Производство баритового сырья непрерывно растет и достигло в 2010-х годах 8,0–9,6 млн т/год, доля международной торговли баритом также возросла до 4,2–6,0 млн т/год, или до 55–70 % от его мировой добычи. Накопленная мировая добыча барита за 1920–2020 гг. составила 550 млн т, имеющиеся мировые ресурсы барита в подготовленных для эксплуатации месторождениях оцениваются в 740 млн т.

Признаки критичности товарных потоков баритового сырья для национальных экономик стран – высокая доля импорта от предложения (свыше 50 %) при достаточно значительных объемах импорта (свыше 50 тыс. т/год) и превышение накопленных объемов национального потребления над национальной добычей.

Группа критичных стран-импортеров баритового сырья (импорт свыше 50 %) представляет 38,8 % ВВП мировой экономики. В 2020 г. они импортировали: США – 1,5 млн т, 68 % от спроса, Европейский Союз – 512 тыс. т, 75 %, в т.ч. Германия – 91 тыс. т, 70 %) и Италия – 96 тыс. т, 97 %, Саудовская Аравия – 500 тыс. т, 100 %, Канада – 290 тыс. т, 88 %, Кувейт – 208 тыс. т, 100 %, Норвегия – 118 тыс. т, 100 %,

Оман – 95 тыс. т, 100 %, Алжир – 75 тыс. т, 65 %, Малайзия – 70 тыс. т, 82 %, Индонезия – 62 тыс. т, 100 %, ОАЭ – 91 тыс. т, 100 %, Азербайджан – 59 тыс. т, 100 %, Аргентина – 51 тыс. т, 88 %.

Группа стран-экспортеров баритового сырья включает 31,0 % ВВП мировой экономики. В 2020 г. они экспортировали: Индия – 1,46 млн т, 73 % от производства, Марокко – 1,07 млн т, 97 %, Китай – 541 тыс. т, 21 %, Казахстан – 217 тыс. т, 48 %, Турция – 181 тыс. т, 87 %, Иран – 162 тыс. т, 54 %, Лаос – 100 тыс. т, 56 %, Мексика – 101 тыс. т, 35 %, Пакистан – 91 тыс. т, 63 %.

Баритовое сырье фактически невозможно заменить в сегменте основного его применения для производства буровых растворов. Имеется тенденция увеличения мирового потребления утяжеленных буровых растворов ввиду системных изменений разработки нефтегазовых месторождений, связанных с общим увеличением глубинности бурения для вскрытия нефтегазовых залежей с 1–2 до 3–5 км и интенсивным вовлечением в разработку трудноизвлекаемых запасов сланцевой нефти и газа, требующих по технологической схеме проходки в 5–8 раз большего количества эксплуатационных скважин.

Мировой спрос барита в ближайшем будущем будет только увеличиваться ввиду роста его потребления из-за системных изменений разработки нефтегазовых месторождений, связанных с общим увеличением глубинности бурения и интенсивным вовлечением в разработку трудноизвлекаемых запасов сланцевой нефти и газа. Соответственно, растут потребление и импорт критического баритового сырья в нефтегазодобывающие страны – США, Саудовскую Аравию, Кувейт, Индонезию, Англию, Канаду и Норвегию.

Мировая сырьевая база баритового сырья позволяет наращивать его добычу как в традиционных добывающих странах (Марокко, Мексика), так и в новых странах – лидерах экспорта барита (Индия, Китай). Состояние добычи барита в России хоть и критично (единственное добывающее предприятие), но вполне решаемо с позиции его будущего обеспечения путем ввода в эксплуатацию новых месторождений и формированием управляемых импортных потоков барита из дружественных стран (Казахстан, Индия, Китай, Иран).

Снижение критичности обеспеченности баритовым сырьем возможно путем снижения его потребления в лакокрасочном использовании (что и осуществляется в Японии, Франции, Италии и Чехии), а также увеличения мировой добычи барита с вводом в эксплуатацию новых месторождений, учитывая значительные подготовленные ресурсы этого сырья в Иране, Казахстане и Пакистане. Возможны обнаружение новых месторождений барита на слабоизученных в геологическом отношении территориях (Монголии, Лаоса, Мьянмы, Западной Сахары, шельфа побережья Марокко и др.), а также поиски нового хемогенного типа баритовых месторождений на дне морей и в древних батинальных и абиссальных осадочных формациях.



Список литературы

1. Bearden S.D. Barite: World sources and the US market. *Mining Engineering*. 1997;49(11):87–88.
2. Bonel K.A. *Mineral profile: Barites*. British Geological Survey; 2005. 28 p.
3. Боярко Г. Ю., Хатьков В. Ю. Обзор состояния производства и потребления баритового сырья в России. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(10):180–191. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3403>
4. Schulz K.J., DeYoung J.H., Seal R.R., Bradley D.C. (eds.) *Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply*. United States Geological Survey; 2017. 862 p. <https://doi.org/10.3133/pp1802>
5. Chen J.B., Huo W.M., Feng D.D. Analysis of strategic (critical) mineral resources situation in China and the U.S. and the EU. *Natural Resources. Economy of China*. 2020;33(8):9–17. (In Chinese)
6. Jiang Y., Wang T., Long T. Research on listing barite as a strategic mineral resource. *Acta Geoscientica Sinica*. 2021;42(2):297–302. (In Chinese) <https://doi.org/10.3975/cagsb.2020.110204>
7. Еремин Н. И. Критические металлы. *Геология рудных месторождений*. 2016;58(6):595–596. <https://doi.org/10.7868/S0016777016060034>
8. Хатьков В. Ю. О товарных потоках импортозависимых минеральных продуктов. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2017;(5):66–71.
9. Singh R. K., Kumar A., Garza-Reyes J.A., de S'a M. M. Managing operations for circular economy in the mining sector: An analysis of barriers intensity. *Resources Policy*. 2020;69(4):101752. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101752>
10. Касымов М. А. Формационные типы баритовых месторождений. *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова*. 2014;(33):108–112.
11. Ахманов Г. Г., Васильев Н. Г. *Минеральное сырье. Барит. Справочник*. М.: Геоинформмарк; 1997. 39 с.
12. Clark S.H.B., Poole F.G., Wang Z. Comparison of some sediment-hosted, stratiform barite deposits in China, the United States, and India. *Ore Geology Reviews*. 2004;24(1–2):85–101. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.009>
13. Howard K. W., Hanor J.S. Compositional zoning in the Fancy Hill stratiform barite deposit, Ouachita Mountains, Arkansas, and evidence for the lack of associated massive sulfides (USA). *Economic Geology*. 1987;82(5):1377–1385. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.5.1377>
14. Koski R.A., Hein J.R. Stratiform barite deposits in the Roberts Mountains allochthon, Nevada: a review of potential analogs in modern sea-floor environments. *Chapter H of Contributions to industrial-minerals research. United States Geological Survey Bulletin*. 2003;2209-H.
15. Wang F.-L., Huang Y., Fu Y. et al. A study of the enrichment mechanism of early Cambrian barite in Eastern Guizhou: Constraint from sulfur isotope. *Acta Geoscientica Sinica*. 2020;41(5):686–698. <https://doi.org/10.3975/cagsb.2020.081701> (In Chinese)
16. Zhou X., Li R., Tang D., Huang K.-J. et al. Cold seep activity in the early Cambrian: Evidence from the world-class shale-hosted Tianzhu barite deposit, South China. *Sedimentary Geology*. 2022;439:106220. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2022.106220>
17. Li Y., Zou H., Said N., Liu H. A new classification of barite deposits in China. *Ore and Energy Resource Geology*. 2023;14(3). <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2023.100019>
18. George B.G., Shalini N., Pandian M.S. et al. Strontium and Sulphur isotopic constraints on the formation of the Mangampeta barite deposit, Cuddapah basin. *Current Science*. 2013;105(4):499–504.
19. Rajlich P., Legierski J., Šmejkal V. Stable isotope study of base metal deposits from the Eastern High Atlas, Morocco. *Mineralium Deposita*. 1983;18(2):161–171. <https://doi.org/10.1007/BF00206206>
20. Jaillard L. The barite massive orebody at Tarhwacht, Western High Atlas, Morocco, hosted by an albitite of sedimentary origin. *Comptes Rendus – Academie des Sciences, Serie II*. 1987;304(14):847–853.
21. Jébrak M., el Wartiti M., Marcoux E., Zaharoui M. The Bouznika Cambrian barite deposit (Morocco), an early mineralization on the Iapetus margin. *Journal of African Earth Sciences*. 2011;60(3):53–62. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2011.02.001>
22. Ibrahim D., Ahmed B., Habiba A. et al. Contribution of geophysics to the study of barite mineralization in the paleozoic formations of Asdaf Tinejdad (Eastern Anti Atlas Morocco). *Economic and Environmental Geology*. 2020;53(3):259–269. <https://doi.org/10.9719/EEG.2020.53.3.259>
23. González-Sánchez F., González-Partida E., Canet C. et al. Geological setting and genesis of stratabound barite deposits at Múzquiz, Coahuila in northeastern Mexico. *Ore Geology Reviews*. 2017;81(3):1184–1192. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.10.008>
24. Elmas N., Kumral M., Suner F., Tasdelen S. Stratiform barite deposits hosted in metamorphic assemblages of Dinek and surrounding regions, Isparta, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2012;48(4):150–159. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.11.013>
25. Kekeliya S.A., Tvalchrelidze A.G., Yaroshevich V.Z. The geological and physicochemical conditions of formation of massive-sulfide-barite-base-metal deposits. *International Geology Review*. 1984;26(12):1437–1444. <https://doi.org/10.1080/00206818409466664>



26. Large D., Walcher E. The Rammelsberg massive sulphide Cu-Zn-Pb-Ba-Deposit, Germany: an example of sediment-hosted, massive sulphide mineralization. *Mineralium Deposita*. 1999;34(5/6):522–538. <https://doi.org/10.1007/s001260050218>
27. Tolmacheva T., Ryazantsev A., Degtyarev K., Nikitina O. Hydrothermal barite deposits in Upper Cambrian-Lower Ordovician siliceous successions of southern Kazakhstan. *Doklady Earth Sciences*. 2014;458(1):1077–1081. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14090347>
28. Jamali H., Zohouri F.S., Tabatabaei Manesh S.M. Exhalative deposits in eocene volcano-sedimentary rocks in the middle part of the Urumieh-Dokhtar magmatic belt: Detailed evidence from Nabar deposit, west of Kashan, Urumieh – Dokhtar Magmatic Belt. *Journal of African Earth Sciences*. 2019;154(5):120–135. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.03.011>
29. Derakhshi M.G., Mohammad R.H., Moayyed M., Maghfouri S. Metallogenesis of Precambrian SEDEX-type Barite-(Pb-Cu-Zn) deposits in the Mishu mountain, NW Iran: Constrains on the geochemistry and tectonic evolution of mineralization. *Ore Geology Reviews*. 2019;107:310–335. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.024>
30. Ma Z., Ravelo A.C., Liu Z. et al. Export production fluctuations in the eastern equatorial Pacific during the Pliocene-Pleistocene: Reconstruction using barite accumulation rates. *Paleoceanography*. 2015;30(11):1455–1469. <https://doi.org/10.1002/2015PA002860>
31. Moles N.R. *Geology, geochemistry and petrology of the Foss stratiform barite-base metal deposit and adjacent Dalradian metasediments, near Aberfeldy, Scotland*. [Dissertation.] University of Edinburgh; 1985. URL: <http://hdl.handle.net/1842/11180>
32. Baranov B., Aloisi V., Degrachev A. Giant barite deposit mapped and the Derugin Basin (Okhotsk Sea). In: *Minerals of the Ocean – integrated strategies – 2*. 25–30 April, 2004. Saint Petersburg, Russia.
33. Астахов А.С., Ивин В.В., Карнаух В.Н., и др. Современные геологические процессы и условия формирования баритовой залежи в котловине Дерюгина Охотского моря. *Геология и геофизика*. 2017;58(2):200–214. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.01.002>
34. Андреев С.И., Казакова В.Е., Иванова А.М., Смирнов А.Н. Геология и полезные ископаемые дальневосточных морей России. В: *70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане*. Сборник научных трудов. СПб: ВНИИ геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга; 2018. С. 444–454.
35. Gwiazda P.X., Paull C.K., Caress D., Preston C.M., Johnson's S.B., Lundsten E.M., Anderson K. The Extent of Fault-Associated Modern Authigenic Barite Deposits Offshore Northern Baja California Revealed by High-Resolution Mapping. *Frontiers in Marine Science*. 2019;6:460. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00460>
36. Gonzalez-Muñoz M.T., Martinez-Ruiz F., Morcillo F., et al. Precipitation of barite by marine bacteria: A possible mechanism for marine barite formation. *Geology*. 2012;40(8):675–678. <https://doi.org/10.1130/G33006.1>

References

1. Bearden S.D. Barite: World sources and the US market. *Mining Engineering*. 1997;49(11):87–88.
2. Bonel K.A. *Mineral profile: Barites*. British Geological Survey; 2005. 28 p.
3. Boyarko G. Yu., Khatkov V. Yu. Current state of production and consumption of barite raw materials in Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(10):180–191. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3403>
4. Schulz K.J., DeYoung J.H., Seal R.R., Bradley D.C. (eds.) *Critical mineral resources of the United States – economic and environmental geology and prospects for future supply*. United States Geological Survey; 2017. 862 p. <https://doi.org/10.3133/pp1802>
5. Chen J.B., Huo W.M., Feng D.D. Analysis of strategic (critical) mineral resources situation in China and the U.S. and the EU. *Natural Resources. Economy of China*. 2020;33(8):9–17. (In Chinese)
6. Jiang Y., Wang T., Long T. Research on listing barite as a strategic mineral resource. *Acta Geoscientica Sinica*. 2021;42(2):297–302. (In Chinese) <https://doi.org/10.3975/cagsb.2020.110204>
7. Eremin N.I. Critical metals. *Geologiya Rudnyh Mestorozhdenij*. 2016;58(6):595–596. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0016777016060034>
8. Khatkov V.Y. Trade flows of import-dependent mineral products. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2017;(5):66–71. (In Russ.)
9. Singh R.K., Kumar A., Garza-Reyes J.A., de S'a M.M. Managing operations for circular economy in the mining sector: An analysis of barriers intensity. *Resources Policy*. 2020;69(4):101752. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101752>
10. Kasymov M.A. Formation types of barite deposits. *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*. 2014;(33):108–112. (In Russ.)
11. Akhmanov G.G., Vasiliev N.G. *Mineral raw materials. Barite*. Handbook. Moscow: Geoinformmark; 1997. 39 p. (In Russ.)



12. Clark S.H.B., Poole F.G., Wang Z. Comparison of some sediment-hosted, stratiform barite deposits in China, the United States, and India. *Ore Geology Reviews*. 2004;24(1–2):85–101. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.009>
13. Howard K.W., Hanor J.S. Compositional zoning in the Fancy Hill stratiform barite deposit, Ouachita Mountains, Arkansas, and evidence for the lack of associated massive sulfides (USA). *Economic Geology*. 1987;82(5):1377–1385. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.82.5.1377>
14. Koski R.A., Hein J.R. Stratiform barite deposits in the Roberts Mountains allochthon, Nevada: a review of potential analogs in modern sea-floor environments. *Chapter H of Contributions to industrial-minerals research. United States Geological Survey Bulletin*. 2003;2209-H.
15. Wang F.-L., Huang Y., Fu Y. et al. A study of the enrichment mechanism of early Cambrian barite in Eastern Guizhou: Constraint from sulfur isotope. *Acta Geoscientica Sinica*. 2020;41(5):686–698. <https://doi.org/10.3975/cagsb.2020.081701> (In Chinese)
16. Zhou X., Li R., Tang D., Huang K.-J. et al. Cold seep activity in the early Cambrian: Evidence from the world-class shale-hosted Tianzhu barite deposit, South China. *Sedimentary Geology*. 2022;439:106220. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2022.106220>
17. Li Y., Zou H., Said N., Liu H. A new classification of barite deposits in China. *Ore and Energy Resource Geology*. 2023;14(3). <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2023.100019>
18. George B.G., Shalini N., Pandian M.S. et al. Strontium and Sulphur isotopic constraints on the formation of the Mangampeta barite deposit, Cuddapah basin. *Current Science*. 2013;105(4):499–504.
19. Rajlich P., Legierski J., Šmejkal V. Stable isotope study of base metal deposits from the Eastern High Atlas, Morocco. *Mineralium Deposita*. 1983;18(2):161–171. <https://doi.org/10.1007/BF00206206>
20. Jaillard L. The barite massive orebody at Tarhwacht, Western High Atlas, Morocco, hosted by an albitite of sedimentary origin. *Comptes Rendus – Academie des Sciences, Serie II*. 1987;304(14):847–853.
21. Jébrak M., el Wartiti M., Marcoux E., Zaharoui M. The Bouznika Cambrian barite deposit (Morocco), an early mineralization on the Iapetus margin. *Journal of African Earth Sciences*. 2011;60(3):53–62. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2011.02.001>
22. Ibrahim D., Ahmed B., Habiba A. et al. Contribution of geophysics to the study of barite mineralization in the paleozoic formations of Asdaf Tinejdad (Eastern Anti Atlas Morocco). *Economic and Environmental Geology*. 2020;53(3):259–269. <https://doi.org/10.9719/EEG.2020.53.3.259>
23. González-Sánchez F., González-Partida E., Canet C. et al. Geological setting and genesis of stratabound barite deposits at Múzquiz, Coahuila in northeastern Mexico. *Ore Geology Reviews*. 2017;81(3):1184–1192. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.10.008>
24. Elmas N., Kumral M., Suner F., Tasdelen S. Stratiform barite deposits hosted in metamorphic assemblages of Dinek and surrounding regions, Isparta, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2012;48(4):150–159. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.11.013>
25. Kekeliya S.A., Tvalchrelidze A.G., Yaroshevich V.Z. The geological and physicochemical conditions of formation of massive-sulfide-barite-base-metal deposits. *International Geology Review*. 1984;26(12):1437–1444. <https://doi.org/10.1080/00206818409466664>
26. Large D., Walcher E. The Rammelsberg massive sulphide Cu-Zn-Pb-Ba-Deposit, Germany: an example of sediment-hosted, massive sulphide mineralization. *Mineralium Deposita*. 1999;34(5/6):522–538. <https://doi.org/10.1007/s001260050218>
27. Tolmacheva T., Ryazantsev A., Degtyarev K., Nikitina O. Hydrothermal barite deposits in Upper Cambrian-Lower Ordovician siliceous successions of southern Kazakhstan. *Doklady Earth Sciences*. 2014;458(1):1077–1081. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14090347>
28. Jamali H., Zohouri F.S., Tabatabaei Manesh S.M. Exhalative deposits in eocene volcano-sedimentary rocks in the middle part of the Urumieh-Dokhtar magmatic belt: Detailed evidence from Nabar deposit, west of Kashan, Urumieh – Dokhtar Magmatic Belt. *Journal of African Earth Sciences*. 2019;154(5):120–135. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.03.011>
29. Derakhshi M.G., Mohammad R.H., Moayyed M., Maghfouri S. Metallogenesis of Precambrian SEDEX-type Barite-(Pb-Cu-Zn) deposits in the Mishu mountain, NW Iran: Constrains on the geochemistry and tectonic evolution of mineralization. *Ore Geology Reviews*. 2019;107:310–335. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.024>
30. Ma Z., Ravelo A.C., Liu Z. et al. Export production fluctuations in the eastern equatorial Pacific during the Pliocene-Pleistocene: Reconstruction using barite accumulation rates. *Paleoceanography*. 2015;30(11):1455–1469. <https://doi.org/10.1002/2015PA002860>
31. Moles N.R. *Geology, geochemistry and petrology of the Foss stratiform barite-base metal deposit and adjacent Dalradian metasediments, near Aberfeldy, Scotland*. [Dissertation.] University of Edinburgh; 1985. URL: <http://hdl.handle.net/1842/11180>
32. Baranov B., Aloisi V., Degrachev A. Giant barite deposit mapped and the Derugin Basin (Okhotsk Sea). In: *Minerals of the Ocean – integrated strategies – 2*. 25–30 April, 2004. Saint Petersburg, Russia.



33. Astakhov A.S., Ivin V.V., Karnaukh V.N., et al. Barite mineralization in the Deryugin Basin of the Okhotsk Sea: Active processes and formation conditions. *Russian Geology and Geophysics*. 2017;58(2):200–214. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.01.002>

34. Andreev S.I., Kazakova V.E., Ivanova A.M., Smirnov A.N. Geology and minerals of the Far Eastern seas of Russia. In: *70 years in the Arctic, Antarctic and oceans. Collection of scientific papers*. St. Petersburg: All-Russian Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean named after Academician I.S. Gramberg; 2018. Pp. 444–454.

35. Gwiazda P.X., Paull C.K., Caress D., Preston C.M., Johnson's S.B., Lundsten E.M., Anderson K. The Extent of Fault-Associated Modern Authigenic Barite Deposits Offshore Northern Baja California Revealed by High-Resolution Mapping. *Frontiers in Marine Science*. 2019;6:460. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00460>

36. Gonzalez-Muñoz M.T., Martinez-Ruiz F., Morcillo F., et al. Precipitation of barite by marine bacteria: A possible mechanism for marine barite formation. *Geology*. 2012;40(8):675–678. <https://doi.org/10.1130/G33006.1>

Информация об авторах

Григорий Юрьевич Боярко – доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-0715-7807](https://orcid.org/0000-0002-0715-7807), Scopus ID [56350674500](https://scopus.com/authorid/56350674500); e-mail gub@tpu.ru

Людмила Михайловна Болсуновская – кандидат филологических наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-1499-8970](https://orcid.org/0000-0002-1499-8970), Scopus ID [56350747600](https://scopus.com/authorid/56350747600); e-mail bolsunovskl@tpu.ru

Information about the authors

Grigory Yu. Boyarko – Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Geol. and Min.), Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-0715-7807](https://orcid.org/0000-0002-0715-7807), Scopus ID [56350674500](https://scopus.com/authorid/56350674500); e-mail gub@tpu.ru

Liudmila M. Bolsunovskaya – Cand. Sci. (Philolog.), Assistant Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-1499-8970](https://orcid.org/0000-0002-1499-8970), Scopus ID [56350747600](https://scopus.com/authorid/56350747600); e-mail bolsunovskl@tpu.ru

Поступила в редакцию 24.02.2023
Поступила после рецензирования 20.03.2022
Принята к публикации 21.03.2022

Received 24.02.2023
Revised 20.03.2022
Accepted 21.03.2022



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-165>

УДК 556.3

**Анализ и оценка перспективных участков высококачественного кварцевого сырья на территории Северного Кавказа**И. И. Босиков¹  , Р. В. Ключев²   , В. Ч. Ревазов¹  , Н. В. Мартюшев³  ¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Российская Федерация² Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация³ Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова Российской академии наук, г. Грозный, Российская Федерация kluev-roman@rambler.ru**Аннотация**

Кварцевое сырье является стратегическим ресурсом, так как обеспечивает развитие важнейших отраслей экономики. При этом необходимо учитывать, что при его добыче и переработке следует применять высокотехнологичные методы, позволяющие получить в результате обогащения этого сырья химически чистый кремний. На сегодняшний день потребность в кремнии составляет 5–6 тыс. т в год при предложении 2300 т. Анализ особенностей химизма ряда горных пород (кварцитов, кварцевых песков, жильного кварца) Республики Северная Осетия – Алания показал, что они по своим параметрическим характеристикам могут отвечать требованиям, предъявляемым к кварцевому сырью для получения кремниевой продукции. К настоящему времени учёные Северной Осетии также имеют успешный опыт выращивания монокристаллического кремния и изготовления фотоэлектрических преобразователей. Российские учёные провели первые плавки металлургического кремния в поликристаллический в вакуумных печах способом электронно-лучевого переплава. Во всех случаях результаты обнадеживающие.

Цель, задачи: провести анализ и оценку перспективных участков высококачественного кварцевого сырья на территории Северного Кавказа. Основной задачей исследований является выявление объектов высококачественного кварцевого сырья для производства кремниевой продукции, локализация, оценка их прогнозных ресурсов и выделение участков для дальнейшего изучения. Выявленные объекты должны иметь благоприятные географо-экономические положение и горнотехнические условия, способствующие возможности их открытой (карьерной) отработки.

Объекты: Фиагдонский участок Алагирского района, РСО-Алания.

Методы: Проведение лабораторных работ, опробования, исследование построенных разрезов, изучение документации горных выработок и скважин, заключений минералого-петрографических, лабораторных исследований и технологических испытаний.

Результаты. После выполнения намеченного комплекса исследовательских работ проведен анализ статистической, экономической, геологической, технологической и другой информации, необходимой для решения основных геологических задач; выделены перспективные участки для дальнейших работ; уточнены геологические карты перспективных участков масштаба 1 : 10000 с легендами и разрезами к ним; определены условия залегания, морфология и параметры продуктивных залежей; предварительно изучены качество и технологические характеристики кварцевого сырья; локализованы, оценены и апробированы прогнозны ресурсы высококачественного кварцевого сырья для производства кремниевой продукции по категории P_2 – 500 тыс. т; разработаны рекомендации для проведения геологоразведочных работ.

Ключевые слова

кварцевое сырье, кремний, перспективные участки, минералого-петрографический анализ, технологические испытания, продуктивные залежи, качество и технологические характеристики кварцевого сырья

Для цитирования

Bosikov I. I., Klyuev R. V., Revazov V. Ch., Martiyushev N. V. Analysis and evaluation of prospects for high-quality quartz resources in the North Caucasus. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):278–289. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-165>



GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

Analysis and evaluation of prospects for high-quality quartz resources in the North CaucasusI. I. Bosikov¹  , R. V. Klyuev²   , V. Ch. Revazov¹  , N. V. Martyushev³  ¹North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation³Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russian Federation kluev-roman@rambler.ru**Abstract**

Quartz resources play a crucial role in the development of key economic sectors, particularly in the production of chemically pure silicon. The extraction and processing of these resources necessitate high-tech methods to obtain the desired silicon output. Presently, the demand for silicon stands at 5–6 Ktpa, while the supply remains at 2300 t. An analysis of the chemical properties of various rocks (quartzites, quartz sands, vein quartz) in the Republic of North Ossetia–Alania reveals that their parametric characteristics align with the requirements for silicon production. The researchers in North Ossetia have successfully grown single-crystal silicon and produced photovoltaic converters. Russian scientists have also achieved the first melting of metallurgical silicon into polycrystalline silicon using vacuum furnaces and electron-beam remelting, yielding promising results. The goal of this research is to analyze and assess the potential of high-quality quartz resources in the North Caucasus. The main objectives include identifying sites with optimal quartz deposits suitable for silicon production, conducting localization, estimating forecast resources, and designating areas for further investigation. The selected sites are expected to possess advantageous geographical and economic features, along with favorable mining conditions conducive to open-pit mining. The study focuses on the Fiagdon site in the Alagir District, RNO-Alania. Various methods, including laboratory work, sampling, examination of constructed sections, and a comprehensive review of mine workings and borehole documentation, were employed. Conclusions from mineralogical and petrographic analyses, alongside laboratory studies and process tests, contributed to the research methodology. The results of the research encompassed the analysis of statistical, economic, geological, and process-related information necessary for addressing primary geological objectives. Subsequent steps involved the selection of prospects for further exploration, specification of geological maps at a 1:10000 scale with accompanying legends and sections, determination of the conditions, morphology, and parameters of productive deposits, and preliminary studies on the quality and process characteristics of quartz resources. Furthermore, the P₂ forecast resources of high-quality quartz raw materials for silicon production were localized, estimated at 500 Kt, and rigorously tested. The study's discoveries have led to the formulation of recommendations for future exploration endeavors.

Keywords

quartz resources, silicon, prospects, mineralogical and petrographic analysis, process tests, productive deposits, quality and process characteristics of quartz resources

For citation

Bosikov I. I., Klyuev R. V., Revazov V. Ch., Martyushev N. V. Analysis and evaluation of prospects for high-quality quartz resources in the North Caucasus. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):278–289. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-165>

Введение

Кварцевое сырье является стратегическим ресурсом, так как обеспечивает развитие важнейших отраслей экономики. Для получения высококачественного кремния необходимо разработать эффективные технологии обогащения кварцевого сырья [1, 2].

На сегодняшний день потребность в кремнии составляет 5–6 тыс. т в год при предложении 2300 т. Российские учёные провели первые плавки металлургического кремния в поликристаллический в вакуумных печах способом электронно-лучевого переплава [3, 4]. Во всех случаях результаты обнадеживающие.

С целью овладения приоритетными позициями в добыче, производстве и сбыте продукции из особо чистого кварцевого сырья в России (Восточная Сибирь – проект «Солнечный кремний», Урал – проект «Кремний–Урал», «Полярный кварц» и др.) на базе известных месторождений создаются предприятия по глубокой переработке кварцевого сырья [5, 6]. Большинство месторождений кварцевого сырья располагается на Урале или Сибири [7, 8].

Анализ особенностей химизма ряда горных пород (кварцитов, кварцевых песков, жильного кварца) участков Северного Кавказа [9, 10] показал, что они



по своим параметрическим характеристикам могут отвечать требованиям, предъявляемым к кварцевому сырью для получения кремниевой продукции.

К настоящему времени учёные РСО-Алания [11, 12] также имеют успешный опыт выращивания монокристаллического кремния и изготовления фотоэлектрических преобразователей.

В структуре кварца установлены Al, Fe, Ti, H, Li, Na, K, Cr, B, P, Ca, Mg, Co и другие элементы-примеси, прямо влияющие на качество сырья.

Исследования пяти проб жильного кварца, отобранных в 2019 г. ООО НИП СКГМИ (ГТУ) «Стройкомплект-Инновации» на Водораздельном проявлении, выполненные в лаборатории Ростехнологии методами атомной абсорбции – в пламени и эмиссионной – в плазме, показали, что примеси элементов в пробах относительно легко удалимы, а кварцевое сырьё соответствует ГОСТ 41-07-014–86 (табл. 1).

Для оценки пригодности кварцевых пород, развитых на территории Северной Осетии, и выбора участков для проведения исследовательских работ, определения их ресурсного потенциала проведён предварительный анализ имеющихся материалов. Выбор участков основывался на следующих положениях:

– исследуемые породы должны являться однородными и находиться в благоприятных географо-экономических условиях; их отработка не должна быть связана со значительными материальными затратами по подготовке инфраструктуры и дорожной сети [13, 14];

– потенциальные объекты должны обладать необходимыми запасами и иметь возможность их отработки открытым способом [15, 16].

Исходя из указанных положений в качестве наиболее перспективных намечаются четыре площади: Наро-Мамисонская; Фиагдонская; Джимаринская и Фиагдон-Камбилеевская.

Район исследований перспективных кварцевых зон охватывает центральную, преимущественно восточную часть Горной Осетии, в пределах междуречья р. Ардон-Камбилеевка, расположенных в Алагирском районе Северной Осетии.

Район работ ограничен на западе долиной р. Ардон, на востоке бассейном р. Камбилеевка. Северная граница проходит по параллели 43°00'; южная – по широте истока р. Заккадон. Приуроченность площа-

ди работ к области Центрального Кавказа определяет его сильно расчлененный рельеф. Основными водными артериями являются р. Терек, Ардон, Фиагдон, Гизельдон, Камбилеевка и их многочисленные притоки. Гидрологический режим всех водотоков района носит отчетливо выраженный сезонный характер.

В пределах вышеуказанного района расположены четыре площади постановки проектируемых поисковых работ: Наро-Мамисонская, Фиагдонская, Джимаринская и Фиагдон-Камбилеевская. Географо-экономическое положение площадей неравнозначно.

Наро-Мамисонская площадь расположена в верховье р. Ардон и её притоков (Заккадон, Зругдон, Варцедон, Мамисондон). По результатам обобщения фондовых материалов здесь выделяются три участка: Варце, Зруг и Байком. Участок Варце находится в 0,4 км к югу от с. Варце и в 2,0 км к юго-западу от с. Нар; участок Зруг расположен в 1,5 км к югу, юго-западу от с. Нар в низовьях Зругского ущелья; участок Байком приурочен к левому борту долины р. Заккадон и расположен в 3 км к северо-востоку от с. Кесатикау.

Наро-Мамисонская площадь занимает высокогорную область Главного Кавказского хребта.

Рельеф типично высокогорный, с резко расчленённой поверхностью, углами склонов до 30° в северной части и скальными пильчатými гребнями и крутыми обрывистыми (60° и более) склонами в южной части. Абсолютные высотные отметки – 1700–3200 м, относительные превышения – 1500 м.

Речная сеть разветвлена. Основной водной артерией являются р. Мамисондон, Нардон, Заккадон и Зругдон. Сливаясь, воды р. Мамисондон и Нардон образуют р. Ардон. Гидрологический режим рек соответствует климатическим условиям площади – с зимней меженью (1,5–3,0 м³/с – расход воды в р. Мамисондон и Нардон) и летними паводками (6,0–8,0 м³/с). В летнее время основным источником питания рек являются талые ледниковые и дождевые воды, в зимнее время – грунтовые и снеговые воды.

Климат резко континентальный, с существенным колебанием суточных температур. Зима холодная, лето прохладное, влажное. Климат долин субмеридиональной и субширотной ориентировки отличаются друг от друга. Климат долин субширотной ориентировки (Мамисондон, Заккадон, Нардон) мягче, так как влияние

Таблица 1

Содержание элементов-примесей в кварце проявления Водораздельное

№ п/п	№ проб	Содержание элементов в $n \cdot 10^{-4}$ %, ppm														
		B	P	Na	K	Li	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Ni	Cr	Co	Al	Ti
1	КЖ-1	–	–	23	40	10	5	2	5	0,3	10	1,5	0,5	1,5	15	1
2	КЖ-2	–	–	23	20	10	7	3	10	0,7	10	2	0,5	2	20	2
3	КЖ-3	–	–	35	40	15	10	10	30	1	10	3	1	3	30	6
4	№1	0,625	< 0,16	46,07	16,12	1,629	25,6	0,24	0,149	< 0,02	0,055	0,099	< 0,02	< 0,06	10,2	0,134
5	№2	0,295	0,2	22,62	5,656	0,68	169,1	2,547	0,521	< 0,02	0,214	0,049	< 0,02	< 0,06	13,24	0,124
Сумма		0,92	0,28	149,69	121,78	37,31	216,7	17,79	45,67	2,02	30,27	6,65	2,02	6,56	88,44	9,26
Среднее		0,46	0,14	29,94	24,36	7,46	43,34	3,56	9,13	0,40	6,05	1,33	0,40	1,31	17,69	1,85

сильных холодных ветров меридиональной ориентировки почти не ощущается. Среднегодовая температура $+4,6^{\circ}\text{C}$, средняя температура января $-5,7^{\circ}\text{C}$, июля $+14,7^{\circ}\text{C}$, годовое количество осадков – 650 мм. В долинах же субмеридиональной ориентировки (Зругдон) очень часты сильные холодные горно-долинные ветры, способствующие понижению температуры воздуха. Среднегодовая температура $+3,8^{\circ}\text{C}$, средняя температура января $-6,4^{\circ}\text{C}$, июля $+13,8^{\circ}\text{C}$. Абсолютный температурный максимум $+28^{\circ}\text{C}$, минимум -30°C . Годовое количество осадков – 900 мм.

Неодинакова и обнаженность: на склонах северной экспозиции она составляет 40–45 %, южной – 50–65 %.

Растительность представлена флорой альпийских и субальпийских лугов, которые служат пастбищами для выпаса скота. На северных склонах изредка встречается низкорослый лес и кустарник. Ценные виды пород древесины отсутствуют.

Животный мир довольно разнообразен. В зоне альпийских лугов встречаются тур, серна, рысь; в субальпийской зоне – волк, медведь, лиса, заяц и др. Непосредственно на участках проведения работ заповедных и охранных территорий нет.

В экономическом отношении Наро-Мамисонская площадь достаточно освоена. Через её территорию проложены две крупные автомагистрали – Военно-Осетинская дорога и Транскавказская автомагистраль. Ко всем жилым селениям подходят асфальтированные дороги, с которыми участки работ связаны грунтовыми дорогами, вьючными и пешеходными тропами. Ранее Наро-Мамисонский район был объектом геологоразведочных работ по поиску руты.

Ближайший населенный пункт – с. Нар – расположен в 1,5–2,0 км от участков Варце и Зруг; удаленность участка Байком значительно больше – 17 км. Расстояние до г. Владикавказа и Алагира, где имеются железнодорожные станции, составляет 92 и 52 км. Непосредственно через участки работ ЛЭП не проходят, но через с. Нар в Республику Южную Осетию проходит ЛЭП мощностью 110 кВт.

Ресурсы технического и бытового водоснабжения не ограничены – площадь изобилует многочисленными выходами пресных и минеральных вод. Рабочие горных профессий имеются в достаточном количестве. Сейсмичность площади в соответствии со СНиП-II-7-81 составляет 9 баллов.

Фиэгдонская площадь занимает истоки и верхнее течение р. Фиэгдон (рис. 1). По результатам предварительного обобщения материалов здесь выделяются три участка: Арсиком, Бугульта и Водораздельный. Первые два приурочены к правому и левому бортам долины р. Бугультадон соответственно, а Водораздельный – к левому борту долины р. Дзамарашдон. Долины обеих рек пространственно сближены и удалены не более чем на 3 км.

Фиэгдонская площадь занимает высокогорную область Бокового хребта. Рельеф типично высокогорный, абсолютные отметки колеблются в пределах 2000–2750 м.

Основная речная сеть представлена р. Дзамарашдон и Бугультадон, образующими при слиянии р. Фиэгдон. Абсолютные отметки врезов этих рек колеблются в пределах 1900–2500 м, а высоты разделяющего их водораздела – 2500–4000 м.



Рис. 1. Космоснимок Восточного фланга Фиэгдонской площади:

1 – Льядонская кварцевая зона; 2 – Даргшудонское кварцевое проявление; 3 – Дзагалымское кварцевое проявление



Режим стока рек и многочисленных ручьев-притоков определяется их положением в рельефе, а также климатическими условиями – зимней меженью и летними паводками.

Климат континентальный, высокогорный, с холодной зимой и прохладным, влажным летом. В долинах среднегодовая температура +4 °С, средняя температура января –7 °С; июля +14,5 °С, абсолютный минимум –26 °С, максимум +28 °С, годовое количество осадков от 600 до 900 мм.

Отчетливо выражена вертикальная климатическая зональность.

Растительность в основном горно-луговая; на высотах до 2100–2200 м на склонах западной и северной экспозиции встречаются кустарник и мелколесье.

Животный мир изобилует разнообразием видов. На альпийском высокогорье можно встретить тура, серну, рысь. Гипсометрически ниже отметки 2500 м обитают медведь, волк, заяц, барсук, козуля. Западный контур площади пространственно ограничен восточной границей охранной зоны Северо-Осетинского государственного заповедника.

В экономическом отношении Фиагдонская площадь менее освоена в сравнении с Наро-Мамисонской. Ближайший населенный пункт – с. Харисджин, с которым участок связан грунтовой дорогой протяженностью 12 км. В 4 км к северу от села находится пос. Верхний Фиагдон. Расстояние от с. Харисджин до г. Владикавказа и Алагир, где имеются железнодорожные станции, составляет по 65 км и приходится на дороги с асфальтированным покрытием. По территории площади проходит высоковольтная ЛЭП (110 кВт), которая в настоящее время обесточена.

Ресурсы технического и бытового водоснабжения не ограничены. Рабочие горных профессий имеются в достаточном количестве.

Сейсмичность площади составляет 9 баллов.

Джимаринская площадь занимает верховье р. Мидаграбындон. Предварительное обобщение фондовых материалов позволило выделить здесь два участка: Мидаграбын и Штырдон (рис. 2), расположенные соответственно на левом и правом бортах долины р. Мидаграбындон. Пространственно оба участка приближены друг к другу; расстояние между ними 1,4 км.

Джимаринская площадь, как и Фиагдонская, занимает высокогорную область Бокового хребта с резко расчлененным рельефом, типичным для его северного склона. Глубокие ущелья, острые гребни, крутые скалы (40–60°), значительные абсолютные (2000–3000 м) и относительные (1000–1300 м) превышения осложняют проведение геологических исследований с поверхности. Наиболее высокие отметки – Шаухох (4636 м), Дончента (4318 м), Хайкаланхох (4242 м). К этим вершинам приурочены области питания трех ледников: Ларци-цити, Мидаграбын, Хрустальный.

Основная речная сеть представлена водами р. Мидаграбындон, являющейся левым притоком р. Гизельдон. Мидаграбындон – это типичная горная река с ледниковым питанием, неустойчивым уровнем и дебитом, частыми летними паводками, порожистым и крутым стоком. Расход воды в ней резко коле-

блется – с зимней меженью (4–5 л/с) и летними паводками и половодьем (20–25 л/с). В летнее время за счет таяния снега и льда, интенсивных ливневых дождей воды р. Мидаграбындон мутные, со значительным количеством взвешенных частиц.

Климат типично высокогорный, со сравнительно низкой среднегодовой температурой (+3,5 °С), большим количеством осадков – 1000–1100 мм, не очень холодной зимой (–6,5 °С), затяжной холодной весной (+2,4 °С), прохладным летом (+13,5 °С) и солнечной осенью (+4,0 °С). Заморозки начинаются в конце сентября, а заканчиваются в середине мая.

Растительность в основном горно-луговая, представленная формациями альпийского и субальпийского поясов: разнотравье, манжеток-кавказский, шелковый, тмин-кавказский, рододендрон. Древесная растительность представлена единичными низкорослыми березовыми кустарниками.

Животный мир довольно разнообразен. На альпийских высотах можно встретить тура, серну, рысь. В субальпийском поясе водятся медведь, волк, лиса, барсук, козуля, заяц. Заповедные зоны на Джимаринской площади отсутствуют.

В экономическом отношении Джимаринская площадь наименее освоена, по сравнению с другими площадями. Ближайший населенный пункт – с. Джимара – находится в 6,5 км и связан с ней грунтовой дорогой, выучными и пешеходными тропами. Расстояние от с. Джимара до г. Владикавказа 48 км, 45 км из которых приходится на автомобильные дороги с асфальтированным покрытием. К с. Джимара подходит ЛЭП мощность 6 кВт.

Ресурсы технического и бытового водоснабжения в районе не ограничены. Рабочие горных профессий имеются в с. Джимара, Фазикау, Даргавс и др.

Сейсмичность района составляет 9 баллов.

Фиагдон-Камбилеевская площадь расположена между долинами р. Фиагдон на западе и Камбилеевка на востоке, занимая их среднее течение. Обобщение фондовых материалов позволило выделить здесь

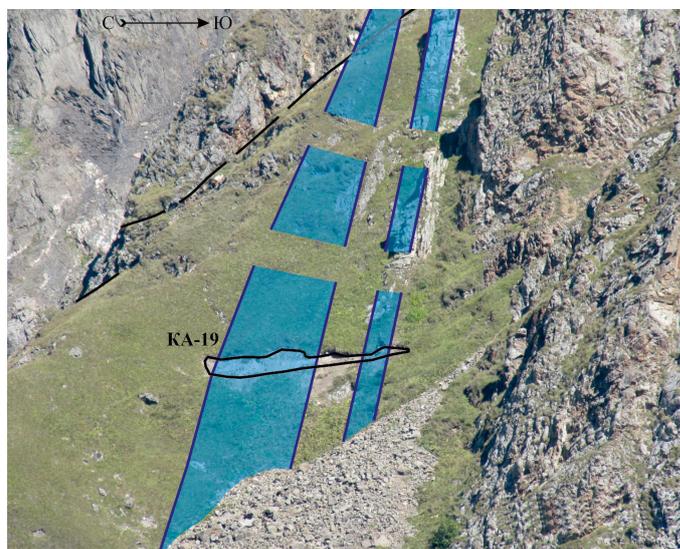


Рис. 2. Участок Мидаграбын, зоны окварцевания (КА-19 – канава)

шесть участков: Фиагдонский (рис. 3), Мыгваре-Барзонд и Кодахджинский расположены на западе площади – в долине р. Фиагдон; участки Тарский II, Медвежегайский и Камбилеевский – на востоке, в долине р. Камбилеевка. Пространственно западные три участка удалены от восточных на расстояние 25–30 км.

Данная площадь занимает низкогорную зону Горной Осетии и расположена на южном склоне Лесистого хребта.

Рельеф типично низкогорный, имеет пологие склоны (до 30°) и сглаженные вершины, рассечен поперечными долинами рек. Абсолютные отметки колеблются в пределах 1000–1300 м. Поверхность всех участков покрыта лесом.

Речная сеть представлена р. Фиагдон и Камбилеевка и их притоками. Режим стока рек определяется климатическими условиями – с зимней меженью и летними паводками.

Снежный покров неустойчив, держится с декабря по февраль. Ветры периодические, зимой – северные, северо-восточные, летом – южные, юго-западные. Условия для образования лавин, селей, оползней отсутствуют.

Растительность представлена флорой широколиственных формаций: бук, граб, клён, ясень, липа, дуб. Почвы горные, бурые лесные, маломощные (до 20 см), сельскохозяйственной ценности не имеют. Повсеместно можно встретить дикую грушу, яблоню, алычу; из кустарников – малину, кизил, лещину, ежевику и др.

Животный мир разнообразен. Встречаются бурый медведь, лесной кот, рысь, соня, куница, благородный олень, зубр и др.; из птиц – чиж, снегирь, клеста, дятел и др.

В экономическом отношении площадь достаточно освоена. Расстояние от западных участков до с. Майрамадаг, Кодахджин, Дзуарикау составляет 3–5 км, от восточных участков до с. Тарское – 1,0–3,2 км. Ближайшая железнодорожная станция – Владикавказ – расположена в 20 и 16 км соответственно. Непосредственно на участках работ ЛЭП отсутствует, однако расположенные вблизи села в достаточной степени обеспечены электроэнергией.

Сейсмичность площади составляет 8 баллов.

Постановка задач

Основными задачами исследований являются выявление объектов высококачественного кварцевого сырья для производства кремниевой продукции, их локализация, оценка прогнозных ресурсов и выделение участков для дальнейшего изучения.

Выявленные объекты должны иметь благоприятные географо-экономическое положение и горнотехнические условия, способствующие возможности их открытой (карьерной) отработки [17].

Для выполнения исследований необходимо решить следующие основные задачи:

- выделить перспективные участки для научно-исследовательских работ по выявлению высококачественного кварцевого сырья;

- провести научно-исследовательские работы: геологические маршруты, исследование ранее пробуренных скважин, отбор лабораторных и лабораторно-технологических проб;

- изучить морфоструктурные характеристики и внутреннее строение продуктивных залежей;

- локализовать, оценить и апробировать прогнозны ресурсы высококачественного кварцевого сырья [18, 19];

- разработать рекомендации для проведения геологоразведочных работ и лицензирования перспективных участков [20, 21].

На первом этапе научно-исследовательских работ предусматривается сбор и обобщение материалов по участкам развития кварцевых пород, а также сведений по видам и способам производства кремниевой продукции и требованиям нормативных документов к исходному сырью.

Дальнейшее решение поставленных задач будет осуществляться в процессе проведения комплексного изучения наиболее перспективных участков. На участках детализации предусматривается выполнение исследований, обеспечивающих достоверную объективную информацию по минералогическому, химико-спектральному и петрохимическому составу развитых здесь кварцевых пород. На основании лабораторно-аналитических и минералогических

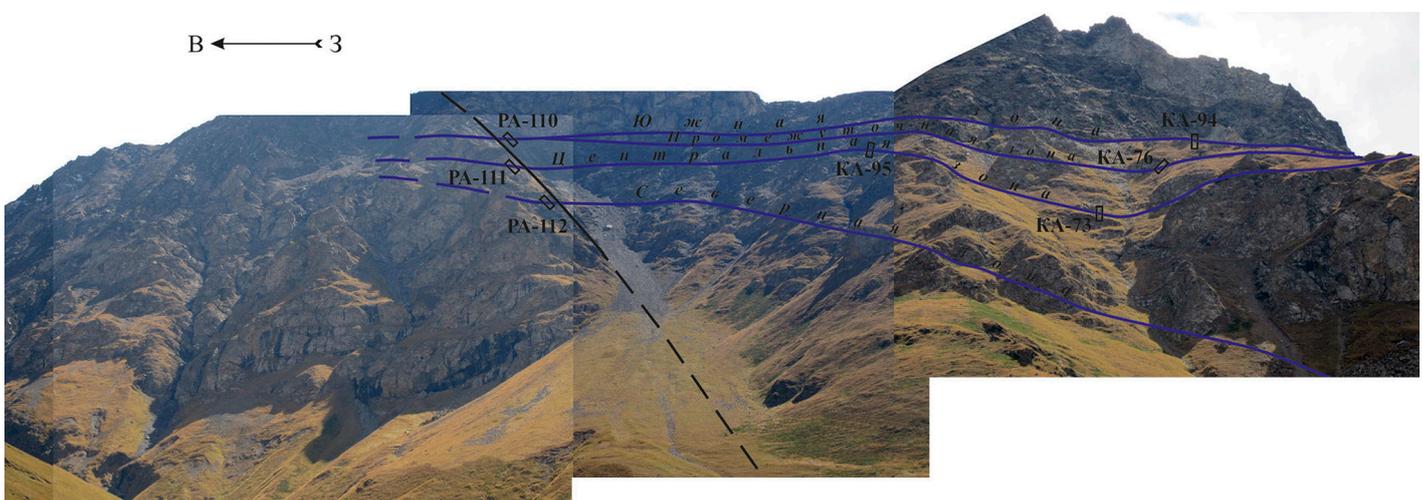


Рис. 3. Фиагдонский участок



данных будут рассчитаны технологические показатели различных типов кварцевого сырья. По участкам кварцевых пород, соответствующих нормативным теоретическим требованиям, будут отбираться технологические пробы, изучение которых явится основой для отнесения этих пород в разряд сырья, пригодного для производства кремниевой продукции. Одновременно осуществляется подбор участков с наиболее благоприятными горнотехническими и географо-экономическими условиями. По перспективным участкам будет проведен подсчёт прогнозных ресурсов, а также разработана рекомендация по направлению дальнейших научно-исследовательских работ и подготовке объектов к лицензированию на недропользование.

Предусматривается решить поставленные задачи комплексом методов, включающих: поисковые маршруты масштаба 1 : 10000, геологические маршруты для составления опорных литолого-структурных разрезов масштаба 1 : 500, опробование и обработку проб, минералого-петрографические, лабораторно-аналитические исследования, технологические испытания и камеральные работы.

Материалы и методы

Лабораторно-технологические исследования кварцевых песков заключались в определении гранулометрического состава продуктивной фракции ($-0,25 + 0,1$ мм), коэффициента светопропускания ($K_{сп}$) крупки, химического состава (содержания SiO_2 и ЭП), минералого-петрографического анализа немагнитной фракции.

Содержание двуоксида кремния в природном песке сравнительно низкое и в основном не соответствует требованиям ГОСТ 2169–69 к кварцевому сырью для производства металлургического (кристаллического) кремния.

С целью изучения вещественного состава, морфологических особенностей минералов-примесей и их количественных взаимоотношений, определяющих технологические свойства рассматриваемого жильного кварца, выполнялся их полуколичественный оптико-минералогический анализ. Проводился анализ электромагнитной, магнитной, тяжелой ($2,67$ г/см³) и легкой ($2,63$ г/см³) монофракций.

Подготовку и предварительную обработку данных (построения регрессии в двумерной постановке) проводили в MSExcel. Дальнейшая обработка экспериментальных данных подразумевала использование метода простых b-spline, по аналогии с работами [1*, 5*], которые были реализованы в виде «скриптов» ПО ViImproved (version 9.0) на языке Python. Построение итоговых трехмерных графиков – в программе «gnuplot».

Результаты исследований

В ходе исследований выявлены участки кварцевых горных пород, которые могут быть использованы в качестве сырья для производства кремниевой продукции «солнечных сортов». Выбранные участки отвечают основным требованиям: располагаются в районах с благоприятными географо-экономическими условиями и их отработка возможна открытым (карьерным) способом.

Выявлено высокотехнологичное сырье, пригодное для малозатратной технологии крупнотоннажного производства кремния солнечной градации (SG). По результатам всего комплекса исследований локализованы и оценены прогнозные ресурсы и подготовлены рекомендации по дальнейшему изучению и освоению перспективных объектов.

Данный вид работ связан с многочисленными специфическими факторами, учитывающими новизну проблемы и отсутствие общепринятых требований и методических подходов.

Площади исследований охватывались работами, ориентированными преимущественно на выявление рудных объектов и частично строительных материалов, сырья для производства базальтового волокна, щелочных бентонитовых глин для буровых растворов и др.

Все эти многочисленные исследования оказались малоинформативными для решения задач научно-исследовательских работ. В ранних научно-исследовательских отчётах по перечисленным работам, преследовавшим иные цели, сведения о кварцевых породах и кварцевом сырье довольно скудны или отсутствуют полностью. Исключение составляют лишь кварцевые пески Фиагдон-Камбилеевской площади, где пески с разной детальностью изучены в качестве сырья для силикатного кирпича, стекольной промышленности, стекловаты и формовочных смесей.

При проведённых работах фиксировались участки развития кварцевых жил и зон окварцевания, содержащие рудную минерализацию. Основное внимание уделялось изучению вещественного состава и взаимоотношениям рудных минералов и сопутствующих им элементов. Также изучались характеристики внутреннего строения, этапов кристаллизации, степени изменения наложенными процессами, объёмные характеристики присутствия пород иного состава, а также состав и параметры кварцевых пород (полезного ископаемого).

Результаты и обсуждения

Установлена зависимость изменения содержания кремнезема (SiO_2) от вида проявления ($R^2 = 0,72$, рис. 4):

$$SiO_2 = -0,0034n^4 + 0,0529n^3 - 0,2775n^2 + 0,5712n + 99,509, \quad (1)$$

где SiO_2 – содержание кремнезема, %; n – номер проявления (1 – Арсикомское; 2 – Льядонское I; 3 – Дзгалыкомское; 4 – Даргшудонское; 5 – Варце; 6 – Байкомское; 7 – Льядонское).

По результатам оценки качественной характеристики кварцевых пород и их концентратов в качестве сырья для производства кремниевой продукции установлено:

1) оцененные кварцевые породы различной генетической принадлежности по своему химическому составу, особенно по содержанию SiO_2 , неоднородные и разделяются на две группы:

– с низким содержанием $SiO_2 \leq 98,2$ % (кварцевые пески, кварцитовидные песчаники и кварцевые гравелиты);

– с высоким содержанием $\text{SiO}_2 > 98,2\%$ (жильный молочно-белый крупнозернистый кварц);

2) осадочные (кварцевые пески) и осадочно-метаморфические (кварцитовидные песчаники и кварцевые гравелиты) породы и концентраты из них заведомо небогатимы и рассматриваться в качестве сырья для получения глубокообогащенных высокочистых кварцевых концентратов, пригодных для производства кремния «солнечного качества», не могут;

3) жильный молочно-белый крупнозернистый кварц большинства проявлений Фиагдонской и Наро-Мамисонской площадей в природном виде по химическому составу кремнезема (SiO_2) и элементов-примесей соответствует требованиям ГОСТ 2169–69 к кварцевому сырью для производства металлургического (кристаллического) кремния.

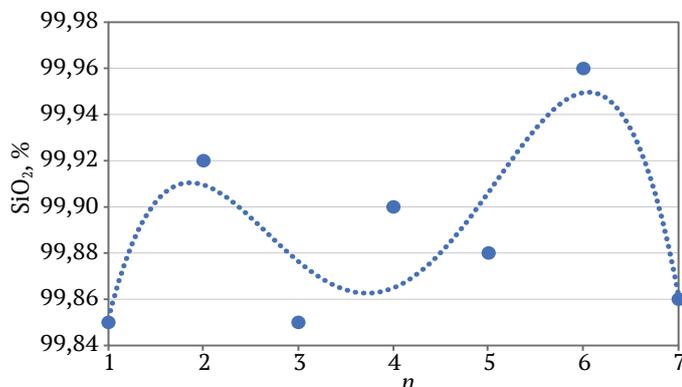


Рис. 4. Графическое решение функции изменения содержания кремнезема от вида проявления

На следующем этапе установлена зависимость изменения светопропускания от вида проявления полиномиального типа, которая имеет следующий вид ($R^2 = 0,73$; рис. 5):

$$K_{\text{сн}} = 0,1993n^4 - 3,5249n^3 + 21,666n^2 - 53,562n + 49,121, \quad (2)$$

где $K_{\text{сн}}$ – величина светопропускания, %; n – номер проявления.

Выявленная чрезвычайно низкая величина светопропускания ($K_{\text{сн}} - 31,1\%$) концентратов жильного кварца полностью исключает возможность их использования в качестве плавочного сырья для производства кварцевых тиглей.

На заключительном этапе работы получены параметры химического состава примесей, которые сведены в табл. 2.

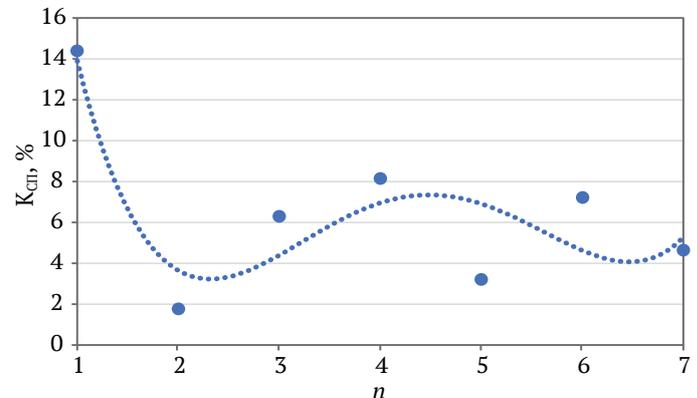


Рис. 5. Графическое решение функции изменения светопропускания от вида проявления

Таблица 2

Сводные средневзвешенные содержания элементов-примесей в концентратах жильного кварца проявлений Фиагдонской и Наро-Мамисонской площадей, ppm

Название элементов	n	Арсикомское	Льядонское I	Дзагалыкомское	Даргшудонское	Варце	Байкомское	Льядонское
		1	2	3	4	5	6	7
Высокая концентрация								
ЭП	1	71,69	69,88	68,53	60,64	60,31	44,53	40,02
Al	2	47,7	46,3	33,93	25,47	38	34,29	21,36
Na	3	15,6	19,8	25,67	20,49	17	11,4	14,53
K	4	2,17	0,72	2,03	5,87	1	1,8	0,97
Ca	5	2,74	1,3	3,63	4,92	1,8	1,26	1,53
Низкая концентрация								
Li	6	2,23	0,65	1	0,82	0,51	0,83	0,64
Fe	7	0,4	0,6	0,7	0,7	0,8	0,6	0,4
B	8	0,36	0,25	0,28	0,45	0,42	0,24	0,33
Ti	9	0,38	0,36	0,4	0,39	0,35	0,2	0,31
Mg	10	0,21	0,28	0,39	0,21	0,24	0,71	0,84
Mn	11	0,09	0,06	0,04	0,13	0,07	0,05	0,2
Cr	12	0,02	0,06	0,15	0,1	0,08	0,09	0,02
P	13	0,02	0,04	0,23	0,02	0,02	0,02	0,02
Cu	14	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
Ni	15	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
Co	16	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Zr	17	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,005	0,01

Высокие содержания в концентратах Ti (45–65 ppm), а также Al, Ca, Mg, Na, K, Cu, Mn и Fe указывают на непригодность кварцевых концентратов из песков для производства глубокообогащенных продуктов для наплава кварцевых стекол различного назначения.

Минералого-петрографическим анализом немагнитной фракции установлено, что кварц в песках состоит из разных генераций, в том числе содержит водяно-прозрачные зерна с чистой гладкой поверхностью и полной прозрачностью в отраженном свете. Количество водяно-прозрачных зерен в основной массе песка составляет 25,4–69,4 %.

«Кварциты» (кварцитовидные песчаники) и кварцевые гравелиты участков Назиткомского, Ларцикомского I и II, Скального, Водопадного и Штырдонского объединяет то, что вместе с кварцем в них довольно значительное количество полевых шпатов (2,0–35,0, единич. до 57 %), низкие содержания кварца (32,0–92,0 %) и коэффициента светопропускания $K_{\text{сп}} = 5,9–8,0$ %, а также высокие значения таких ЭП, как Al, Ca, Mg, Na, K, Fe и Ti.

Жильный молочно-белый крупнозернистый кварц, развитый в пределах Фиагдонской и Наро-Мамисонской площадей, исследовался в той же технологической последовательности, что и кварцитовидные песчаники и гравелиты. После пробоподготовки определялись химический состав (содержания SiO_2 и оксидов ЭП), минеральный состав, количества ЭП в природном кварце и промпродуктах обогащения, проводился минералого-петрографический анализ.

Из анализа рис. 6 следует, что: а) большинство проб жильного кварца наиболее эффективно обогащаются по таким элементам, как Ti, Ca, Mn, Cu, Mg, K и Fe; менее эффективно – по Al, Na, Li, B и P; б) сверхнормативные содержания Al, Na, K, реже Ca и Fe относительно сорта КГО-3 в концентратах жильного кварца исключают возможность производства из него кварцевых тиглей, используемых для выращивания монокристаллического кремния по традиционной технологии с использованием «Сименс-процесса»;

в) кварцевые концентраты из жильного кварца проявлений Льядонская Зона, Арсикомского, Даргшудонского, Дзагалыкомского, Варце, Льядонского I и Байкомского с суммарным содержанием. У ЭП ≤ 100 ppm и низкими содержаниями Ti, B и P потенциально пригодны для производства кремниевой продукции «солнечного качества»; существующие небольшие отклонения в их химических составах относительно регламентируемых ЭП (Ti, B и P) могут потребовать незначительных доработок технологических процессов.

Исследования жильного кварца этих площадей показали, что в необогащенном виде большинство проб соответствуют требованиям ГОСТ 2169–69 ($\text{SiO}_2 \geq 98,2$ %, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,25$ %, $\text{CaO} \leq 0,25$ %, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0,6$ %) и пригодны для получения металлургического (кристаллического) кремния. Исключение составляют пробы с повышенным содержанием кальцита (10,0–24,0 %), отобранные на участках Водораздельный Шток и Бугультинский.

Повышенное содержание кальцита в жилах этих участков связано, по мнению авторов, с химическим составом вмещающих пород (диабазов, диабазовых порфириров), генетически влияющих (повышающих карбонатность) на состав гидротермальных растворов, сформировавших жильные тела.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в составе проб жильного кварца иногда встречается кальцит, полевые шпаты, серицит, хлорит, редко присутствуют рудные минералы: пирит, арсенопирит; в единичных пробах обнаружены минералы группы эпидота, амфибола, силлиманита.

Кварц в пробах представлен прозрачными и молочно-белыми зернами, в основном изометричными, реже удлинёнными, с редкими включениями гематита, магнетита и мусковита.

Зерна кварца иногда имеют разную структуру: часть зерна имеет ровные прозрачные плоские грани, другая часть – волнисто-ребристую структуру и окрашена в зеленовато-серый цвет. Методом электронной микроскопии поверхности в составе зерен, помимо кремния и кислорода, выявлены Al – 2,8 %, K – 1,48 %, Fe – 0,42 %.

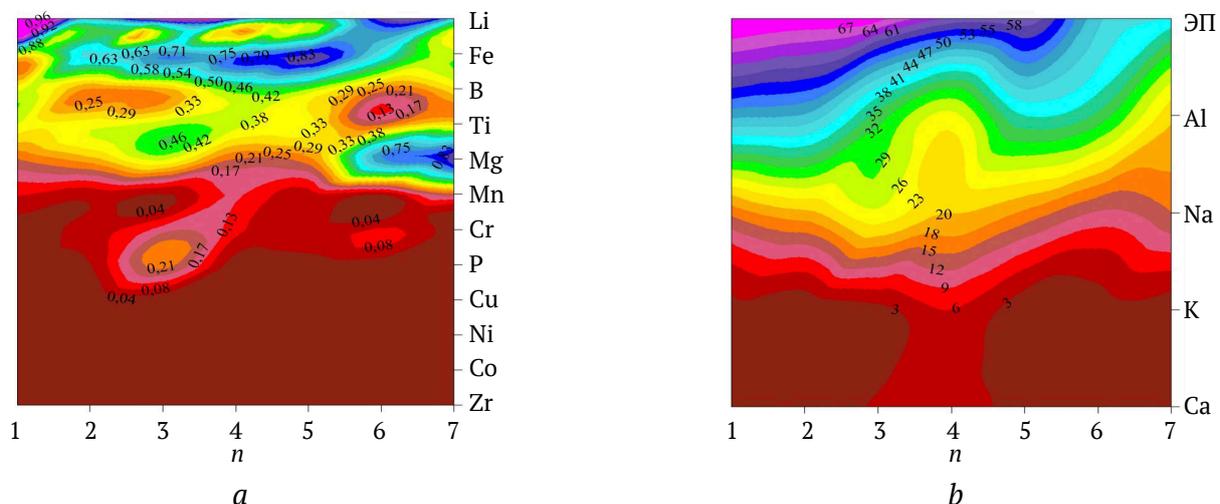


Рис. 6. Распределение концентрации химических элементов в примесях для проявлений Фиагдонской и Наро-Мамисонской площадей:

а – для элементов группы «высокая концентрация»; б – для элементов группы «низкая концентрация»



Таким образом, можно считать, что рассматриваемый жильный кварц и концентраты из него в целом непригодны для выращивания монокристаллического кремния с применением «Сименс-процесса» по традиционной технологии. Сверхнормативное содержание щелочных металлов в концентратах оказывает негативное влияние на термостойкость тиглей, так как щелочи играют роль флюса, снижая температуру плавления изделий из кварцевого стекла.

Данные кварцевые концентраты специалистами оцениваются как перспективные для производства кремниевой продукции, а именно для непосредственного получения кремния «солнечного» качества без технологических и экологических осложнений, сопровождающих традиционно используемый «Сименс-процесс».

Заключение

После выполнения намеченного комплекса исследовательских работ в соответствии с поставленными задачами на объект получены следующие результаты:

– выполнены анализ материалов и обобщение статистической, экономической, геологической, технологической и другой информации, необходимые для решения основных научно-исследовательских задач;

– выделены перспективные участки для постановки дальнейших научно-исследовательских работ;

– уточнены геологические карты перспективных участков масштаба 1 : 10000 с легендами и разрезами к ним;

– на перспективных участках определены условия залегания, морфология и параметры продуктивных залежей;

– предварительно изучены качество и технологические характеристики кварцевого сырья;

– локализованы, оценены и апробированы прогноз-ные ресурсы высококачественного кварцевого сырья для производства кремниевой продукции по категории P_2 – 500 тыс. т;

– разработаны рекомендации для проведения геологоразведочных работ и лицензирования;

– подготовлены объекты к лицензированию на недропользование.

Все результаты были получены после выполнения лабораторных работ, опробования, исследования построенных разрезов, изучения документации горных выработок и скважин, заключений минералого-петрографических, лабораторных исследований и технологических испытаний.

Список литературы

1. Фёдоров А. М., Макрыгина В. А., Непомнящих А. И., Елисеев И. А. Ресурсный потенциал Восточной Сибири на кварцевое сырье для получения высокочистых кварцевых материалов. *География и природные ресурсы*. 2016;(6):55–59. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(55-59\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(55-59))
2. Галиахметова Л. Х., Быдтаева Н. Г., Непряхин А. Е. Перспективы Мало-Чипикетской кварценозной зоны на кварцевое сырье высокого качества. *Георесурсы*. 2019;21(3):99–106. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.99-106>
3. Николаев А. А., Кирпичев Д. Е., Николаев А. В. Влияние подачи обрабатываемого материала в ванну плазменной печи на энергетические параметры восстановительной плавки кварц-лейкоксового концентрата. *Физика и химия обработки материалов*. 2020;(1):36–41. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-1-36-41>
4. Кайбичева А. В., Кайбичев И. А. Рафинирование расплавов технического кремния в электрическом поле в гелии. *Расплавы*. 2019;(4):390–395. <https://doi.org/10.1134/S0235010619040066>
5. Поленов Ю. А., Огородников В. Н., Кисин А. Ю. История поисков и освоения месторождений кварцевого сырья Урала и перспектива их дальнейшего использования. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2021;(2):48–59. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-48-59>
6. Логинов В. Г., Рудаков Р. Б., Коротеев Н. Д. Создание высокотехнологичных производств как фактор сырьевой безопасности (проект «Полярный кварц»). *Известия Уральского государственного горного университета*. 2017;(1):84–87. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-1-84-87>
7. Корекина М. А., Лютоев В. П., Шанина С. Н., Штенберг Н. В. Микроэлементный состав жильного кварца Кузнецкого месторождения (Южный Урал). *Обогащение руд*. 2020;(5):23–29. <https://doi.org/10.17580/or.2020.05.04>
8. Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Савичев А. Н. Особо чистый кварц Уфалейского кварценозного района (Южный Урал). *Известия Уральского государственного горного университета*. 2018;(1):23–32. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-23-32>
9. Klyuev R. V., Yegorova E. V., Bosikov I. I., Tsidaev B. S. Evaluation of use of effective technologies for increasing sustainable development of natural and technical system of oil and gas complex. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018;10(3):392–403. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2018-10-3-392-403>
10. Босиков И. И., Ключев Р. В. Оценка перспективности территории Березкинского рудного поля при помощи программного продукта Micromine. *Горные науки и технологии*. 2022;7(3):192–202. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-192-202>
11. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(6):591–594.
12. Босиков И. И., Ключев Р. В., Хетагуров В. Н., Силаев И. В. Комплексная оценка гидродинамических процессов на карьерах Клинского месторождения с помощью методов управления ими в массивах горных пород. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(2):284–297. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-284-297>
13. Tyulenev M. A., Markov S. O., Gasanov M. A., Zhironkin S. A. numerical modeling in the structural study of technogenic rock array. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018;36(5):2789–2797. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0501-3>



14. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(3):405–415. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>
15. Голик В.И., Гашимова З.А., Лискова М.Ю., Конгар-Сюрюн Ч.Б. К проблеме минимизации объемов мобильной пыли при разработке карьеров. *Безопасность труда в промышленности*. 2021;(11):28–33. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-11-28-33>
16. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геотехнических рисков в шахтном и подземном строительстве. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(1):7–16. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16>
17. Халкечев К.В., Халкечев Р.К., Левкин Ю.М. Математическая модель поля напряжений в целиках с учетом магистральной трещины на угольных месторождениях. *Уголь*. 2023;(7):56–58. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-7-56-58>
18. Knutsson H., Knutsson K., Molin F., Zetterlund P. From flint to quartz: Organization of lithic technology in relation to raw material availability during the pioneer process of Scandinavia. *Quaternary International*. 2016;424:32–57. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.062>
19. Guan Q., Dong D., Zhang H., et al. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: A case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*. 2021;48:813–823. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(21\)60068-X](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(21)60068-X)
20. Brand N.W., Bottrell S.H., Miller M.F. Concentrations of reduced Sulphur in inclusion fluids associated with black shale hosted quartz vein gold deposits: implications for mechanisms of transport and deposition of gold and a possible exploration tool. *Applied Geochemistry*. 1989;4:813–823. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(89\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0883-2927(89)90006-1)
21. Sebutsoe T.C., Musingwini C. Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017;117:199–206.

References

1. Fedorov A.M., Makrygina V.A., Nepomnyashchikh A.I., Eliseev I.A. Quartz resource potential of Eastern Siberia for high-purity quartz production. *Geografia i Prirodnye Resursy*. 2016;(6):55–59. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(55-59\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(55-59))
2. Galiakhmetova L.Kh., Bydtaeva N.G., Nepryakhin A.E. Prospects of the Malo-Chipiketsky quartz-bearing zone for quartz raw materials of high quality. *Georesursy*. 2019;21(3):99–106. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.99-106>
3. Nikolaev A.A., Kirpichyov D.E., Nikolaev A.V. Influence of material charging into plasma-arc furnace bath on energy parameters of reduction melting of quartz-leucoxene concentrate. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*. 2020;(1):36–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-1-36-41>
4. Kaibichev A.V., Kaibichev I.A. Refining of technical silicon melts in the electrical field in helium. *Raspilavy*. 2019;(4):390–395. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0235010619040066>
5. Polenov Y.A., Ogorodnikov V.N., Kisin A.Y. History of prospecting and development of deposits of quartz raw materials in the Urals and the prospect of their further use. *News of the Ural State Mining University*. 2021;(2):48–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-48-59>
6. Loginov V.G., Rudakov R.B., Koroteev N.D. Creating high-tech productions as a factor of raw material security (“Polar quartz” project). *News of the Ural State Mining University*. 2017;(1):84–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-1-84-87>
7. Korekina M.A., Lyutov V.P., Shanina S.N., Shtenberg M.V. Microelement composition of vein quartz of the Kuznechikhinskoe deposit (South Urals). *Obogashchenie Rud*. 2020;(5):23–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2020.05.04>
8. Ogorodnikov V.N., Polenov Y.A., Savichev A.N. Extra pure quartz of the Ufaleyky quartziferous district (Southern Urals). *News of the Ural State Mining University*. 2018;(1):23–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-1-23-32>
9. Klyuev R.V., Yegorova E.V., Bosikov I.I., Tsidaev B.S. Evaluation of use of effective technologies for increasing sustainable development of natural and technical system of oil and gas complex. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018;10(3):392–403. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2018-10-3-392-403>
10. Bosikov I.I., Klyuev R.V. Assessment of Berezkinskoye ore field prospectivity using Micromine software. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(3):192–202. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-192-202>
11. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(6):591–594.
12. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N., Silaev I.V. Comprehensive assessment of hydrodynamic processes in the Klinskoye Quarry with the use of their control methods in rock masses. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):284–297. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-284-297>
13. Tyulenev M.A., Markov S.O., Gasanov M.A., Zhironkin S.A. numerical modeling in the structural study of technogenic rock array. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018;36(5):2789–2797. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0501-3>



14. Rybak Y., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Y.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(3):405–415. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415>

15. Golik V.I., Gashimova Z.A., Liskova M.Yu., Kongar-Syuryun Ch.B. To the problem of minimizing the volume of mobile dust in the development of pits. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(11):28–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-11-28-33>

16. Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Complex estimation of geotechnical risks in mine and underground construction. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(1):7–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-7-16>

17. Khalkechev K.V., Khalkechev R.K., Levkin Yu.M. Mathematical model of the stress field in the pillars with due account taken of the main crack in coal fields. *Ugol'*. 2023;(7):56–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-7-56-58>

18. Knutsson H., Knutsson K., Molin F., Zetterlund P. From flint to quartz: Organization of lithic technology in relation to raw material availability during the pioneer process of Scandinavia. *Quaternary International*. 2016;424:32–57. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.062>

19. Guan Q., Dong D., Zhang H., et al. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: A case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*. 2021;48:813–823. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(21\)60068-X](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(21)60068-X)

20. Brand N.W., Bottrell S.H., Miller M.F. Concentrations of reduced Sulphur in inclusion fluids associated with black shale hosted quartz vein gold deposits: implications for mechanisms of transport and deposition of gold and a possible exploration tool. *Applied Geochemistry*. 1989;4:813–823. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(89\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0883-2927(89)90006-1)

21. Sebutsoe T.C., Musingwini C. Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017;117:199–206.

Информация об авторах

Игорь Иванович Босиков – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой нефтегазового дела, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8930-4112](https://orcid.org/0000-0001-8930-4112), Scopus ID [56919738300](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56919738300); e-mail igor.boss.777@mail.ru

Роман Владимирович Ключев – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры техники и технологии горного и нефтегазового производства, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), Scopus ID [57194206632](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194206632); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Владимир Черменович Ревазов – кандидат педагогических наук, доцент кафедры философии и социально-гуманитарных технологий, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1784-6531](https://orcid.org/0000-0003-1784-6531), Scopus ID [57201777428](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57201777428); e-mail revazov.v@yandex.ru

Никита Владимирович Мартюшев – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, г. Грозный, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-0620-9561](https://orcid.org/0000-0003-0620-9561), Scopus ID [36671592800](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36671592800), ResearcherID [AAO-2653-2020](https://orcid.org/AAO-2653-2020); e-mail martjushev@tpu.ru

Information about the authors

Igor I. Bosikov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of the Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8930-4112](https://orcid.org/0000-0001-8930-4112), Scopus ID [56919738300](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56919738300); e-mail igor.boss.777@mail.ru

Roman V. Klyuev – Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Department of Engineering and Technology of Mining and Oil and Gas Production, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), Scopus ID [57194206632](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194206632); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Vladimir Ch. Revazov – Cand. Sci. (Pedagogy), Assistant Professor the Department of Philosophy and Social and Humanitarian Technologies, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1784-6531](https://orcid.org/0000-0003-1784-6531), Scopus ID [57201777428](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57201777428); e-mail revazov.v@yandex.ru

Nikita V. Martjushev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russian Federation; ORCID [0000-0003-0620-9561](https://orcid.org/0000-0003-0620-9561), Scopus ID [36671592800](https://scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36671592800), ResearcherID [AAO-2653-2020](https://orcid.org/AAO-2653-2020); e-mail martjushev@tpu.ru

Поступила в редакцию 22.10.2023
Поступила после рецензирования 30.10.2023
Принята к публикации 01.11.2023

Received 22.10.2023
Revised 30.10.2023
Accepted 01.11.2023



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-150>

УДК 624.121

**Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин**М. Д. Ильинов , Д. Н. Петров   , Д. А. Карманский  , А. А. Селихов *Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация* petrovgs@mail.ru**Аннотация**

При проектировании параметров разработки нефтяных и газовых месторождений на больших глубинах необходимо иметь представление о влиянии на поведение пород-коллекторов и вмещающих их пород таких факторов, как высокий уровень напряженного состояния пород, температурное поле окружающей среды, гидро- и газодинамические процессы в массиве. Воздействие как одного, так и комбинации данных факторов может привести к изменениям в строении, структуре, составе и свойствах породного массива и, как следствие, несоответствию реальным условиям принятых проектных решений. **Целью исследований** является разработка методики лабораторных исследований влияния условий залегания коллекторов нефтяных и газовых месторождений на больших глубинах при изучении свойств образцов горных пород.

Задачи исследования: теоретический анализ и выявление основных факторов, влияющих на поведение и изменение внутренней структуры пород, разработка методики лабораторных исследований с комплексным моделированием данных факторов и проведение пробных экспериментов по оценке их влияния.

В рамках работы были выполнены испытания образцов песчаников, отобранных с глубин от 3,5 до 4 км месторождения углеводородов. Исследования проводились с моделированием термобарических пластовых условий залегания: температуры, горного и пластового давлений.

Представлены результаты экспериментов по исследованию поведения образцов горных пород с максимальным приближением к естественным условиям залегания пород коллекторов 3,5–4 км.

Установлено, что образцы пород одной литологической разности и отобранные практически с одинаковых глубин могут иметь существенные отличия в характере деформирования как в до-, так и запрещенной области нагружения.

Результаты данных исследований служат исходными данными при разработке и уточнении геомеханических моделей поведения материалов, которые учитывают не только прочностные критерии разрушения, но и дилатансионные процессы на различных этапах деформирования пород.

Увеличение бокового давления в интервалах от 0 до 55 МПа приводит к относительно незначительному изменению скоростей ультразвуковых колебаний (от 1 до 10 %), что не позволяет судить о необходимости использования данных результатов при косвенной оценке изменения свойств горных пород в массиве. Однако в рамках геофизических исследований учет изменения численных значений скоростей позволит повысить качество интерпретации результатов, что связано с большими геометрическим размерами изучаемых массивов.

Исследования акустической эмиссии пород в сложноподвиженном состоянии позволяют отслеживать процессы пространственного образования и развития микро- и макротрещиноватости на всей стадии нагружения образцов и дают более полное представление об изменении их внутренней структуры.

В статье рассмотрены факторы, влияющие на процессы структурного изменения горных пород нефтяных и газовых месторождений, связанных с увеличением глубины их разработки. Разработаны методические подходы, позволяющие производить исследования физико-механических свойств образцов горных пород с моделированием сложных термобарических условий. Описаны технические характеристики испытательного оборудования, обеспечивающие максимальное воспроизведение реальных условий залегания пород-коллекторов. Выявлены особенности деформирования и разрушения образцов горных пород при их испытаниях в условиях бокового давления 55 МПа, порового 30 МПа с созданием температурного поля до 100 °С.

Ключевые слова

горная порода, образец, напряжение, поровое давление, температура, структура, акустическая эмиссия, месторождение, структурные изменения

Для цитирования

Ilyinov M. D., Petrov D. N., Karmanskiy D. A., Selikhov A. A. Physical simulation aspects of structural changes in rock samples under thermobaric conditions at great depths. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):290–302. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-150>



MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Physical simulation aspects of structural changes in rock samples under thermobaric conditions at great depthsM. D. Ilyinov , D. N. Petrov   , D. A. Karmanskiy  , A. A. Selikhov 

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

 petrovgs@mail.ru**Abstract**

When designing the parameters for the development of oil and gas field at significant depths, crucial to comprehend how certain factors affect the behavior of reservoir rocks and host rocks. These factors include the high level of rock stress, the ambient temperature field, and the hydro- and gas-dynamic processes within the mass. The impact of one or a combination of these factors can result in alterations to the construction, structure, composition, and properties of the rock mass and, ultimately leading to a mismatch between the design solutions and the actual conditions.

The purpose of the research is to establish a methodology for conducting laboratory studies that investigate the impact of the mode of occurrence of oil and gas field reservoirs at great depths on the properties of rock samples.

The research objectives encompass a theoretical analysis and the identification of the principal factors influencing rock behavior and changes in internal structure. Additionally, the objectives include developing laboratory research methods that comprehensively simulate these factors and conducting trial experiments to assess their effects.

As part of the project, tests were conducted on sandstone samples collected from depth ranging from 3.5 to 4 km within the hydrocarbon field. These studies were performed while simulating thermobaric reservoir conditions, which include temperature, rock pressure, and reservoir pressure.

The results of these experiments, aimed at examining the behavior of rock samples as closely as possible to their natural reservoir occurrence at depth of 3.5–4 km, are presented.

It has been observed that rock samples of the same lithology, collected from nearly identical depths, can exhibit significant differences in deformation characteristics, both in the pre- and off-limit regions of loading. The findings from these studies provide the initial data for the development and refinement of geomechanical model behavior for materials that take into account not only fracture strength criteria but also dilatancy processes at various stages of rock deformation.

Increasing lateral pressure within the range of 0 to 55 MPa causes relatively minor change in ultrasonic vibration velocities, typically ranging from 1 to 10%. This makes it challenging to determine the necessity of utilizing these results for indirectly assessing changes in rock properties within the mass. Nevertheless, within the context of geophysical studies, considering variations in velocity values enhances the quality of result interpretation, especially given the substantial geometric dimensions of the rock masses under investigation. Research into the acoustic emissions of rocks in a complex stressed state enables the monitoring of spatial micro- and macrofracturing processes throughout the entire loading phase of samples. This provides a more comprehensive understanding of changes in their internal structure.

The article delves into the factors that impact structural changes in oil and gas field rocks, particularly as their development extends to greater depths. The study outlines methodological approaches that facilitate the investigation of physical and mechanical properties of rock samples, while accurately modeling complex thermobaric conditions. Additionally, it describes the technical specifications of the testing equipment, ensuring the closest possible replication of the actual conditions of reservoir rock occurrences. Lastly, the study reveals key features related to the deformation and fracture of rock samples during testing under lateral pressures of 55 MPa and pore pressures of 30 MPa, along with the creation of temperature fields up to 100 °C.

Keywords

rock, sample, stress, pore pressure, temperature, structure, acoustic emission, field, structural changes

For citation

Ilyinov M. D., Petrov D. N., Karmanskiy D. A., Selikhov A. A. Physical simulation aspects of structural changes in rock samples under thermobaric conditions at great depths. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):290–302. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-150>

Введение

При проектировании параметров разработки нефтяных и газовых месторождений на больших глубинах необходимо иметь представление о влиянии на поведение пород-коллекторов и вмещающих их пород таких факторов, как высокий уровень напряженного состояния пород, температурное поле

окружающей среды, гидро- и газодинамические процессы в массиве [1–3]. Воздействие как одного, так и комбинации данных факторов может привести к изменениям в строении, структуре, составе и свойствах породного массива [4–6] и, как следствие, несоответствию реальным условиям принятых проектных решений.

В настоящее время существуют две основные диаметрально противоположные теории происхождения углеводородов: биогенная (органическая) и абиогенная (неорганическая) [7–9].

Согласно биогенной (органической) теории можно выделить следующие основные этапы образования месторождений углеводородов. Изначально на дне водоема происходит формирование пласта органических остатков (нефтематеринских пород). Затем в результате движения земной коры и осадконакопления происходит постепенное опускание пласта на большие глубины, что приводит к увеличению температуры и давления и, как следствие, образованию из органических веществ битумоидов (диффузионно-рассеянной нефти). В дальнейшем под воздействием гравитационных и тектонических сил происходит вытеснение нефти из материнских пород и ее миграция по породам-коллекторам к местам образования залежей (рис. 1) [10].

Наиболее распространенными типами резервуаров, в которых осуществляется аккумуляция нефти, являются сводовые и тектонически экранированные антиклинальные ловушки [11, 12]. Образование сводовых ловушек обусловлено совместным горизонтальным и вертикальным деформированием пластов без разрыва сплошности (рис. 2, а). Тектонически экранированные ловушки образуются с разрывом сплошности в виде сброса, взброса или надвига, когда из-за смещения пластов коллектор перекрывается непроницаемыми пластами по линии тектонического нарушения (рис. 2, б).

Теория абиогенного происхождения предполагает, что углеводороды образуются в мантийных очагах вследствие неорганического синтеза на сверхбольших глубинах в условиях колоссальных давлений и высоких температур из неорганического углерода и водорода. Согласно этой концепции образовавшиеся в глубине мантии Земли углеводороды по глубинным разломам мигрируют в земную кору и аккумулируются в месторождения углеводородов [13–15].

Если не учитывать принципиальные отличия в генезисе образования углеводородов, а рассматривать данные теории исключительно с точки зрения оценки термобарических и фильтрационных процессов, можно отметить их качественную схожесть. И в том и другом случае образование углеводородов и их миграция по породам происходят в условиях повышенного горного давления и температур [16–18]. Различие присутствует только в численных значениях данных показателей [19].

Оценка влияния пластовых термобарических условий на физико-механические характеристики горных пород, как правило, проводится экспериментальными методами с моделированием реальных условий залегания с применением испытательного оборудования. В последнее время в связи с развитием программного обеспечения и вычислительной техники результаты лабораторных исследований дополняются математическим моделированием на базе различных численных методов [20–22]. Последние позволяют более детально изучить процессы деформирования и разрушения горных пород, но корректность их результатов напрямую

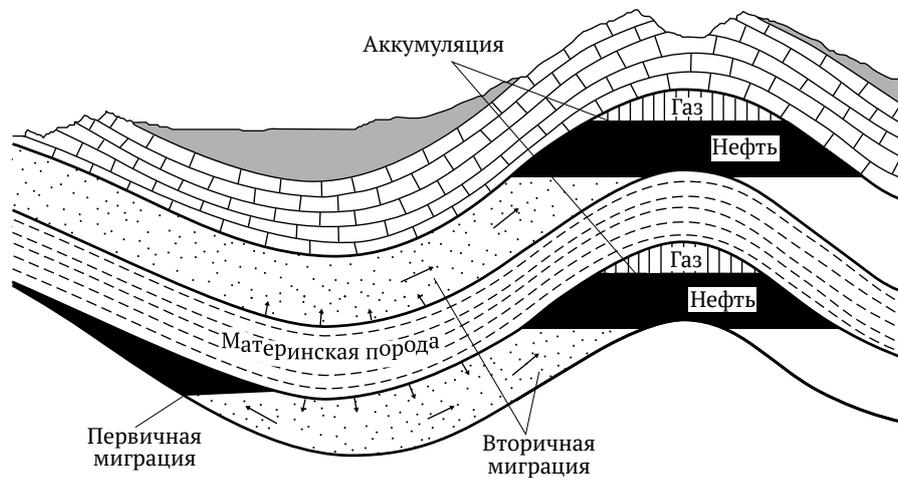


Рис. 1. Принципиальная схема образования залежей нефти согласно биогенной теории [10]

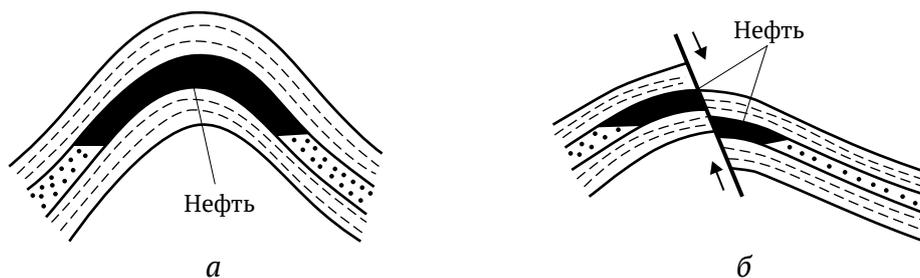


Рис. 2. Схемы образования залежей нефти:

а – сводовая ловушка; б – тектонически экранированная ловушка

зависит от выбранной геомеханической модели и обобщенных параметров поведения материала. В связи с этим выявление экспериментальных закономерностей и зависимостей, отражающих влияние тех или иных факторов на поведение образцов горных пород, является основной исходной информацией для дальнейшей оценки поведения горных пород и пород-коллекторов в массиве [23, 24].

Цель работы – разработка методики лабораторных исследований влияния условий залегания коллекторов нефтяных и газовых месторождений на больших глубинах при изучении свойств образцов горных пород. Предусматривалось решение следующих задач: теоретический анализ и выявление основных факторов, влияющих на поведение и изменение внутренней структуры пород, разработка методики лабораторных исследований с комплексным моделированием данных факторов и проведение пробных экспериментов по оценке их влияния.

Методика и методы

Лабораторные исследования горных пород должны максимально отражать влияние на их структуру природных процессов, протекающих в массиве при формировании месторождения углеводородов [25–27]. Как уже отмечалось выше, по типу пустот различают поровые и трещиноватые коллекторы. Образование поровых пустот связано с процессами уплотнения пород вследствие воздействия горного давления. Возникновение трещиноватых пустот связано с тектоническими пликативными или дизъюнктивными дислокациями в земной коре [28, 29].

Исходя из этого проведение лабораторных исследований предлагается выполнять на образцах трех типов:

– первый тип – образцы пород с поровым типом пустот (рис. 3, *a*), без какого-либо дополнительного внешнего механического воздействия;

– второй тип – образцы пород с поровым типом пустот и наличием природной или искусственно созданной микро- и макротрещиноватости (рис. 3, *б*), образующейся за счет пластических деформаций при

формировании антиклинальной складчатой структуры пласта;

– третий тип – образцы пород с наличием как одиночных, так и систем дизъюнктивных нарушений, расположенных под различными углами к образующей образца (рис. 3, *в, г*), моделирующие наличие тектонических разрывных нарушений в пласте пород.

Основным критерием формирования группы (выборки) образцов для проведения исследований в рамках одного литотипа пород является высокая степень однородности первоначального ядерного материала.

При подготовке боковых и торцевых поверхностей образцов должны быть выполнены требования нормативных документов по подготовке образцов горных пород при испытании на объемное сжатие [30–32].

Граничные условия, задаваемые в процессе испытания образцов, должны соответствовать глубинам залегания пород-коллекторов, равным 6–10 км, а также иметь некоторый диапазон их изменения, учитывающий неоднородность строения земной коры. Установлено, что напряженное состояние для данных глубин может составлять 250–280 МПа, величины порового (пластового) давления 200–220 МПа, а температура горных пород доходить до 300 °С [33–35]. При этом также должен быть учтен процесс фильтрации флюида по телу образца. Для оценки факторов, влияющих на изменение внутренней структуры и деформирование в условиях объемного напряженного состояния образцов горных пород, предлагается следующая схема проведения испытаний (рис. 4).

Для достижения данных граничных условий требуются сложные испытательные прессовые системы. Большинство прессовых установок конструктивно рассчитаны на проведение стандартных (ГОСТированных) методов испытаний образцов горных пород. В связи с этим сервогидравлическая испытательная система MTS 815, имеющая в базовом варианте силовую раму на 4600 кН с камерой трехосного сжатия, позволяющей создавать боковое давление до 80 МПа, контроллеры и программное обеспечение, предназначенные для автоматического управления режимом

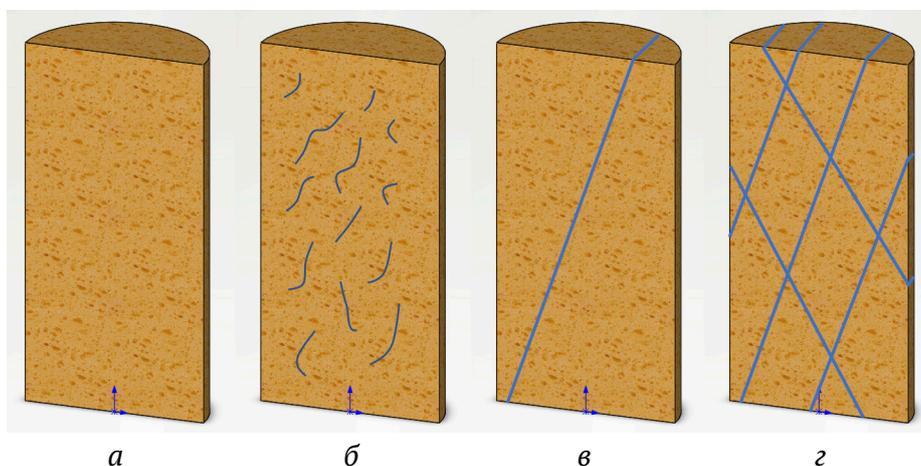


Рис. 3. Типы лабораторных образцов для проведения исследований:
a – первый тип; *б* – второй тип; *в, г* – третий тип

нагрузки, а также сбора информации с датчиков силы и деформаций, была дооснащена встроенными в камеру трехосного сжатия термонагревателями с регулировкой температуры от 20 до 200 °С, насосными установками, позволяющими моделировать величину порового давления на входе и выходе из образца (P_1 и P_2 , рис. 5, а) в диапазоне от 0 до 80 МПа. В данной комплектации испытательная система позволяет установить особенности деформирования и разрушения образцов под воздействием механической нагрузки и определить статические показатели дефор-

мационных свойств образцов горных пород (модули упругости и деформаций, коэффициенты Пуассона и поперечной деформации), а также установить особенности изменения объема образцов (дилатансии) на различных стадиях нагружения. Также стоит отметить, что испытательная система в данной компоновке с использованием современных датчиков обеспечивает получение более высокой точности сигналов, поступающих с измерительных каналов (класс точности 0,2), и, как следствие, достоверность результатов испытаний в целом повышается.

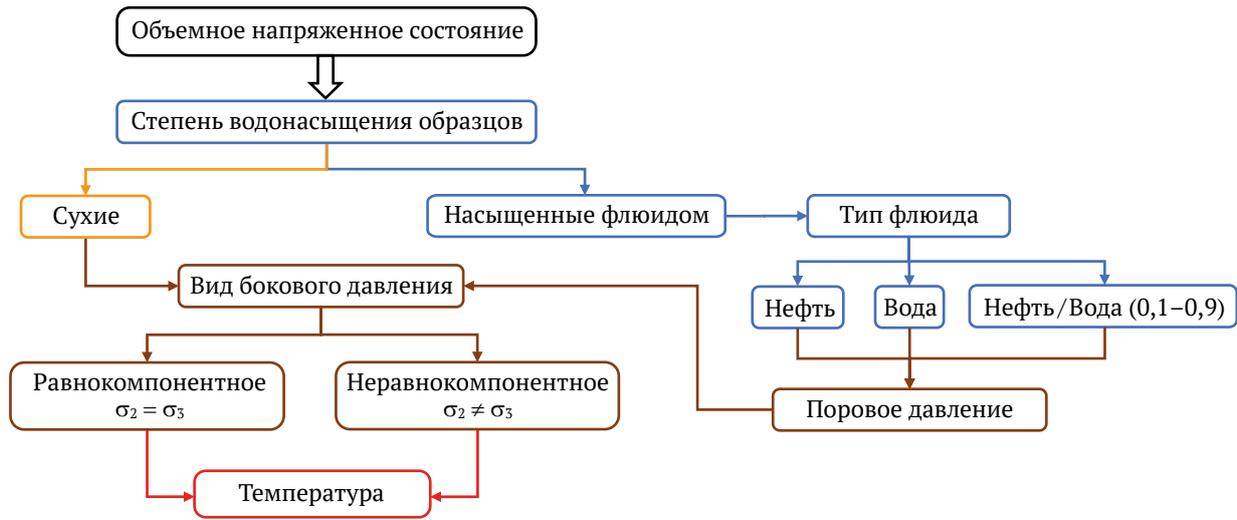


Рис. 4. Алгоритм создания граничных условий при проведении испытаний образцов горных пород в объемном напряженном состоянии

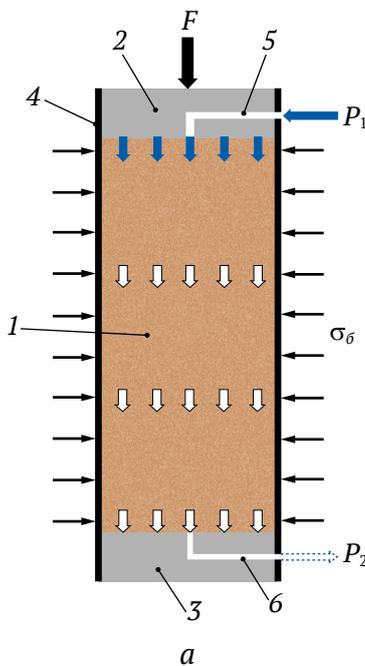


Рис. 5. Принципиальная схема проведения эксперимента (а) и образец, подготовленный к испытаниям в камере трехосного сжатия (б), с установленными датчиками акустической эмиссии:

1 – образец; 2 – верхняя торцевая накладка; 3 – нижняя торцевая накладка; 4 – боковая гидроизоляционная оболочка образца; 5 – канал в верхней торцевой накладке для подачи воды на торец образца; 6 – канал в нижней торцевой накладке для оттока воды, профильтровавшей через образец; F – дифференциальная осевая нагрузка на образец; σ_6 – боковое давление на образец; P_1, P_2 – поровое давление жидкости на входе и выходе из образца

Другим важным направлением лабораторных исследований является изучение акустической эмиссии образцов горных пород в процессе их испытания [36–38]. На практике это позволит повысить уровень детализации результатов геофизических исследований, проводимых при разведке месторождений, за счет установления корреляционных зависимостей между акустическими свойствами горных пород и их структурой. А с точки зрения теоретических результатов – получить объемную картину формирования и развития микро- и макротрещин в теле образца в процессе нагружения с локализацией их мест нахождения. Для реализации этого направления в состав испытательной системы MTS 815 была интегрирована система акустической эмиссии ErgoTech, позволяющая фиксировать акустическую эмиссию образцов горных пород в камере трехосного сжатия и состоящая из следующих основных блоков:

- измерительный блок, полностью интегрированный в камеру трехосного сжатия системы MTS 815 и состоящий из 6 ультразвуковых и 18 датчиков акустической эмиссии (АЭ) (рис. 5, б);
- блок предусилителей акустического сигнала, служащий для усиления сигналов и передачи на систему сбора информации;
- блок генерации, сбора и обработки ультразвуковых импульсов, предназначенный для определения скоростей прохождения волн на контрольных стадиях проведения эксперимента.

Обработка результатов испытаний производится с применением специализированного программного обеспечения PicoScore 6 и ASC InSite. При помощи PicoScore 6 определялись скорости прохождения продольных и поперечных волн на различных этапах нагружения образца. В программе ASC InSite обрабатывались сигналы, пришедшие на акустические датчики, и строились объемные модели изменения локализации сигналов и активности акустической эмиссии для различных стадий испытания образца.

В рамках лабораторных исследований были выполнены испытания образцов песчаников, отобранных с глубин от 3,5 до 4 км месторождения углеводородов. Исследования проводились с моделированием термобарических пластовых условий залегания: температуры, горного и пластового давлений. Принципиальная схема моделирования пластовых условий при проведении испытаний приведена на рис. 5, а.

Процесс проведения испытаний образцов заключался в следующем.

Образцы диаметром 100 мм и высотой 200 мм изготавливались из «полноразмерного» kernового материала. Подготовленные в соответствии с ГОСТ 21153.8 «Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии» образцы помещались в камеру трехосного сжатия. Осуществлялось последовательное повышение со скоростью 1 МПа/мин бокового давления до величины 55 МПа и порового до 30 МПа. Затем в течение двух часов осуществлялось нагревание камеры трехосного сжатия до температуры 100 °С. После выхода на пластовые условия для реализации возможных деформаций ползучести образец

выдерживался до стабилизации показаний с датчиков продольных и поперечных деформаций. Нагружение образцов осевой нагрузкой до разрушения производилось со скоростью деформирования, равной 1 мм/мин. На протяжении всего процесса испытания образца заданные граничные условия поддерживались постоянными. Таким образом, проведение лабораторных испытаний с комплексным моделированием условий залегания пород было максимально приближено к реальным условиям их поведения в горном массиве, в отличие от стандартных методик определения прочностных и деформационных свойств.

Результаты

Результаты проведенных испытаний показали, что образцы одного и того же литотипа пород, отобранные примерно с одинаковых глубин залегания, обладают различными свойствами. Обобщенно их можно подразделить на три группы. Далее описаны характерные особенности поведения данных групп образцов.

На этапе выхода на пластовые условия осуществлялось измерение скоростей прохождения продольных и поперечных волн. На рис. 6 представлены зависимости изменения акустических показателей пород от величины бокового давления. Верхняя группа графиков относится к скоростям продольных волн, нижняя – к скоростям поперечных. Увеличение бокового давления не приводит к существенному увеличению скоростей прохождения ультразвуковых колебаний. Для продольных волн в интервалах боковых давлений от 0 до 55 МПа скорость увеличивается в пределах 5–10 %, для поперечных – еще меньше и составляет 1–5 %. Учитывая тот факт, что величина скорости прохождения ультразвуковых колебаний является косвенной характеристикой показателя плотности материала (горной породы), можно сделать вывод о том, что пластовые условия не оказывают значительного влияния на процессы уплотнения внутреннего пространства образцов по сравнению с нормальными атмосферными.

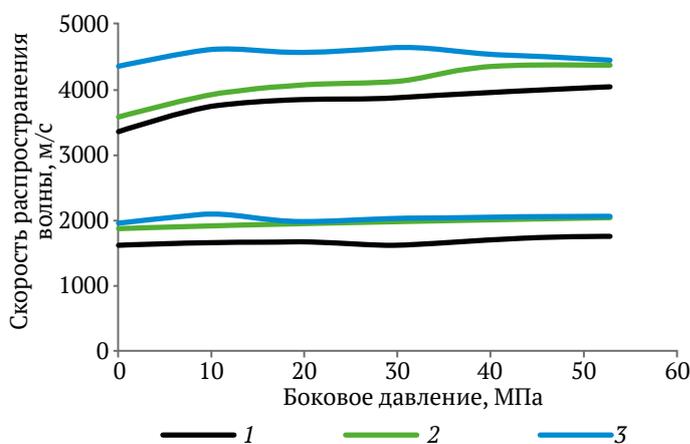


Рис. 6. Зависимости изменения скоростей распространения продольных и поперечных волн от величины бокового давления: 1, 2, 3 – группы образцов песчаника

На рис. 7, а приведены зависимости относительных продольных и поперечных деформаций от дифференциального напряжения при испытании данных групп образцов песчаника в условиях объемного сжатия. Образцы (группа 3) с более высокими значениями скоростей прохождения ультразвуковых волн обладают и более высокими прочностными свойствами. Полученный разброс значений прочности от 80 до 220 МПа, с учетом практически одинаковых условий испытания, позволяет говорить о наличии существенного различия во внутреннем строении образцов. Данный факт также подтверждается и при анализе зависимостей изменения объемных деформаций при нагружении образцов (рис. 7, б). Для образцов с самой низкой прочностью (группа 1) как на всей стадии допредельного, так и начальной стадии запредельного деформирования, характерной особенностью является изменение объема в отрицатель-

ной области. Это может быть объяснено процессами уплотнения и пластического течения, связанными с закрытием внутреннего порового пространства, но проходящими без разрушения скелета пород. Образцы 2-й и 3-й группы такой особенности не имеют, переход из отрицательной к положительной области изменения объема происходит до момента их разрушения. Однако и для них можно выделить отличие, связанное с интенсивностью увеличения объема образцов при значениях напряжений, близких к пределу прочности. Если для образцов 2-й группы отмечается плавное приращение скорости объемных деформаций на всем интервале нагружения, то для образцов 3-й группы интенсивность при подходе к пределу прочности возрастает, а непосредственно само разрушение характеризуется резким скачком значений объемных деформаций. Все это говорит о присутствии структурных отличий в группах образ-

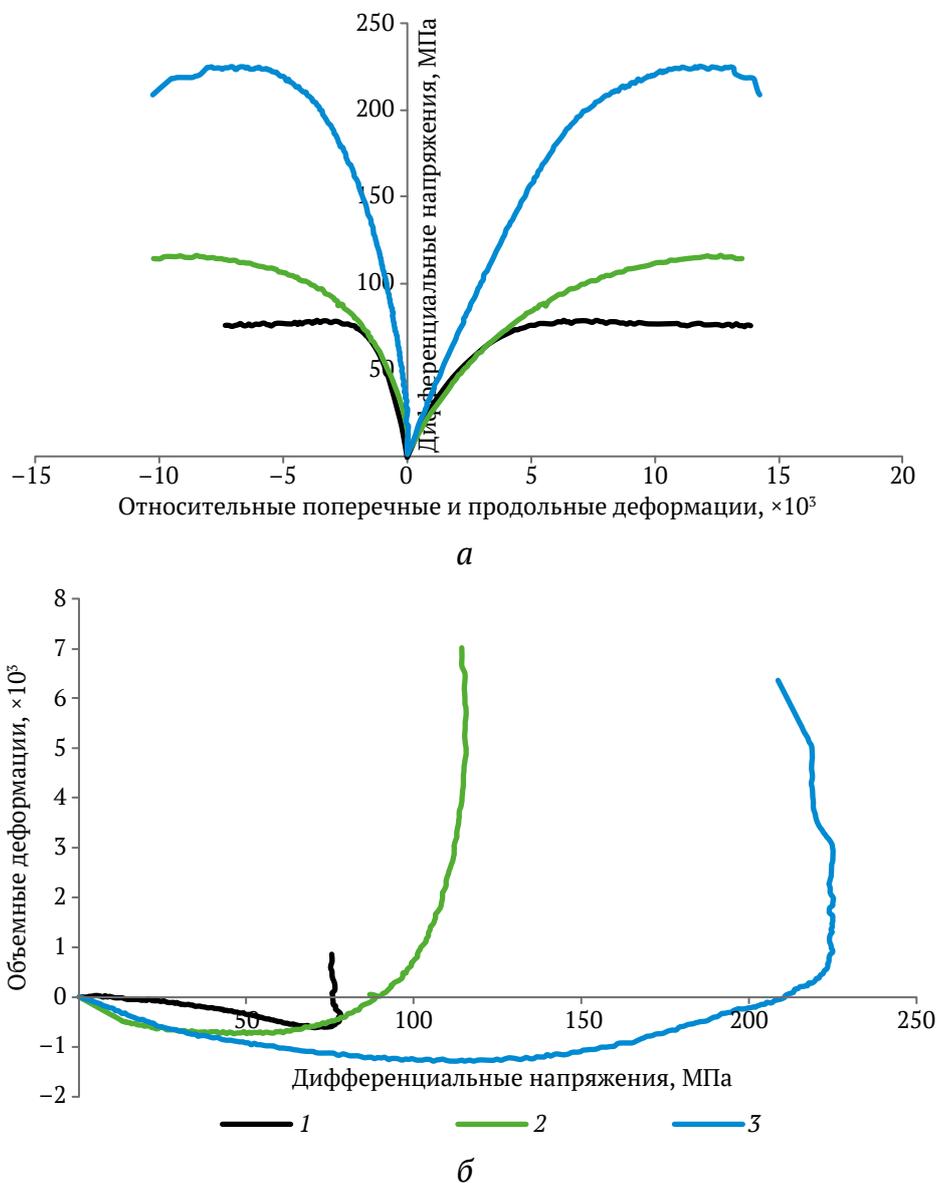


Рис. 7. Графики зависимостей изменения относительных продольных и поперечных деформаций (а) и объемных деформаций (б) от величины дифференциального напряжения при испытании образцов на объемное сжатие: 1, 2, 3 – группы образцов песчаника

цов, связанных не со слагающими их минералами, а с текстурно-структурными особенностями и историческими условиями формирования пласта пород. В развитие этого можно предположить, что образцы 3-й группы имели более однородную начальную внутреннюю структуру, процесс в начале пластического течения, а затем и разрушения в основном развивался за счет превышения возникающих в теле образца напряжений сил внутренних связей частиц. В свою очередь, процесс деформирования и разрушения образцов группы 1 и 2 в большей или меньшей степени происходил за счет наличия внутренних дефектов, слоистости и ее ориентации и т.п.

В рамках ранее проведенных экспериментов [39] была установлена принципиальная возможность использования метода акустической эмиссии для исследования механизмов зарождения и дальнейшего развития микро- и макротрещиноватости в процессе объемного сжатия образцов горных пород. Результаты показали, что система акустической эмиссии горных пород ErgoTech позволяет устанавливать пространственное и временное распределение гипоцентров событий акустической эмиссии с фиксацией амплитудно-частотных характеристик сигналов. На

рис. 8 представлены зависимости интенсивности сигналов акустической эмиссии от дифференциального напряжения для образцов пород одинакового литотипа, испытанных при величине бокового давления 40 МПа. В обоих случаях максимальная интенсивность сигналов приурочена к области значений напряжений, близких к разрушающим, что объясняется образованием диагональной поверхности сдвига, по которой осуществляется последующее разрушение образцов. Однако если для второго образца на протяжении всего нагружения наблюдается планомерное возрастание интенсивности, то у первого образца при величине примерно 50 % от предела прочности присутствует скачок интенсивности сигналов до близких по значению к максимальным. Анализ локации сигналов на данной стадии нагружения показал, что в образце происходило зарождение и развитие поверхности ослабления (трещины), но по достижении определенных значений напряжений ее дальнейший рост прекратился и разрушение реализовалось уже по другой сдвиговой поверхности. Также можно отметить некоторое отличие в локации акустических сигналов на момент разрушения образцов (приведены на рис. 8 в правой части).

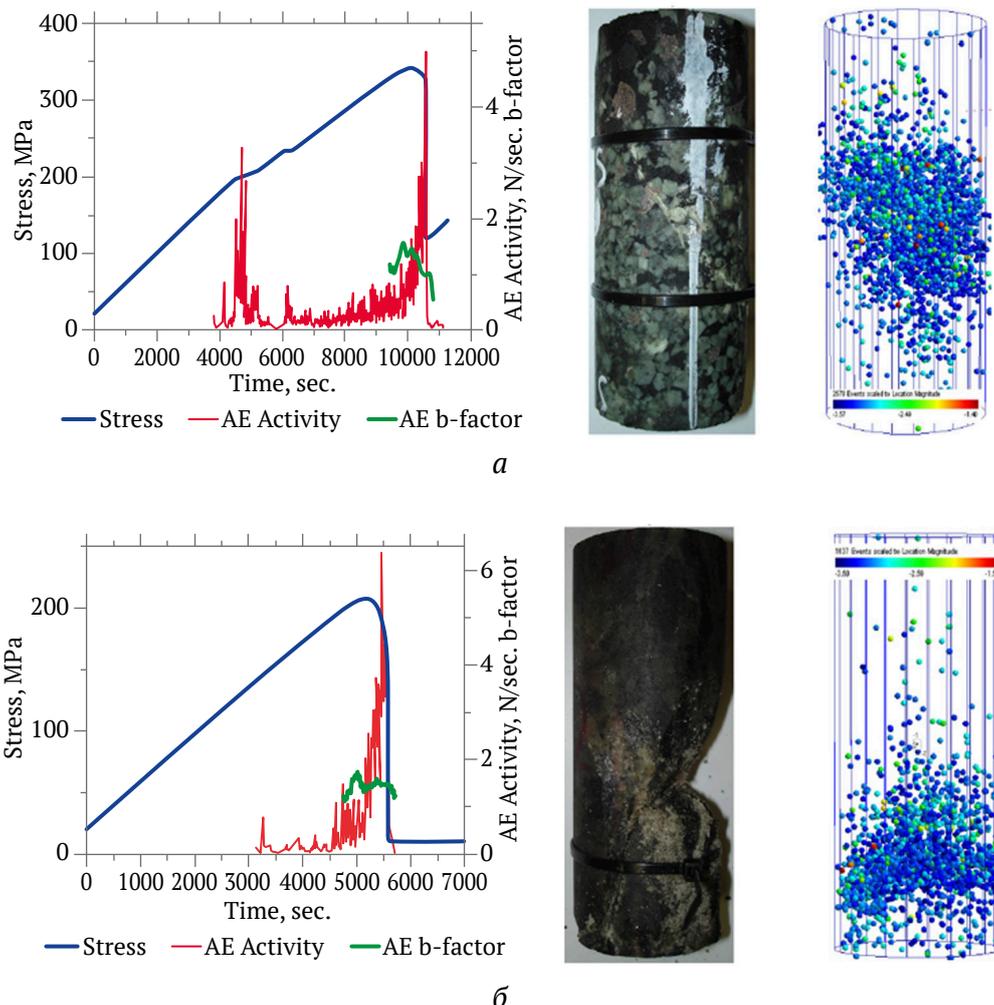


Рис. 8. Результаты испытаний двух образцов пород (а, б) в условиях объемного напряженного состояния с фиксацией акустической эмиссии [14]



Обсуждение результатов

Приведены методические подходы комплексного лабораторного изучения факторов, влияющих на изменение структуры горных пород и включающих вид напряженного состояния, величины главных напряжений, значения порового давления и температуры. Существующая нормативная документация на проведение испытаний образцов горных пород в условиях объемного сжатия не предусматривает воспроизведения комплекса данных факторов в процессе испытаний, что требует внесения дополнительных требований при разработке технического задания к лабораторным исследованиям. Только в этом случае результаты позволят корректно описывать поведение пород-коллекторов в условиях естественного залегания.

Представлены результаты экспериментов по исследованию поведения образцов горных пород с максимальным приближением к естественным условиям залегания пород коллекторов 3,5–4 км. Установлено, что образцы пород одной литологической разности и отобранные практически с одинаковых глубин могут иметь существенные отличия в характере деформирования как в до-, так и запределельной области нагружения. Результаты данных исследований служат исходными данными при разработке и уточнении геомеханических моделей поведения материалов (модель Кулона–Мора, Друкера–Прагера, Хука–Брауна и т.д.), которые учитывают не только прочностные критерии разрушения, но и дилатансионные процессы на различных этапах деформирования пород, описываемые с применением показателя угла дилатансии согласно формуле [40]:

$$\psi = \arcsin \left(\frac{\dot{\varepsilon}_v^p}{-2\dot{\varepsilon}_l^p + \dot{\varepsilon}_v^p} \right),$$

где $\dot{\varepsilon}_v^p$ – скорость пластических объемных деформаций; $\dot{\varepsilon}_l^p$ – скорость пластических главных максимальных нормальных (продольных) деформаций.

Увеличение бокового давления в интервалах от 0 до 55 МПа приводит к относительно незначительному изменению скоростей ультразвуковых колебаний (от 1 до 10 %), что не позволяет судить о необходимости использования данных результатов при косвен-

ной оценке изменения свойств горных пород в массиве. Однако в рамках геофизических исследований учет изменения численных значений скоростей позволит повысить качество интерпретации результатов, что связано с большими геометрическим размерами изучаемых массивов.

Исследования акустической эмиссии пород в сложноподвиженном состоянии позволяют отслеживать процессы пространственного образования и развития микро- и макротрещиноватости на всей стадии нагружения образцов и дают более полное представление об изменении их внутренней структуры.

Заключение

В работе выполнен анализ факторов, оказывающих влияние на процессы структурного изменения образцов горных пород при термобарических условиях, характерных для больших глубин. Это является актуальным направлением научных исследований, направленных на получение новой информации о существующем структурном состоянии горных пород и его изменении, связанном с историей геологического развития месторождения.

Представлены результаты комплексных лабораторных исследований, показывающие необходимость проведения дальнейших более обширных лабораторных исследований для установления количественных зависимостей влияния как единичных факторов, так и их суммарного результирующего влияния на характер деформирования и изменение внутренней структуры горных пород. Для выполнения данных исследований необходимы высококвалифицированные специалисты, специализированное прессовое оборудование и время для проведения эксперимента.

Предложены подходы и методика проведения лабораторных исследований, которые в дальнейшем могут быть использованы при актуализации и разработке новых нормативных документов в области исследования физико-механических свойств пород-коллекторов. Коллектив авторов планирует провести дальнейшие исследования в направлении увеличения диапазонов воздействия температуры и давления на характер поведения пород-коллекторов с использованием различных типов флюидов.

Список литературы

1. Nguyen V.T., Rogachev M.K., Aleksandrov A.N. A new approach to improving efficiency of gas-lift wells in the conditions of the formation of organic wax deposits in the Dragon field. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020;(10):3663–3672. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00976-4>
2. Petrakov D., Kupavykh K., Kupavykh A. The effect of fluid saturation on the elastic-plastic properties of oil reservoir rocks. *Curved and Layered Structures*. 2020;7(1):29–34. <https://doi.org/10.1515/cls-2020-0003>
3. Tananykhin D., Korolev M., Stecyuk I., Grigorev M. An investigation into current sand control methodologies taking into account geomechanical, field and laboratory data analysis. *Resources*. 2021;10(12):125. <https://doi.org/10.3390/resources10120125>
4. Litvinenko V.S., Vasiliev N.I., Lipenkov V.Y., Dmitriev A.N. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2014;55(68):173–178. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A040>
5. Павлович А.А., Коршунов В.А., Бажуков А.А., Мельников Н.Я. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом. *Записки Горного института*. 2019;239:502–509. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.502>



6. Kochneva O.E., Nefedov U.V., Fedorov N.V. Establishing the correlation between reservoir properties and facies features of the Bashkir sediments of the Gagarinskoye field (Russian). *Oil Industry Journal*. 2019;(2):24–27. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-2-24-27>
7. Казанцева Т.Т. О геодинамической концепции генезиса углеводородов. *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*. 2012;17(1):5–13.
8. Камалетдинов М.А., Исмагилов Р.А. О некоторых результатах научных исследований по нефтяной геологии. *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*. 2011;(4):16–22.
9. Кучеров В.Г. Генезис углеводородов и образование залежей нефти и природного газа. *Вести газовой науки*. 2013;1(12): 86–91.
10. Захарова С.С. Основные концепции происхождения нефти и газа. *Наука и техника в Якутии*. 2003;(1):16–22.
11. Egorov A.S., Prischepa O.M., Nefedov Y.V. et al. Deep structure, tectonics and petroleum potential of the western sector of the Russian arctic. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(3):258. <https://doi.org/10.3390/jmse9030258>
12. Прищепа О.М., Боровиков И.С., Грохотов Е.И. Нефтегазоносность малоизученной части северо-запада Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции по результатам бассейнового моделирования. *Записки Горного института*. 2021;247:66–81. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.8>
13. Кучеров В.Г., Герасимова И.А. Генезис нефти и природного газа: конкуренция парадигм. *Вопросы философии*. 2019;(12):106–117. <https://doi.org/10.31857/S004287440007530-8>
14. Герасимова И.А. Генезис нефти и газа как проблема трансдисциплинарных исследований. *Эпистемология и философия науки*. 2020;57(3):125–141. <https://doi.org/10.5840/eps202057346>
15. Дмитриевский А.Н. Полигенез нефти и газа. *Доклады Академии наук*. 2008;419(3):373–377. (Перев. вер.: Dmitrievskii A.N. Polygenesis of oil and gas. *Doklady Earth Sciences*. 2008;419(2):373–377. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08030033>)
16. Огаджанов В.А., Керимов А.А., Мамедова В.А. Термобарические критерии прогнозирования перспектив нефтегазоносности на месторождении б. Жданова. *Известия вузов. Нефть и газ*. 1988;(8):62–66.
17. Рыжов А.Е., Жуков В.С., Иселидзе О.В., Григорьев Е.Б. Влияние пластовых термобарических условий на петрофизические характеристики образцов горных пород ачимовской толщи. *Вести газовой науки*. 2010;(1):145–156.
18. Середин В.В., Хрулев А.С. Изменения температуры образцов горных пород и геоматериалов при их разрушении. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(4):63–69. (Перев. вер.: Seredin V.V., Khrulev A.S. Variations of temperature in specimens of rocks and geomaterials under failure. *Journal of Mining Science*. 2016;54(4):683–688. <https://doi.org/10.1134/S1062739116041081>)
19. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Kuznetsov V. Thermodynamic and experimental substantiation of the possibility of formation and extraction of organometallic compounds as indicators of deep naphthogenesis. *Energies*. 2023;16(9):3862. <https://doi.org/10.3390/en16093862>
20. Карасев М.А., Тай Н.Т. Метод прогноза напряженного состояния обделки подземных сооружений квазипрямоугольной и арочной форм. *Записки Горного института*. 2022;257:807–821. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.17>
21. Kochneva O.E., Nefedov U.V., Fedorov N.V. Establishing the correlation between reservoir properties and facies features of the Bashkir sediments of the Gagarinskoye field (Russian). *Oil Industry Journal*. 2019;(2):24–27. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-2-24-27>
22. Котлов С.Н., Шамшев А.А. Численное геофильтрационное моделирование горизонтальных дренажных скважин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(6):45–55. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-45-55>
23. Zhang P., Mishra B., Heasley K.A. Experimental investigation on the influence of high pressure and high temperature on the mechanical properties of deep reservoir rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015;(48):2197–2211. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0718-x>
24. Гладков Е.А., Ерофеев Л.Я., Карпова Е.Г. и др. Геомеханическое изменение залежей углеводородов при их деформационно-метасоматическом преобразовании. *Территория Нефтегаз*. 2016;(3):132–138.
25. Abdelazim R. An integrated approach for relative permeability estimation of fractured porous media: laboratory and numerical simulation studies. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020;10:1–18. <https://doi.org/10.1007/s13202-016-0250-x>
26. Adenutsi C.D., Li Z., Lai F., Hama A.E., Aggrey W.N. Pore pressure variation at constant confining stress on water–oil and silica nanofluid–oil relative permeability. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2019;9:2065–2079. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0605-6>
27. Brace W.F., Walsh J.B., Frangos W.T. Permeability of granite under high pressure. *Journal of Geophysical research*. 1968;73(6):2225–2236. <https://doi.org/10.1029/JB073I006P02225>
28. Pollard D.D. Theoretical displacements and stresses near fractures in rock: with applications to faults, joints, veins, dikes, and solution surfaces. *Fracture Mechanics of Rock*. 1987:277–349. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-066266-1.50013-2>



29. Zhang X.P., Wong L.N.Y. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression: a numerical study based on parallel bonded-particle model approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012;(45):711–737. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0176-z>

30. Тиаб Дж. *Петрофизика. Теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов*. Пер. с англ. 2-е изд. М.: Премиум инжиниринг; 2011. (Orig. ver.: Tiab Dj. *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. 2nd ed. Boston: Gulf Professional Pub.; 2004)

31. Хашпер А.Л., Аминев Т.Р., Федоров А.И., Жонин А.В. Исследование зависимости проницаемости горной породы от ее напряженно-деформированного состояния. *Геологический вестник*. 2019;(1):133–140. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-10>

32. Цай Б.Н., Бондаренко Т.Т., Бахтыбаев Н.Б. О дилатансии горных пород при их разрушении. *Вестник КазНТУ*. 2008;(5):21–36.

33. Белоконь А.В. Моделирование тектонической и температурной истории района бурения Тимано-Печорской глубокой опорной скважины. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело*. 2000;(3):71–76.

34. Томкина А.В. Термобарические условия в сверхглубоких депрессиях Северного Кавказа. В: Маркевич В.П. (отв. ред.) *Термобарические условия и геологоразведочные работы в сверхглубоких депрессиях*. М.: Наука; 1981. С. 13–26.

35. Тимурзиев А.И., Ластовецкий В.П. Количественная оценка параметров напряженно-деформированного состояния горных пород для выделения участков относительного растяжения (разуплотнения) и повышенной трещиноватости по результатам математического моделирования (на примере Еты-Пуровского полигона). Часть 1. *Глубинная нефть*. 2014;2(9):1499–1543.

36. Ельцов И.Н., Назаров Л.А., Назарова Л.А. и др. Интерпретация геофизических измерений в скважинах с учетом гидродинамических и геомеханических процессов в зоне проникновения. *Доклады академии наук*. 2012;445(6):677–677.

37. Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1993;30(7):883–899. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90041-B](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90041-B)

38. Armstrong B.H. Acoustic emission prior to rockbursts and earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1969;59(3):1259–1279.

39. Rozanov A., Petrov D., Gladyr A., Korchak P. Acoustic emission analysis of brittle and ductile behavior of rocks at critical stresses. In: *82nd EAGE Annual Conference & Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers*. 2021;2021(1):1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202011927>

40. Vermeer P.A., de Borst R. Non associated plasticity for soils, concrete and rock. *Heron*. 1984;29(3):51–64.

References

1. Nguyen V.T., Rogachev M.K., Aleksandrov A.N. A new approach to improving efficiency of gas-lift wells in the conditions of the formation of organic wax deposits in the Dragon field. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020;(10):3663–3672. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00976-4>

2. Petrakov D., Kupavykh K., Kupavykh A. The effect of fluid saturation on the elastic-plastic properties of oil reservoir rocks. *Curved and Layered Structures*. 2020;7(1):29–34. <https://doi.org/10.1515/cls-2020-0003>

3. Tananykhin D., Korolev M., Stecyuk I., Grigorev M. An investigation into current sand control methodologies taking into account geomechanical, field and laboratory data analysis. *Resources*. 2021;10(12):125. <https://doi.org/10.3390/resources10120125>

4. Litvinenko V.S., Vasiliev N.I., Lipenkov V.Y., Dmitriev A.N. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2014;55(68):173–178. <https://doi.org/10.3189/2014AoG68A040>

5. Pavlovich A.A., Korshunov V.A., Bazhukov A.A., Melnikov N.Y. Estimation of rock mass strength in open-pit mining. *Journal of Mining Institute*. 2019;239:502–509. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.502>

6. Kochneva O.E., Nefedov U.V., Fedorov N.V. Establishing the correlation between reservoir properties and facies features of the Bashkir sediments of the Gagarinskoye field (Russian). *Oil Industry Journal*. 2019;(2):24–27. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-2-24-27>

7. Kazantseva T.T. The geodynamic concept of oil genesis. *Herald of the Russian Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2012;17(1):5–13. (In Russ.)

8. Kamaletdinov M.A., Ismagilov R.A. On some scientific results of petroleum geological investigations. *Herald of the Russian Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2011;(4):16–22. (In Russ.)

9. Kutcherov V.G. The genesis of hydrocarbons and the formation of deposits of oil and natural gas. *Vesti Gazovoi Nauki*. 2013;1(12): 86–91. (In Russ.)

10. Zakharova S.S. Basic concepts of the origin of oil and gas. *Nauka i Tekhnika v Yakutii*. 2003;(1):16–22. (In Russ.)



11. Egorov A.S., Prischepa O.M., Nefedov Y.V. et al. Deep structure, tectonics and petroleum potential of the western sector of the Russian arctic. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(3):258. <https://doi.org/10.3390/jmse9030258>
12. Prishchepa O.M., Borovikov I.S., Grokhotov E.I. Oil and gas content of the understudied part in the northwest of the Timan-Pechora oil and gas province according to the results of basin modeling. *Journal of Mining Institute*. 2021;247:66–81. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.8>
13. Kutcherov V., Gerasimova I. Petroleum genesis: competition of paradigms. *Voprosy Filosofii*. 2019;(12):106–117. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S004287440007530-8>
14. Gerasimova I.A. Petroleum genesis as a problem of transdisciplinary research. *Epistemology & Philosophy of Science*. 2020;57(3):125–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.5840/eps202057346>
15. Dmitrievskii A.N. Polygenesis of oil and gas. *Doklady Earth Sciences*. 2008;419(2):373–377. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08030033> (Orig. ver.: Dmitrievskii A.N. Polygenesis of oil and gas. *Doklady Akademii Nauk*. 2008;419(3):373–377. (In Russ.))
16. Ogadzhanov V.A., Kerimov A.A., Mamedova V.A. Thermobaric criteria for predicting oil and gas prospects at the former Zhdanov field. *Izvestiâ vysshîh učebnykh zavedenij. Neft' i gaz*. 1988;(8):62–66. (In Russ.)
17. Ryzhov A.E., Zhukov V.S., Iselidze O.V., Grigoriev E.B. Influence of reservoir thermobaric conditions on the petrophysical characteristics of rock samples of the Achimov strata. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2010;(1):145–156. (In Russ.)
18. Seredin V.V., Khrulev A.S. Variations of temperature in specimens of rocks and geomaterials under failure. *Journal of Mining Science*. 2016;54(4):683–688. <https://doi.org/10.1134/S1062739116041081> (Orig. ver.: Seredin V. V., Khrulev A. S. Variations of temperature in specimens of rocks and geomaterials under failure. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2016;(4):63–69. (In Russ.))
19. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Kuznetsov V. Thermodynamic and experimental substantiation of the possibility of formation and extraction of organometallic compounds as indicators of deep naphthogenesis. *Energies*. 2023;16(9):3862. <https://doi.org/10.3390/en16093862>
20. Karasev M.A., Nguyen T.T. Method for predicting the stress state of the lining of underground structures of quasi-rectangular and arched forms. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:807–821. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.17>
21. Kochneva O.E., Nefedov U.V., Fedorov N.V. Establishing the correlation between reservoir properties and facies features of the Bashkir sediments of the Gagarinskoye field (Russian). *Oil Industry Journal*. 2019;(2):24–27. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-2-24-27>
22. Kotlov S.N., Shamshev A.A. Numerical geo-flow modeling of horizontal drainage holes. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;(6):45–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-45-55>
23. Zhang P., Mishra B., Heasley K.A. Experimental investigation on the influence of high pressure and high temperature on the mechanical properties of deep reservoir rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015;(48):2197–2211. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0718-x>
24. Gladkov E.A., Erofeyev L.Ya., Karpova E.G. et al. Geomechanical change of hydrocarbon deposits during their deformational metasomatic alterations. *Territorija Neftegaz*. 2016;(3):132–138. (In Russ.)
25. Abdelazim R. An integrated approach for relative permeability estimation of fractured porous media: laboratory and numerical simulation studies. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020;10:1–18. <https://doi.org/10.1007/s13202-016-0250-x>
26. Adenutsi C.D., Li Z., Lai F., Hama A.E., Aggrey W.N. Pore pressure variation at constant confining stress on water–oil and silica nanofluid–oil relative permeability. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2019;9:2065–2079. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0605-6>
27. Brace W.F., Walsh J.B., Frangos W.T. Permeability of granite under high pressure. *Journal of Geophysical research*. 1968;73(6):2225–2236. <https://doi.org/10.1029/JB0731006P02225>
28. Pollard D.D. Theoretical displacements and stresses near fractures in rock: with applications to faults, joints, veins, dikes, and solution surfaces. *Fracture Mechanics of Rock*. 1987:277–349. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-066266-1.50013-2>
29. Zhang X.P., Wong L.N.Y. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression: a numerical study based on parallel bonded-particle model approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012;(45):711–737. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0176-z>
30. Tiab Dj. *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. 2nd ed. Boston: Gulf Professional Pub.; 2004.
31. Khashper A.L., Aminev T.R., Fedorov A.I., Zhonin A.V. Research of dependence of rock permeability on its stress-strain state. *Geologicheskii Vestnik*. 2019;(1):133–140. (In Russ.) <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-10>
32. Tsai B.N., Bondarenko T.T., Bakhtybaev N.B. On the dilatancy of rocks during their destruction. *Vestnik Satbayev University*. 2008;(5):21–36. (In Russ.)
33. Belokon A.V. Modeling of tectonic and temperature history of the drilling area of the Timan-Pechora deep reference well. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Politehnicheskogo Universiteta. Geologiya. Neftegazovoye i Gornoye Delo*. 2000;(3):71–76. (In Russ.)



34. Tomkina A.V. Thermobaric conditions in ultra-deep depressions of the North Caucasus. In: Markevich V.P. (ed.) *Thermobaric Conditions and Geological Exploration in Ultra-Deep Depressions*. Moscow: Nauka Publ.; 1981. Pp. 13–26.
35. Timurziev A.I., Lastovetskii V.P. Quantitative assessment of parameters of stress- deformation state of rocks for allocation of areas of the relative extension (dilatation) and the hyperfracturing zones by results of mathematical modelling (on example of Ety-Purovsky oilfield polygon). Part 1. *Glubinnaya Neft'*. 2014;2(9):1499–1543. (In Russ.)
36. Eltsov I.N., Nazarov L.A., Nazarova L.A. et al. Interpretation of geophysical measurements in wells taking into account hydrodynamic and geomechanical processes in the penetration zone. *Reports of the Academy of Sciences*. 2012;445(6):677–677. (In Russ.)
37. Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1993;30(7):883–899. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90041-B](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90041-B)
38. Armstrong B.H. Acoustic emission prior to rockbursts and earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1969;59(3):1259–1279.
39. Rozanov A., Petrov D., Gladyr A., Korchak P. Acoustic emission analysis of brittle and ductile behavior of rocks at critical stresses. In: *82nd EAGE Annual Conference & Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers*. 2021;2021(1):1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202011927>
40. Vermeer P.A., de Borst R. Non associated plasticity for soils, concrete and rock. *Heron*. 1984;29(3):51–64.

Информация об авторах

Михаил Дмитриевич Ильинов – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией физико-механических свойств и горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-2185-8638](https://orcid.org/0009-0007-2185-8638); e-mail ilinov_md@spmi.ru

Дмитрий Николаевич Петров – кандидат технических наук, доцент кафедры Строительства горных предприятий и подземных сооружений, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5513-1871](https://orcid.org/0000-0002-5513-1871), Scopus ID [56672478800](https://scopus.org/authorid/56672478800); e-mail kaf-sgp@spmi.ru

Даниил Александрович Карманский – ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-3214-5322](https://orcid.org/0000-0002-3214-5322), Scopus ID [57209507897](https://scopus.org/authorid/57209507897); e-mail Karmanskij_DA@pers.spmi.ru

Александр Александрович Селихов – аспирант кафедры Строительства горных предприятий и подземных сооружений, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0009-0005-8163-2249](https://orcid.org/0009-0005-8163-2249); e-mail s225059@stud.spmi.ru

Information about the authors

Mikhail D. Ilyinov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory of Physical and Mechanical Properties and Rocks, Scientific Center of Geomechanics and Problems of Mining Production, Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0009-0007-2185-8638](https://orcid.org/0009-0007-2185-8638); e-mail ilinov_md@spmi.ru

Dmitry N. Petrov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction of Mining Enterprises and Underground Structures, Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5513-1871](https://orcid.org/0000-0002-5513-1871), Scopus ID [56672478800](https://scopus.org/authorid/56672478800); e-mail kaf-sgp@spmi.ru

Daniil A. Karmanskiy – Leading Engineer of the Research Laboratory of Physical and Mechanical Properties and Destruction of Rocks, Scientific Center of Geomechanics and Problems of Mining Production, Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-3214-5322](https://orcid.org/0000-0002-3214-5322), Scopus ID [57209507897](https://scopus.org/authorid/57209507897); e-mail Karmanskij_DA@pers.spmi.ru

Alexander A. Selikhov – PhD-Student, Department of Construction of Mining Enterprises and Underground Structures, Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0009-0005-8163-2249](https://orcid.org/0009-0005-8163-2249); e-mail s225059@stud.spmi.ru

Поступила в редакцию 01.09.2023
Поступила после рецензирования 22.09.2023
Принята к публикации 25.09.2023

Received 01.09.2023
Revised 22.09.2023
Accepted 25.09.2023



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-30>

УДК 627.431

**Моделирование устойчивости ограждающих сооружений золоотвала**

О. Г. Бесимбаева , Е. Н. Хмырова , Е. А. Олейникова , А. Е. Касымжанова

Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан *hmyrova@mail.ru***Аннотация**

Складирование золошлаковых материалов, удаляемых из котельных помещений ТЭЦ «Теплоэлектроцентраль» при помощи гидротранспорта, производится в золоотвалы: специально организованные участки местности, по границам которых, в зависимости от рельефа, возводятся ограждающие дамбы либо по всему периметру золоотвала, либо только на отдельных пониженных участках. Ограждающие дамбы гидротехнических сооружений должны обладать устойчивостью всего сооружения на сдвиг; устойчивостью откосов на оползание; фильтрационной прочностью грунта тела сооружения; надежностью защиты откосов от возможных разрушений в результате действия атмосферных осадков, а также от волнового воздействия воды (в пределах отстойного пруда); достаточным превышением гребня дамбы над уровнем воды пруда и т.д. Основное внимание в исследовании сконцентрировано на вопросах проектирования ограждающих сооружений золошлаковых материалов, удаляемых из котельных помещений Карагандинской ТЭЦ при помощи гидротранспорта. При проектировании золоотвала решаются многие задачи, в том числе определяются местоположение, конструктивные особенности и тип ограждающих сооружений, площадь зеркала и объем складированных хвостов, прочность сооружений ограждающих дамб и т.д. С целью оценки состояния проектируемого золоотвала выполнен анализ устойчивости откосов ограждающей дамбы для различных сочетаний нагрузок, условий возможной обводненности дамбы, наличия «геомембраны» и порового давления. Расчетная программа, основанная на методе конечных элементов, позволяет моделировать состояние массива в соответствии с прочностными и деформационными характеристиками насыпных грунтов тела дамбы и грунтов пород основания. Коэффициент устойчивости внешних откосов гидротехнических сооружений определяется с учетом класса и конструкции сооружения, типа основания, ответственности расчетного технологического этапа и других факторов исходя из условий, обеспечивающих предупреждение наступления предельных состояний. На основании анализа геологического строения основания проектируемого гидротехнического сооружения выбраны наиболее ответственные и характерные поперечные расчетные сечения по периметру ограждающих дамб золоотвала. Согласно выполненным расчетам внешние откосы дамбы по линиям скважин № 373-19, № 381-19, которые являются характерными практически по всей длине ограждающей дамбы, являются устойчивыми для разных сочетаний нагрузок.

Ключевые слова

Карагандинская ТЭЦ, золоотвал, дамба, конструкция, откосы, устойчивость, моделирование, грунт, метод конечных элементов, нагрузка, коэффициент запаса, кривая депрессии, градиент напора

Для цитирования

Bessimbayeva O.G., Khmyrova E.N., Oleinikova E.A., Kasymzhanova A.E. Simulation of ash dump embankment stability. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):303–312. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-30>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Simulation of ash dump embankment stability

O. G. Bessimbayeva , E. N. Khmyrova , E. A. Oleinikova , A. E. Kasymzhanova

Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan *hmyrova@mail.ru***Abstract**

Ash and slag materials are removed from boiler rooms of CHP “Combined Heat and Power Plant” (Теплоэлектростанция) by hydraulic transport and disposed in ash dumps. These are specially organized areas encircled by protective dams depending on the relief either along the entire perimeter or only in certain low-lying areas. The dams of hydraulic structures must provide stability to the whole structure against the following factors: shear; stability of slopes against sliding; filtration resistance of a dam body soils; reliable slope protection against possible failure due to atmospheric precipitation; as well as against wave action of



water (within a settling pond); sufficient excess of dam crest over water level of a pond, etc. The study focuses on the design of ash and slag dump embankment (for storage of the ash and slag removed from the boiler rooms of Karaganda CHP by hydraulic transport). Ash dump design requires a broad range of problems to be solved. These include determination of location, design features and type of embankment, area of the basin and volume of the stored waste, strength of the embankment structures, etc. In order to assess the condition of the ash dump design, the stability of the facility embankment slopes for different combinations of loads, the conditions of possible watering of the dams, the presence of “geomembrane”, and pore pressure need to be analysed. A software program based on the finite element method allows simulation of ground (soil) conditions based on the strength and strain characteristics of the dam body filling soils and the base soils. Safety factors of the outer (downstream) slopes of hydraulic structures is determined taking into account the category and design of a structure, type of base (foundation), criticality of the design process stage, and other factors on the basis of conditions that ensure the prevention of the onset of limit states. The most critical and characteristic cross-sections across the perimeter of the ash dump embankment were selected for the computations, based on the analysis of the designed hydraulic structure base lithological composition. According to the computations performed, the outer slopes of the embankment at the paths of wells No. 373-19, No. 381-19, characteristic of almost the entire length of the embankment, are stable for different combinations of loads.

Keywords

Karaganda CHP, ash dump, embankment, structure, slopes, stability, simulation, soil, finite element method, load, factor of safety, drawdown curve, head gradient

For citation

Bessimbayeva O.G., Khmyrova E.N., Oleinikova E.A., Kasymzhanova A.E. Simulation of ash dump embankment stability. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):303–312. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-30>

Введение

Гидротехнические сооружения имеют ряд особенностей, поэтому они значительно отличаются от других инженерных сооружений, их размеры, компоновка, типы отдельных элементов существенно зависят от местных условий: топографии местности, гидрогеологических условий, геологического строения основания и т.п.

Ограждающие дамбы гидротехнических сооружений должны обладать устойчивостью всего сооружения на сдвиг; устойчивостью откосов на оползание; фильтрационной прочностью грунта тела сооружения; надежностью защиты откосов от возможных разрушений в результате действия атмосферных осадков, а также от волнового воздействия воды (в пределах отстойного пруда); достаточным превышением гребня дамбы над уровнем воды пруда и др. [1].

Проектные решения по возведению ограждающих сооружений

Складирование золошлаковых материалов, удаляемых из котельных помещений ТЭЦ при помощи гидротранспорта, производится в золоотвалы: специально организованные участки местности, по границам которых, в зависимости от рельефа, возводятся ограждающие дамбы либо по всему периметру золоотвала, либо только на отдельных пониженных участках.

В рабочем проекте по строительству 1-й секции золоотвала Карагандинской ТЭЦ была принята отметка высоты гребня 534,6 м, ширина гребня 8,0 м. Максимальный уровень заполнения чаши золоотвала, по проектным прогнозам, может достигать отметки 533,1 м. Проектная высота дамбы с внутренней стороны чаши – 12 м, с коэффициентом откоса $m = 1 : 4$. Высота дамбы с внешней стороны изменяется в зависимости от рельефа местности с коэффициентом откоса дамбы $m = 1 : 2,5$.

По результатам инженерно-геологических исследований, выполненных ТОО «GeolProject и К» в 2019 г., в соответствии с ГОСТ 25100–2011 и ГОСТ 20522–2012 выявлено, что в толще вскрытых пород принимают участие отложения верхнедевонского возраста фаменского яруса (D3fm), элювиальные отложения верхнедевонского фаменского яруса (el(D3fm)), неогенового возраста (N) и четвертичного возраста (Q), перекрытые с дневной поверхности почвенно-растительным слоем и современными техногенными отложениями.

Породы верхнедевонского возраста фаменского яруса (D3fm) представлены песчаниками: скальными и полускальными. Элювий пород верхнедевонского фаменского яруса (el(D3fm)) представлен корой выветривания: щебенистым грунтом, щебенисто-дресвяным грунтом с супесчаным заполнителем, щебенисто-дресвяным грунтом с суглинистым заполнителем.

На основании анализа пространственной изменчивости частных показателей свойств грунтов и с учетом особенностей геолого-литологического строения в разрезе выделены 3 слоя: 1-й слой – почвенно-растительный; 2-й слой – илистые отложения; 3-й слой – насыпной грунт $t(qiv)$; а по степени водопроницаемости 7 слоев инженерно-геологических элементов ИГЭ: 1-й ИГЭ – суглинок; 2-й ИГЭ – супесь; 3-й ИГЭ – глина; 4-й ИГЭ – щебенисто-дресвяный грунт eld3fm; 5-й ИГЭ – дресвяный грунт eld3fm; 6-й ИГЭ – щебенистый грунт eld3fm; 7-й ИГЭ – скальный грунт (песчаник) d3fm.

Гидрогеологические условия участка работ: по данным бурения воды вскрыты на глубинах 2,00–5,5 м. Абсолютные отметки установившегося уровня 519,05–524,87 м. В условиях естественного режима уровень грунтовых вод подвержен сезонным колебаниям: минимальное стояние отмечается в марте, максимальное приходится на начало мая.

Питание грунтовых вод происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, а в весенний пери-



од – талых и паводковых вод. Областью питания служит область распространения водоносного горизонта.

Амплитуда колебания уровня в исследуемом районе составляет 1,0–1,5 м. В отдельные годы с большим количеством осадков может составлять 2,0–3,0 м.

Нормативная глубина промерзания по СП РК 5.01-102-2013 «Основания зданий и сооружений»: суглинки и глины – 1,41 м; супеси и пески пылеватые – 1,72 м; пески гравелистые, крупные и средней крупности – 1,84 м; крупнообломочные грунты – 2,09 м. Средняя глубина промерзания «0» в грунт – 1,77 м.

Прочностные и деформационные характеристики грунтов определялись исследованиями, проведенными ТОО «Азимут Геология» – химико-аналитической лабораторией г. Караганды.

В проекте для снижения фильтрации через тело дамбы принято решение по укладке геомембраны, являющейся водонепроницаемым «экраном», который будет покрывать верховой откос дамбы и дно чаши золоотвала.

Рабочим проектом планируется произвести осушение площади золоотвала, отвод воды и планировку дна чаши до отметки 522,6 м. При этом первоначально планируется снимать почвенно-плодородный слой почвы, илистые отложения и верхний слой грунтов до проектной отметки в соответствии с требованиями СП РК 3.04-103-2014 «Основания гидротехнических сооружений».

В зависимости от рельефа местности и литологической разности залегающих грунтов будут сниматься разные слои грунтов: от суглинков до глинистых отложений [2, 3].

Проектом предусматривается отсыпать тело дамбы из грунтов, снятых при планировке, наиболее соответствующих требованиям СП РК 3.04-105-2014 «Плотины из грунтовых материалов», к которым относятся супесчаные и суглинистые грунты. Анализ результатов инженерно-геологических изысканий, проведенных ТОО «GeolProject и К» в 2019 г., показал, что наиболее подходящими являются отложения четвертичного возраста Q, представленные суглинком бурого цвета и супесью¹.

Согласно материалам отчета «Инженерно-геологические изыскания для проектирования золоотвала Карагандинской ТЭЦ» ниже приведены характеристики грунтов, которые планируется использовать при возведении тела ограждающих дамб.

Прочностные и деформационные характеристики для слоя 1-го ИГЭ – суглинка – определялись при природной влажности. Частные значения характеристик прочностных свойств суглинка при естественной влажности, а также плотности подвергались статистической обработке (согласно требованиям ГОСТ 20522–2012). Полученные в результате значения² приведены в табл. 1.

¹ Отчет «Инженерно-геологические изыскания для проектирования золоотвала Карагандинской ТЭЦ», выполненного ТОО «GeolProject и К» в 2019 г.

Программа инженерно-геологических изысканий, выполненных ТОО «GeolProject и К» в 2019 г.

² Там же.

Таблица 1

Прочностные и деформационные характеристики слоев

Наименование характеристик	Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление, МПа	Плотность грунтов, г/см ³
1-й ИГЭ – суглинок	22,39	0,060	2,02
2-й ИГЭ – супесь	17,24	0,013	1,97

Модули деформации по данным лабораторных испытаний при естественной влажности изменяются от 6,17 до 13,96 МПа, со средним значением 8,23 МПа.

Слой 2-го ИГЭ – супеси – характеризуется физическими значениями, приведенными в табл. 1.

Для образования основной части тела земляной насыпной плотины [1] пригодны все виды грунта за исключением следующих:

1) содержащих неполностью разложившиеся органические вещества (остатки растений) в количестве более 5 % по массе или полностью разложившиеся вещества, находящиеся в аморфном состоянии, в количестве более 8 % по массе³;

2) содержащих водорастворимые включения в виде солей хлоридных и сульфатно-хлоридных в количестве более 5 % по массе или солей сульфатных в количестве более 2 % по массе; впрочем, такого рода грунты могут укладываться в ту часть плотины, которая не подвергается воздействию фильтрующей воды.

В проекте принято устройство однослойного экрана с одним противодиффузионным элементом в виде полимерного полотнища (геомембраны) и защитным слоем над ним. Экран планируется укладывать на верховой откос дамбы и дно чаши золоотвала.

Однослойный экран включает:

- подстилающий слой из грунта;
- противодиффузионный элемент, представляющий собой соединенное из рулонных изделий полимерное полотнище;
- защитный слой из грунта.

Для предотвращения механических воздействий на защитный слой грунта (волновых, ледовых и др.) поверх него на откосах дамбы предусматривается дополнительная защита из каменной наброски⁴ [2].

³ МСП 3.04-101-2005 Определение основных расчетных гидрологических характеристик.

⁴ СП РК 3.04-105-2014 «Плотины из грунтовых материалов».

СП РК 3.04-101-2013 «Гидротехнические сооружения». СНиП РК 3.04-40-2006 «Нагрузки и воздействия (волновые, ледовые и от судов) на гидротехнические сооружения». СП РК 3.04-103-2014 «Основания гидротехнических сооружений».

СП РК 2.03-30-2017 «Строительство в сейсмических районах РК».

СНиП РК 3.02-05-2010 «Автоматизированная система мониторинга зданий и сооружений».



С целью оценки состояния устойчивости откосов проектируемого золоотвала выполнены расчеты устойчивости откосов ограждающей дамбы для различных сочетаний степени нагрузок, условий возможной обводненности дамбы, наличия «геомембраны» и порового давления.

Моделирование устойчивости проектируемого сооружения

Для обоснования параметров устойчивых откосов ограждающих дамб требуется детальное изучение всех факторов, влияющих на процесс сдвижения пород насыпного сооружения, при этом решающее значение имеет выбор способа расчета, который отведет бы конкретным горно-геологическим условиям и физико-механическим свойствам пород, слагающих тело дамб и их основания. При расчетах следует использовать методы, удовлетворяющие условиям равновесия призмы обрушения и ее элементов в предельном состоянии и учитывающие напряженное состояние сооружения и его основания.

Для оценки состояния устойчивости откосов дамбы золоотвала использовалась программа, основанная на методе конечных элементов [3], которая позволяет моделировать состояние массива в соответствии с прочностными и деформационными характеристиками насыпных грунтов тела дамбы и грунтов литологической разности пород основания. Приложения программы «Phase2» автоматически сопоставляют напряжения с прочностными свойствами грунтов и с помощью определенных процедур обеспечивают соответствие картины напряжений условиям равновесия и заданным свойствам грунтов.

Достоинством метода конечных элементов [4] является возможность исследования областей любой конфигурации и учета разнообразных свойств грунтов, каждое из которых уникально по граничным условиям и характеристикам среды; возможность произвольной дискретизации исследуемой области, т.е. в ожидаемых местах высоких градиентов исследуемых параметров можно выполнить сгущение сети конечных элементов.

По результатам, полученным на основании анализа топографии местности, гидрогеологических условий, геологического строения основания, физико-механических характеристик грунтов и хвостов золоотвала, проведено моделирование устойчивости проектируемого сооружения с учетом данных инженерно-геологических изысканий, класса сооружения и условий эксплуатации [3–5]. Для каждого породного слоя задавались свои физико-механические свойства, плотность, объемный вес, модуль упругости и другие необходимые для решения задачи параметры.

По материалам отчета «Инженерно-геологические изыскания для проектирования золоотвала Карагандинской ТЭЦ»⁵ по периметру ограждающих дамб проведены исследования грунтов основания,

на которых проектируется возводить дамбы. Выделены четыре участка различной протяженности, которые объединены по гидрогеологическим условиям, геологическому строению основания и ряду других факторов в расчетные зоны с близкими условиями эксплуатации.

Первый участок, протяженностью ограждающей дамбы 2,5 км, согласно материалам отчета определяется скважинами 374-19, 347-19, 346-19, 375-19, 345-19, 376-19, 377-19, 343-19, 378-19, 379-19, 341-19, 380-19, 340-19, 381-19, 339-19, 382-19, 338-19, 383-19, 385-19, которыми вскрыты следующие грунты:

- илистые отложения и почвенно-растительный слой мощностью 0,4–0,5 м;
- суглинок бурого цвета, твердый, водонасыщенный, мощностью от 1,8 до 14,9 м;
- глина пестро-цветная или серо-зеленая, твердая, водонасыщенная, мощностью от 8,0 до 10,9 м.

Второй участок, протяженностью 0,75 км, аналогичен предыдущему и представлен скважиной 328-19, которая вскрыла супесь бурого и серого цвета, твердую, малой степени водонасыщения, мощностью до 15,0 м; и скважинами 384-19, 330-19, 385-19, 327-19, 337-19, 326-19, которые показали следующую литологическую разность грунтов:

- суглинок бурого цвета, твердый, водонасыщенный, мощностью от 2,4 до 15,0 м;
- супесь бурого цвета, твердая, средней степени водонасыщения, мощностью от 2,2 до 2,5 м;
- скальный грунт, представленный песчаником серого цвета, плотным, средней степени водонасыщения, мощностью от 2,6 до 7,9 м.

Отдельного внимания требует третий участок, определенный скважинами 324-19, 366-19 и 332-19, протяженностью 300 м. В геологическом строении этого участка преобладают глина бурого цвета или красно-цветная, твердая, водонасыщенная, мощность которой изменяется от 5,5 до 8,5 м, и суглинок небольшой мощности (1,5–1,8 м). Ниже данного слоя залегает суглинок серого цвета, твердый, от 7,0 до 21 м.

Четвертый участок, протяженностью до 3,7 км, представляет собой наиболее прочное основание для дамб золоотвала и вскрыт скважинами от 323-19, 373-19 и до скважины 350-19, имеет следующее геологическое строение:

- суглинок бурого цвета, твердый, водонасыщенный, мощностью от 1,7 до 15,0 м;
- щебенистый грунт с суглинистым и супесчаным заполнителем, твердый, водонасыщенный, мощностью от 1,5 до 10,4 м;
- скальный и полускальный грунт, представленный песчаником серого цвета, плотным, средней степени водонасыщения, мощностью от 1,0 до 11,0 м.

На устойчивость насыпной дамбы сильное влияние оказывает обводненность основания, связанная с повышением уровня грунтовых вод⁶. Это приводит к ослаблению прочностных характеристик пород основания и снижению их прочности, поэтому возни-

⁵ Отчет «Инженерно-геологические изыскания для проектирования золоотвала Карагандинской ТЭЦ», выполненный ТОО «GeolProject и К» в 2019 г.

⁶ СП РК 3.04-103-2014 «Основания гидротехнических сооружений».



кает необходимость при моделировании учитывать различные сочетания степени обводненности дамбы и ее основания [1, 2, 6, 7].

По результатам анализа геологического строения основания проектируемого гидротехнического сооружения выбраны наиболее ответственные и характерные поперечные расчетные сечения по периметру ограждающих дамб золоотвала.

Критерием устойчивости откосов дамбы является соблюдение (для наиболее опасной призмы обрушения) равенства [3]:

$$\gamma_{fc} F(\gamma_f) \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R \left(\frac{1}{\gamma_g} \right),$$

где γ_{fc} – коэффициент сочетания нагрузок; F – расчетное значение обобщенного силового воздействия, определяемое с учетом коэффициента надежности по нагрузке γ_f (f – равнодействующая активных сил или моментов этих сил относительно оси поверхности сдвига, которая зависит от метода расчета устойчивости откосов); γ_c – коэффициент условий работы; γ_n – коэффициент ответственности сооружения; R – расчетное значение обобщенной несущей способности системы «сооружение – основание», определяемое с учетом коэффициента безопасности по грунту γ_g , т.е. обобщенное расчетное значение сил предельного сопротивления сдвигу по рассматриваемой поверхности.

При поиске опасной поверхности сдвига может быть использована зависимость для коэффициента устойчивости

$$n_3 = \frac{R}{F} \geq \frac{\gamma_n \gamma_{fc}}{\gamma_c}.$$

Для гидротехнических сооружений II класса капитальности [2, 8, 9], к которым относится проектируемое сооружение, коэффициент устойчивости равен:

1) при особом сочетании нагрузок в период эксплуатации

$$n_3 = \frac{\gamma_n \gamma_{fc}}{\gamma_c} = \frac{1,2 \cdot 0,95}{1,0} = 1,14;$$

2) при основном сочетании нагрузок в период эксплуатации

$$n_3 = \frac{\gamma_n \gamma_{fc}}{\gamma_c} = \frac{1,2 \cdot 1,0}{1,0} = 1,2.$$

Для исследований устойчивости проектируемых дамб и правильности принятых решений выполнено моделирование состояния при изменении характеристик проектируемого ограждающего сооружения для различных условий ее эксплуатации с учетом нормативных документов (СНиП РК 3.04-40–2006 «Нагрузки и воздействия (волновые, ледовые и от судов) на гидротехнические сооружения»)⁷.

⁷ СНиП РК 3.04-40-2006 «Нагрузки и воздействия (волновые, ледовые и от судов) на гидротехнические сооружения».

При моделировании выполнены следующие расчеты:

- 1) гидростатическое давление при максимальном заполнении без обводнённой дамбы;
- 2) гидродинамический напор при минимальном заполнении с обводнённой дамбой;
- 3) поровое давление при максимальном заполнении без обводнённой дамбы;
- 4) поровое давление при минимальном заполнении с обводнённой дамбой;
- 5) градиент гидравлического давления при полном заполнении чаши золоотвала;
- 6) градиент гидравлического давления в начальном периоде эксплуатации;
- 7) объёмная влажность при полном заполнении чаши золоотвала;
- 8) объёмная влажность в начальном периоде эксплуатации;
- 9) расчеты устойчивости внутреннего откоса ограждающей дамбы для различных сочетаний степени обводненности дамбы;
- 10) расчет устойчивости внешнего откоса ограждающей дамбы.

В настоящей статье представлены результаты расчетов устойчивости внутреннего откоса ограждающей дамбы по самому характерному сечению рядом со скважиной 373-19 для различных сочетаний степени обводненности дамбы, наличия/отсутствия «геомембраны» и значений порового давления, а также для сложного участка рядом со скважиной 324-19. Расчеты выполнялись с использованием компьютерной программы «Phase2» для разных сочетаний нагрузок для насыпных грунтов с нормативными прочностными характеристиками и коэффициентом уплотнения 1,75, наполнением чаши золоотвала на начальный период 0,4 м и до уровня отметки 533,1 м. Состав пульпы по содержанию 1/10–1/14. Разрезы по расчетным характерным сечениям составлены по литологической разности пород, обнаруженных по ближайшим к сечениям геологическим скважинам⁸. Физико-механические характеристики пород приняты согласно проведенным исследованиям грунтов по скважинам, пробуренным по периметру территории, отведенной под золоотвал. Расчеты показали, что коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) внутреннего откоса дамбы по сечению, проходящему по скважине № 373-19 без обводнения (внутренний откос укреплен геомембраной и каменной наброской), равен 1,718, при обводнении дамбы – 1,064.

Расчеты для сложного участка рядом со скважиной 324-19, выполненные по оценке устойчивости внутренних откосов ограждающей дамбы, показали, что КЗУ внутреннего откоса дамбы по скважине № 324-19 без обводнения (внутренний откос укреплен геомембраной и каменной наброской) равен 1,672, при обводнении дамбы – 0,986. Расчет устой-

⁸ Отчет «Инженерно-геологические изыскания для проектирования золоотвала Карагандинской ТЭЦ», выполненный ТОО «GeolProject и К» в 2019 г.

Программа инженерно-геологических изысканий, выполненных ТОО «GeolProject и К» в 2019 г.

чивости внутреннего откоса ограждающей дамбы по характерному сечению 324-19 при обводнении дамбы в программе «Phase2» представлен на рис. 1.

Территория, отведенная под устройство золотвала, имеет сложные гидрогеологические условия, поэтому для обеспечения устойчивости возводимых сооружений первостепенным является решение задачи предварительного осушения площади и отвод воды. Моделирование показало, что с целью обеспечения устойчивости внутреннего и внешнего откосов при обводнении дамбы необходимо устройство трубчатого дренажа.

В программе «Phase2» был выполнен расчет устойчивости внешнего откоса выделенных участков с учетом однородности массива, который сложен из насыпных грунтов (суглинок) при наличии трубчатого дренажа. Расчет устойчивости внешнего откоса по сечению № 373-19 показал, что КЗУ внешнего откоса составляет 1,806, а для особого сочетания нагрузок при сейсмическом воздействии в 5 баллов (рис. 2) – 1,533.

Расчетное положение кривой депрессии было определено с помощью фильтрационных расчетов с использованием метода конечных элементов МКЭ. Фильтрационную прочность грунтов, а также противofильтрационных устройств оценивают на основе соответствующих расчетов и экспериментальных исследований грунтов при действующих в сооружении

градиентах напора с учетом напряженно-деформированного состояния сооружения и его основания, особенностей конструкции, методов возведения и условий эксплуатации [6–9].

На рис. 3 приведена кривая депрессии и показатели расчетного градиента напора в низовом откосе ограждающей дамбы. Согласно выполненному фильтрационному расчету максимальное расчетное значение действующего градиента напора в низовом откосе составит от 0,523 до 0,360.

В программе «Phase2» был выполнен анализ прочности внешнего откоса для наиболее слабого участка по скважине № 324-19 при наличии трубчатого дренажа. Использовался метод GLE/Morgenstern-Price, в котором учитывается распределение главного предельного равновесия при пригрузке тела дамбы. Основа метода заключается в искусственной нагрузке для выявления слабых мест и возможных обрушений (рис. 4). В данном конкретном случае наиболее слабым по фактору устойчивости является сектор 3 на участке № 324-19 (см. рис. 4).

При анализе отстраивается возможная линия среза для каждого сектора отдельно. Расчеты показали, что критический коэффициент запаса прочности на участке № 324-19 равен 1,026 (рис. 5), что не соответствует требованиям и критериям устойчивости откосов дамбы, который равен 1,2.

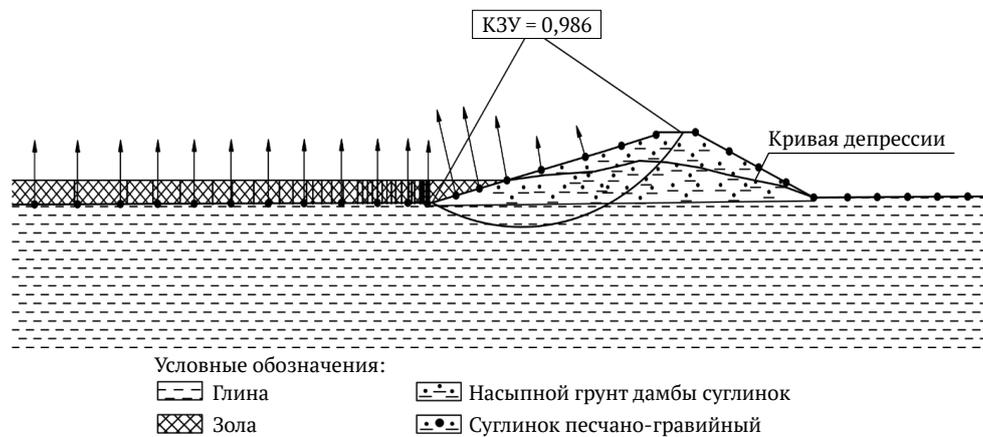


Рис. 1. Расчеты устойчивости внутреннего откоса ограждающей дамбы по характерному сечению 324-19 при обводнении дамбы

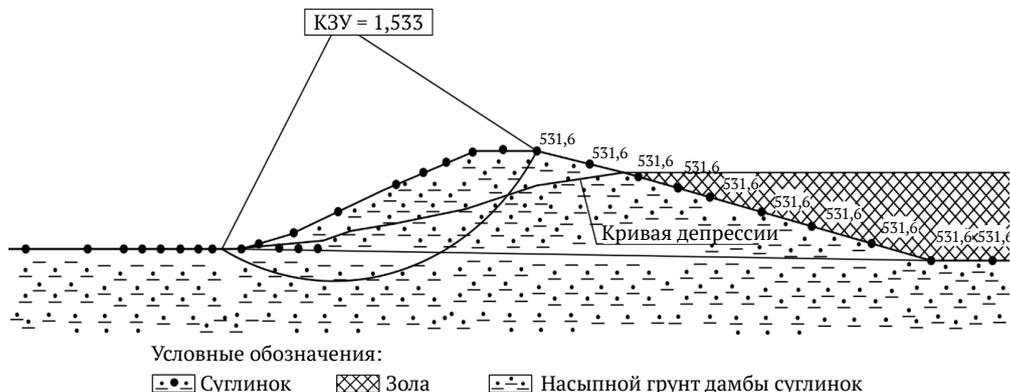


Рис. 2. Расчеты устойчивости внешнего откоса по сечению 373-19 ограждающей дамбы для особого сочетания нагрузок

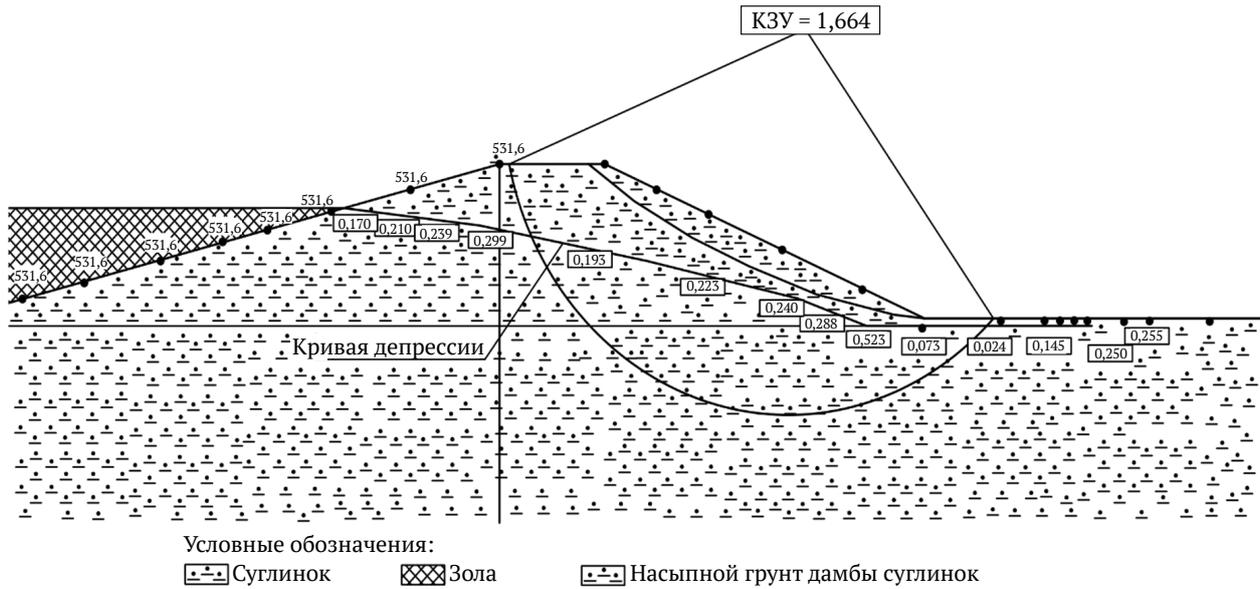


Рис. 3. Кривая депрессии и показатели градиента напора

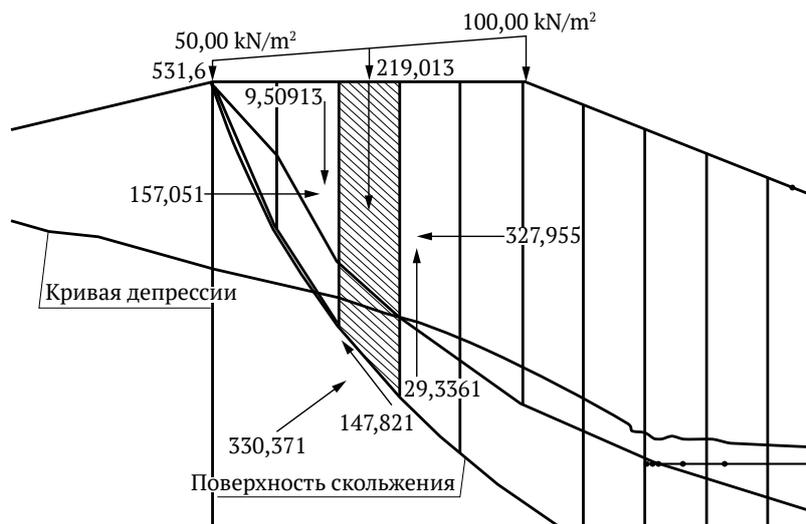


Рис. 4. Расчет на участке № 324-19 для выявления слабых мест и возможных обрушений

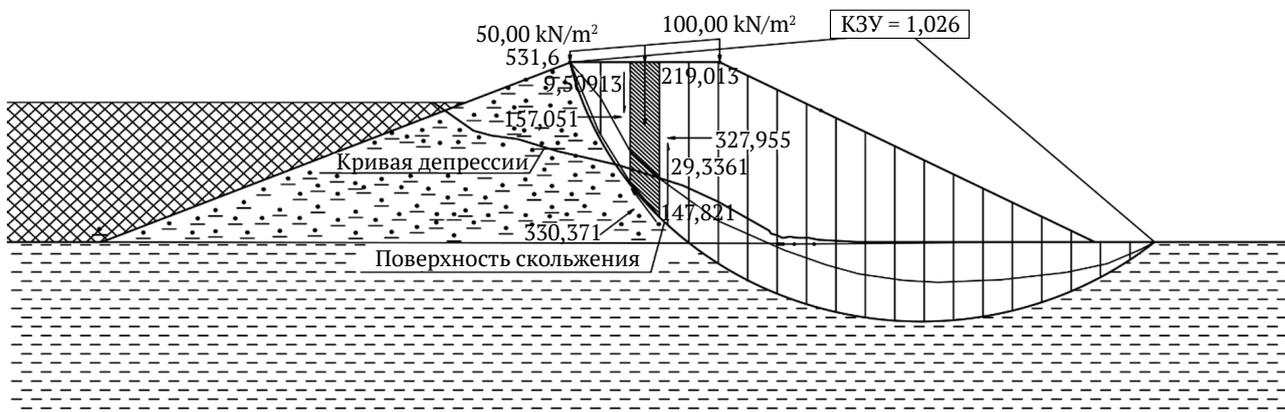
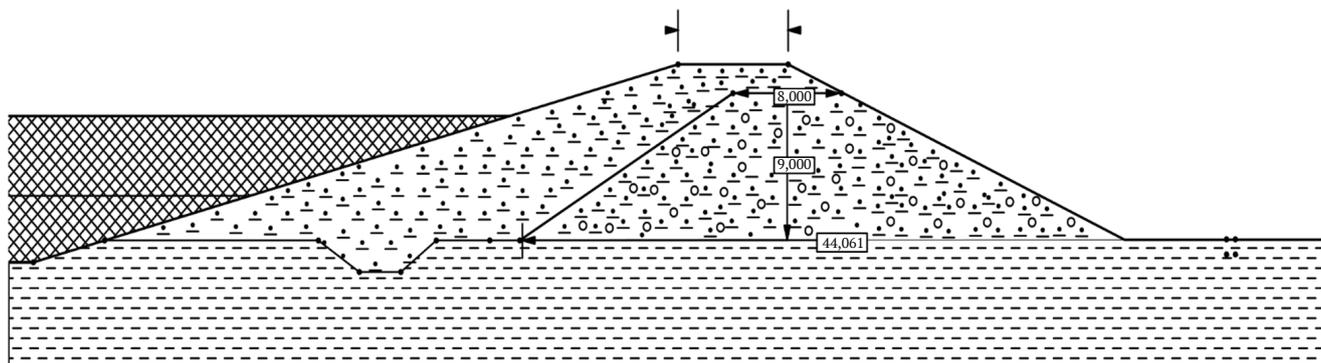


Рис. 5. Расчет внешнего откоса для наиболее слабого участка по скважине № 324-19 при наличии трубчатого дренажа



Условные обозначения:

— Суглинок

▣ Зола

▤ Насыпной грунт дамбы суглинок

▥ Суглинок песчано-гравийный

Рис. 6. Конструктивное сечение тела дамбы с зубом и трубчатым дренажем

Согласно выполненным расчетам конструктивное решение по возведению ограждающего сооружения, сложенного из однородного массива (суглинка) без зуба, на данном участке по скважине № 324-19 с глинистым основанием не обеспечивает устойчивости дамбы.

С целью обеспечения устойчивости проектируемого ограждающего сооружения в конструктивное сечение дамбы встроен трубчатый дренаж и зуб в основании дамбы для надежного соединения с основанием, а также тело дамбы проектируется сооружать из неоднородного массива (суглинок с примесями песка и гравия). Конструктивное сечение тела расчетной дамбы приведено на рис. 6.

Расчеты устойчивости по второму варианту конструкции дамбы участка, определенного скважинами 324-19, 366-19 и 332-19, протяженностью 300 м с глинистым основанием показали КЗУ = 1,664 для основного и КЗУ = 1,430 для особого сочетания нагрузок при сейсмическом воздействии.

Выводы

Устойчивость ограждающих и разделительных дамб хвостохранилищ определяется комплексом инженерно-геологических, гидрогеологических и техногенных факторов, из которых наибольшее влияние оказывают следующие: физико-механические характеристики грунтов и хвостов; технология возведения и эксплуатации сооружения; характер основания; гидродинамические, гидростатические, сейсмические и динамические силы⁹.

При проектировании ограждающих сооружений золошлаковых материалов, удаляемых из котельных помещений ТЭЦ, определяются многие факторы, в том числе: производится выбор местоположения ограждающего сооружения; определяются геологические характеристики основания дамб и плотин; моделируются тип и параметры сооружений в зависимости от объемов складированных отходов; определяются материалы для строительства тела дамбы исходя из

возможно близкого расположения строительного карьера; определяются конструктивные особенности тела дамбы, которые должны обеспечивать прочность возводимого сооружения.

1. При проектировании ограждающих сооружений золоотвала № 3 Карагандинской ТЭЦ-3 использовалась расчетная программа, основанная на методе конечных элементов которая позволяет моделировать состояние массива в соответствии с прочностными и деформационными характеристиками насыпных грунтов тела дамбы и грунтов пород основания.

2. Расчеты выполнялись с использованием компьютерной программы «Phase2» для разных сочетаний нагрузок для насыпных грунтов с нормативными прочностными характеристиками и коэффициентом уплотнения 1,75, наполнением чаши золоотвала на начальный период 0,4 м и до уровня отметки 533,1 м. Состав пульпы по содержанию 1/10–1/14. Расчеты выполнены с учетом однородности массива откоса дамбы, сложенного из насыпных грунтов (суглинок), и наличия трубчатого дренажа в основании. Внутренний откос укреплен геомембраной и каменной наброской.

3. Моделирование показало, что расчетные значения по характерным сечениям превышают нормативные значения коэффициента устойчивости для сооружений II класса, которые соответственно равны 1,2 и 1,14, кроме участка с глинистым основанием. Устойчивость насыпных дамб практически обеспечивается по всему периметру ограждающего сооружения кроме участка с глинистым основанием.

4. При моделировании тела дамбы на участке длиной около 300 м, в основании которого залегают глина красно-цветная и бурого цвета, твердая, водонасыщенная, мощностью от 5,5 до 8,5 м и суглинок небольшой мощности (1,5–1,8 м), необходимо учитывать, что на устойчивость насыпной дамбы сильное влияние оказывает обводненность основания, связанная с повышением уровня грунтовых вод¹⁰. Это приводит к ослаблению прочностных характеристик

⁹ МСП 3.04-101-2005 Определение основных расчетных гидрологических характеристик.

¹⁰ СП РК 3.04-103-2014 «Основания гидротехнических сооружений».



пород основания и снижению их прочности, поэтому необходимо при моделировании учитывать различные сочетания степени обводненности дамбы и ее основания.

5. Расчеты устойчивости дамбы, сложенной из однородного грунта, для участка с глинистым основанием в наихудших условиях при максимальной влажности грунтов и минимальных значениях их прочностных характеристик показали, что состоящие откосы дамбы близко к предельному, критический коэффициент запаса прочности SRF на участке № 324-19 равен 1,026, что не соответствует критериям устойчивости откосов дамбы.

Возведение ограждающей дамбы из однородного грунта без дополнительных конструктивных элементов, повышающих прочность сооружения, может привести к разрушению ее целостности при повышении влажности грунтов и уровня грунтовых вод.

6. Для повышения прочности ограждающего сооружения для участка, определенного скважинами 324-19, 366-19 и 332-19, протяженностью 300 м с глинистым основанием, в конструкцию дамбы кроме встроеного трубчатого дренажа проектом предус-

матривается устройство зуба в основании и отсыпка призмы упора из неоднородного массива – суглинка с примесями песчаника и гравия, с последующим возведением дамбы до проектных параметров из суглинка.

Разработанный на основании моделирования вариант конструкции тела дамбы на данном особом участке позволил обеспечить коэффициенты устойчивости внешнего откоса по скважине № 324-19 1,664 – для основного, и 1,430 – для особого сочетания нагрузок при сейсмическом воздействии.

Идеальным грунтом для возведения тела плотины является грунт, скелет которого образован крупными частицами, а поры заполнены глиной. Такой грунт характеризуется относительно высоким углом внутреннего трения, отвечающим крупнозернистому грунту, и малым коэффициентом фильтрации, отвечающим глинистому грунту.

7. Согласно выполненному фильтрационному расчету максимальное расчетное значение действующего градиента напора по скважине № 324-19 составит 0,523; по скважине № 373-19 – 0,597; по скважине № 381-19 – 0,651; при нормативном значении не более 1,3 [2, 6].

Список литературы

1. Чугаев Р.Р. *Гидротехнические сооружения*. М.: Агропромиздат; 1985. 318 с.
2. Чугаев Р.Р. *Земляные гидротехнические сооружения*. Л.: Энергия; 1967. 460 с.
3. Костюков Е.В., Простов С.М., Бахаева С.П. Прогноз устойчивости ограждающих дамб гидротехнических сооружений на основе геоэлектрического контроля их состояния. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2004;(2):14–18. URL: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=1637>
4. Zhang L., Peng M., Chang D., Xu Y., *Dam failure mechanisms and risk assessment*. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.; 2016. <https://doi.org/10.1002/9781118558522>
5. Пантелеев В.Г., Чугаева Г.А., Филиппова Е.А. и др. Состав расчетных случаев при анализе устойчивости откосов грунтовых сооружений различного назначения. *Известия ВНИИГ*. 1996;231.
6. Ashraf M., Soliman A.H., El-Ghorab E., El Zawahry A. Assessment of embankment dams breaching using large scale physical modeling and statistical methods. *Water Science*. 2018;32(8):362–379.
7. Бахаева С.П., Простов С.М., Костюков Е.В., Серегин Е.А. Комплексная оценка геомеханических процессов в дамбах из грунтовых материалов. *Маркшейдерский вестник*. 2003;(2):62–66.
8. Гальперин А.М., Шафаренко Е.М. *Реологические расчеты горнотехнических сооружений*. М.: Недра; 1977. 246 с.
9. Кибирев В.И., Райлян Г.А., Сазонов Г.Т. и др. *Гидравлическое складирование хвостов обогащения*. Справочник. М.: Недра; 1991.
10. Wahl T.L. Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004;130(5):389–397. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:5\(389\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:5(389))
11. Wu W., Marsooli R., He Z. Depth-averaged two-dimensional model of unsteady flow and sediment transport due to noncohesive embankment break/breaching. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2012;138(6):503–516. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000546)
12. Wang L., Chen Z., Wang N. et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode. *Engineering Geology*. 2016;209:70–81. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.027>
13. Костюков Е.В. *Исследование физического состояния и оценка устойчивости грунтовых дамб гидротехнических сооружений горных предприятий геоэлектрическим методом*. [Дисс. канд. техн. наук]. Кемерово; 2005. 147 с.

References

1. Chugaev R.R. *Hydraulic structures*. Moscow: Agropromizdat; 1985. 318 p. (In Russ.)
2. Chugaev R.R. *Ground hydraulic structures*. Leningrad: Energy; 1967. 460 p. (In Russ.)



3. Kostyukov E. V., Prostov S. M., Bakhaeva S. P. Prediction of stability of hydraulic structure embankment on the basis of geoelectric control of their condition. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2004;(2):14–18. (In Russ.) URL: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=1637>
4. Zhang L., Peng M., Chang D., Xu Y., *Dam failure mechanisms and risk assessment*. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.; 2016. <https://doi.org/10.1002/9781118558522>
5. Pantelev V. G., Chugaeva G. A., Filippova E. A. et al. Composition of computation cases when analyzing slope stability of soil structures for various purposes. *Izvestiya VNIIG*. 1996;231. (In Russ.)
6. Ashraf M., Soliman A. H., El-Ghorab E., El Zawahry A. Assessment of embankment dams breaching using large scale physical modeling and statistical methods. *Water Science*. 2018;32(8):362–379.
7. Bakhaeva S. P., Prostov S. M., Kostyukov E. V., Seregin E. A. Comprehensive assessment of geomechanical processes in dams made of soil materials. *Mine Surveying Bulletin*. 2003;(2):62–66. (In Russ.)
8. Galperin A. M., Shafarenko E. M. *Rheological computations of mine-engineering structures*. Moscow: Nedra Publ.; 1977. 246 p. (In Russ.)
9. Kibirev V. I., Raylyan G. A., Sazonov G. T. et al. *Hydraulic disposition of beneficiation tailings*. Handbook. Moscow: Nedra Publ.; 1991. (In Russ.)
10. Wahl T. L. Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004;130(5):389–397. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:5\(389\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:5(389))
11. Wu W., Marsooli R., He Z. Depth-averaged two-dimensional model of unsteady flow and sediment transport due to noncohesive embankment break/breaching. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2012;138(6):503–516. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000546)
12. Wang L., Chen Z., Wang N. et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode. *Engineering Geology*. 2016;209:70–81. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.027>
13. Kostyukov E. V. *Research of physical condition and assessment of stability of ground dams of hydraulic structures at mining enterprises by geoelectric method*. [Ph.D. thesis in Eng. Sci.]. Kemerovo; 2005. 147 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Ольга Газисовна Бесимбаева – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан; ORCID [0000-0002-8132-1505](https://orcid.org/0000-0002-8132-1505), Scopus ID [57202620963](https://scopus.com/authorid/57202620963); e-mail bog250456@mail.ru

Елена Николаевна Хмырова – кандидат технических наук, заведующая кафедрой маркшейдерского дела и геодезии, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан; ORCID [0000-0001-5763-327X](https://orcid.org/0000-0001-5763-327X), Scopus ID [57202620896](https://scopus.com/authorid/57202620896); e-mail hmyrova@mail.ru

Елена Алексеевна Олейникова – старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан; ORCID [0000-0002-6133-7630](https://orcid.org/0000-0002-6133-7630), Scopus ID [57202892706](https://scopus.com/authorid/57202892706)

Айжан Ерболовна Касымжанова – старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан; ORCID [0000-0002-6181-8637](https://orcid.org/0000-0002-6181-8637), Scopus ID [57191977084](https://scopus.com/authorid/57191977084)

Information about the authors

Olga G. Bessimbayeva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy, Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan; ORCID [0000-0002-8132-1505](https://orcid.org/0000-0002-8132-1505), Scopus ID [57202620963](https://scopus.com/authorid/57202620963); e-mail bog250456@mail.ru

Elena N. Khmyrova – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Mine Surveying and Geodesy, Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan; ORCID [0000-0001-5763-327X](https://orcid.org/0000-0001-5763-327X), Scopus ID [57202620896](https://scopus.com/authorid/57202620896); e-mail hmyrova@mail.ru

Elena A. Oleinikova – Senior Lecturer, Department of Mine Surveying and Geodesy, Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan; ORCID [0000-0002-6133-7630](https://orcid.org/0000-0002-6133-7630), Scopus ID [57202892706](https://scopus.com/authorid/57202892706)

Aizhan E. Kasymzhanova – Senior Lecturer, Department of Mine Surveying and Geodesy, Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan; ORCID [0000-0002-6181-8637](https://orcid.org/0000-0002-6181-8637), Scopus ID [57191977084](https://scopus.com/authorid/57191977084)

Поступила в редакцию 08.11.2022

Поступила после рецензирования 21.02.2023

Принята к публикации 10.03.2023

Received 08.11.2022

Revised 21.02.2023

Accepted 10.03.2023



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-154>

УДК 622.7

**Оптимизация состава и режима применения реагентов-модификаторов спектральных характеристик алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации****В. А. Чантурия**  , **В. В. Морозов**  , **Г. П. Двойченкова**   ✉, **Ю. А. Подкаменный**  , **А. С. Тимофеев**  *Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
г. Москва, Российская Федерация*✉ dvoigp@mail.ru**Аннотация**

Одним из направлений повышения эффективности процессов обогащения алмазосодержащих кимберлитов является применение технологии, способствующей извлечению слабо и аномально люминесцирующих алмазов в процессе рентгенолюминесцентной сепарации с применением люминофорсодержащих реагентов. Задача исследований заключалась в выборе рационального состава реагентов-модификаторов спектральных характеристик минералов и режима их применения. Основным условием эффективности процесса является интенсивное закрепление реагентов-модификаторов на кристаллах алмазов без аналогичного закрепления на поверхности кимберлита, что обеспечивается применением органических коллекторов оптимального состава, характеризующихся способностью как адгезионно закрепляться на поверхности алмазов, так и удерживать зерна неорганических люминофоров. Оценка эффективности закрепления люминофоров выполнена с использованием методики визиометрического анализа в УФ излучении. Оценка способности алмазов удерживать на поверхности капли или пленки коллектора с люминофорами выполнена с использованием методики измерения величины трехфазного краевого угла смачивания. Спектрально-кинетические характеристики алмазов и их извлечение в процессе рентгенолюминесцентной сепарации были определены на сепараторе «Полюс-М». В результате проведенных исследований установлена возможность целенаправленного модифицирования спектральных характеристик слабо и аномально светящихся алмазов люминофорсодержащими композициями на основе сульфидов цинка и ортосиликата цинка. С использованием критерия селективности закрепления люминофорсодержащей эмульсии на алмазах и минералах кимберлита, рассчитываемого по величинам измеренных поверхностных концентраций люминофоров на минералах, определены оптимальные соотношения между массами неорганического люминофора, органического коллектора и водной фазы применяемой эмульсии. Выбраны реагенты-диспергаторы, обеспечивающие селективное закрепление люминофоров на алмазных кристаллах. Установлены рациональные параметры состава органического коллектора. Определены границы температурного режима процесса обработки алмазосодержащего материала. В результате стендовой апробации реагентов модификаторов выбранного состава и режимов их применения в цикле обработки алмазосодержащего материала перед процессом РЛС установлена возможность достижения извлечения аномально и слабо люминесцирующих алмазов более чем на 90 % при значениях выхода кимберлита в концентрат, не превышающих 1 %.

Ключевые слова

алмазы, кимберлит, спектральные характеристики, люминофоры, реагент-модификатор, селективность, люминесценция, сепарация

ФинансированиеИсследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21–17–00020, <https://rscf.ru/project/21-17-00020/>.**Для цитирования**Chanturiya V.A., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P., Podkamennyi Yu.A., Timofeev A.S. Optimizing composition and application conditions of agents for modifying spectral characteristics of diamonds in X-ray luminescence separation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):313–326. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-154>



BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

Optimizing composition and application conditions of agents for modifying spectral characteristics of diamonds in X-ray luminescence separation

V. A. Chanturiya  , V. V. Morozov  , G. P. Dvoichenkova   ,
Yu. A. Podkamennyi  , A. S. Timofeev  

*Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

 dvoigp@mail.ru

Abstract

One of the research areas focused on improving the efficiency of diamond-bearing kimberlite beneficiation processes involves the utilization of technology aimed at enhancing the recovery of weakly and anomalously luminescent diamonds during the X-ray luminescence separation process using luminophore-containing chemical agents. The objective of this research was to select the optimal composition of agents that modify the spectral characteristics of minerals and the conditions for their application. A crucial factor for process efficiency is the effective attachment of modifying agents to diamond crystals while avoiding similar attachment to kimberlite mineral surfaces. This is achieved through the use of organic collectors with an optimal composition, characterized by their ability to both adhere to the diamond surface and retain inorganic luminophore grains. The evaluation of luminophore attachment efficiency was performed using visometric analysis in the UV range. The capability of diamonds to retain luminophore collector droplets or films on their surfaces was evaluated using a technique to measure the three-phase limiting wetting angle. The spectral and kinetic characteristics of diamonds and their recovery during the X-ray luminescence separation process were determined using a separator “Polyus-M”. The feasibility of purposefully modifying the spectral characteristics of weakly and anomalously luminescent diamonds through luminophore-containing compositions based on zinc sulfides and zinc orthosilicate has been confirmed through the conducted studies. By considering the criterion of selectivity in the attachment of luminophore emulsion to diamonds and kimberlite minerals, calculated based on the measured surface concentrations of luminophores on the minerals, the optimal ratios between the masses of inorganic luminophore, organic collector, and the aqueous phase of the emulsion were determined. Dispersing agents that offer selective binding of luminophores to diamond crystals were identified, and rational parameters for the composition of the organic collector were established. The temperature range for treating diamond-containing material was defined. As a result of bench testing the modifying agents with the selected composition and conditions for their application in the diamond-containing material treatment cycle before XRF separation, it was confirmed that the recovery of anomalously and weakly luminescent diamonds could exceed 90%, while keeping the yield of kimberlite minerals in the concentrate below 1%.

Keywords

diamonds, kimberlite, spectral characteristics, luminophores, modifying agent, selectivity, luminescence, separation

Financing

The research was carried out at the expense of grant No. 21 of the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/17-00020>.

For citation

Chanturiya V.A., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P., Podkamennyi Yu.A., Timofeev A.S. Optimizing composition and application conditions of agents for modifying spectral characteristics of diamonds in X-ray luminescence separation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):313–326. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-154>

Введение

Важным ресурсом повышения эффективности алмазоизвлекающих предприятий является снижение т.н. методических потерь алмазов, связанных с принципиальными и существенными отклонениями параметров сырья от настроек применяемого оборудования. Для рентгенолюминесцентной сепарации причинами методических потерь алмазов являются

особенности их состава и строения, влияющие на отсутствие или, напротив, чрезмерную концентрацию дефектов кристаллической решетки или примесей, вызывающих характерное свечение в рентгеновских лучах [1, 2].

Перспективным направлением повышения эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазов является разработка технологий модифици-



рования их спектральных характеристик с применением люминофорсодержащих реагентов-модификаторов [3, 4]. Разработанная технология направлена на извлечение слабо и аномально люминесцирующих кристаллов, спектральные характеристики которых характеризуются малой интенсивностью рентгенолюминесценции или существенно отличаются от характеристик основной массы алмазов.

Основу реагентов-модификаторов составляют люминофорсодержащие композиции, содержащие неорганические и органические люминофоры, характеристики которых обеспечивают необходимое изменение кинетических параметров сигнала рентгенолюминесценции алмаза [5].

Основным требованием при выборе люминофоров для реализации разработанной технологии является возможность придания алмазам параметров сигнала рентгенолюминесценции, приближающихся к характеристикам природных кристаллов и соответствующих разрешенным диапазонам настроек детекторов в рентгенолюминесцентных сепараторах.

Важным условием повышения эффективности разработанной технологии [3–5] является обеспечение селективного режима закрепления реагентов-модификаторов на кристаллах алмазов, заключающегося в поддержании достаточного уровня закрепления люминофоров на алмазах при минимальном их закреплении на поверхности кимберлита. Реализация поставленного условия, выбранного в качестве основного подхода к решению поставленных задач, достигается экспериментально обоснованным выбором компонентов органических коллекторов, входящих в состав композиции реагентов-модификаторов и характеризующихся способностью как селективно закрепляться на поверхности алмазов, так и удерживать в своем объеме зерна неорганических люминофоров. Для определения селективности закрепления люминофоров на поверхности алмазов и кимберлита была разработана методика визиометрического анализа [4].

Необходимая устойчивость агрегатов алмаз – коллектор – люминофор достигается применением гидрофобизирующей обработки неорганических люминофоров, а также выбором состава используемых в качестве коллекторов органических жидкостей [6]. Оценка адгезионной способности коллектора по отношению к поверхности алмаза, определяющей способность алмазов удерживать на своей поверхности люминофорсодержащую композицию, достигается с применением методики измерения величины трехфазного краевого угла смачивания в системе минерал – капля коллектора – водная среда [7].

Конечной целью исследований был выбор параметров реагентов-модификаторов и режимов их применения, обеспечивающих необходимую селективность процесса рентгенолюминесцентной сепарации. Поставленная цель достигалась путем выбора рациональных составов реагентов, применимых для модифицирования характеристик основных типов неизвлекаемых алмазов, включая определение состава

и массовых соотношений люминофоров, коллектора и водной фазы, определение состава органического коллектора и выбор селективных режимов закрепления люминофоров на кристаллах алмазов, включающих применение реагентов-диспергаторов органической фазы и регуляторов закрепления коллектора на минералах кимберлита.

Методики исследований

Обработку алмазосодержащих кимберлитовых продуктов реагентом-модификатором проводили в специальной установке, разработанной и изготовленной в рамках выполнения работ по гранту Российского научного фонда № 21–17-00020.

Интенсивность закрепления люминофоров на алмазах оценивали по величине их поверхностной концентрации, которую измеряли методами люминесцентной и комбинированной (ультрафиолет – видимый свет) микроскопии, обеспечивающими наблюдение и регистрацию изображений элементов люминофорсодержащей композиции с применением эффекта фотолюминесценции [8, 9]. В настоящих исследованиях использован люминесцентный микроскоп «Микромед 3 ЛЮМ».

Влияние реагентов-регуляторов на гидрофобность и олеофильность поверхности алмазов и гидрофобных минералов кимберлита оценивали методом измерения краевых углов смачивания [10], при использовании которого первоначально поверхность минералов обрабатывается исследуемой водной системой, после чего на обработанную поверхность наносится капля органического вещества, и добавками водной фазы обеспечивается повышение уровня раздела фаз вода–воздух. Затем измеряются краевой угол смачивания и размер капли в системе минерал – капля коллектора – водная фаза.

Измерения проводили на установке «OCA 15EC Package 1» с модулем прямого дозирования SD-DM и обработкой результатов измерений при помощи пакета SCA 20.

Эффективность закрепления люминофоров на поверхности алмазов и минералов кимберлита оценивали по изображениям люминесценции исследуемых объектов в ультрафиолетовом излучении с использованием прибора УФК-254/365, оснащенного источниками УФ-излучения с длиной волны 254 и 365 нм. Полученные изображения диагностировали визиометрическим методом анализа, позволяющим оценить концентрацию и характер распределения люминофора на поверхности анализируемых образцов [2, 4].

Для определения спектрально-кинетических характеристик алмазов и кимберлита и извлекаемости алмазов был использован портативный рентгенолюминесцентный сепаратор «Полюс-М», возможности которого полностью соответствовали настройкам промышленных рентгенолюминесцентных сепараторов [11, 12]. Встроенная аналого-цифровая система регистрации сепаратора «Полюс-М» обеспечивала ведение процесса сепарации в «селективном» режиме, предполагающем использование кинетических

характеристик сигнала рентгенолюминесценции: свертку Sv ; постоянную времени затухания τ_3 , амплитуду медленной компоненты $A_{МК}$, амплитуду быстрой компоненты $A_{БК}$, отношение амплитуд компонент K_A [4, 12].

Обсуждение результатов

1. Обоснование технологических параметров применяемых люминофоров и композиций

Особенностью проводимых исследований было применение для специализированной лабораторной установки, обеспечивающей функции обработки алмазосодержащего материала реагентом-модификатором, отделения кондиционной эмульсии и промывки обработанного материала перед операцией РЛС (рис. 1).

Применение вышеописанной установки позволяет проводить обработку и разделение алмазосодержащего материала в условиях, близких к промышленным. Методика проведения экспериментов включала обработку смеси минералов в эмульсии реагента модификатора в течение 1 мин, промывку водой в течение 30 с, подсушивание, визиометрический анализ и снятие спектрально-кинетических характеристик на сепараторе «Полюс-М».

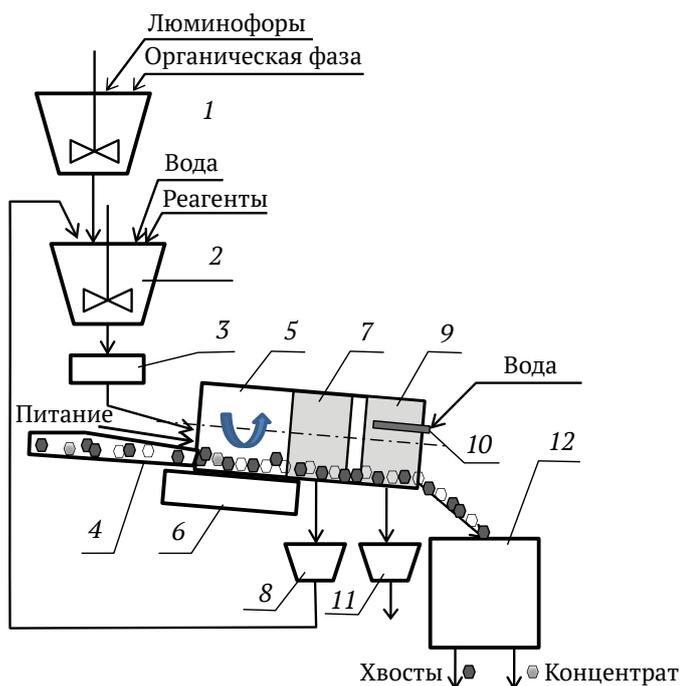
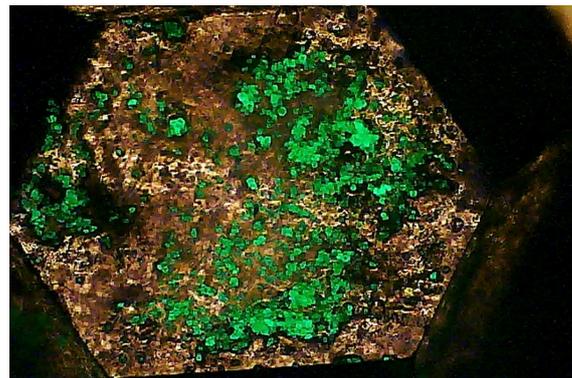
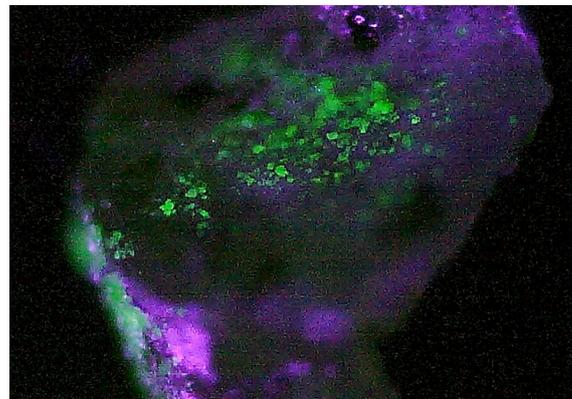


Рис. 1. Схема установки для исследования технологии подготовки алмазосодержащих продуктов к процессу РЛС с использованием реагентов-модификаторов, где 1 – узел приготовления композиции; 2 – узел приготовления эмульсии; 3 – приспособление для нагревания эмульсии; 4 – загрузочное приспособление; 5 – узел обработки алмазосодержащего материала эмульсией; 6 – валковый привод; 7 – перфорированный участок для отвода кондиционной эмульсии; 8 – приемник эмульсии; 9 – перфорированный участок для отделения промывной воды; 10 – распределитель промывной воды; 11 – приемник промывной воды; 12 – рентгенолюминесцентный сепаратор

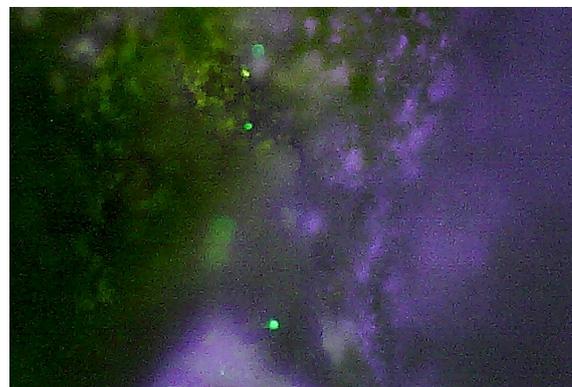
Применяемая установка обеспечивала хороший контакт эмульсии с поверхностью алмазов и закрепление на ней люминофорсодержащей композиции. Результаты исследований процессов распределения и закрепления люминофоров на поверхности кристаллов алмазов, проведенных с использованием микроскопа Микромед-3-Люм, показали, что как на синтетических, так и на природных алмазах наиболее интенсивное закрепление люминофоров наблюдается в области неровностей кристалла (рис. 2, а, б). На поверхности минералов кимберлита наблюдается точечное скопление люминофоров, обусловленное закреплением органического коллектора на природно-гидрофобных минералах (2, в).



а



б



в

Рис. 2. Изображения в комбинированном освещении поверхности исследуемых минералов с закрепившимся люминофором (люминофор – зеленый): а – синтетический алмаз, б – природный алмаз, в – зерна кимберлита

В качестве основного технологического критерия при выборе композиций люминофоров и коллектора была принята возможность придания алмазам необходимых для их обнаружения спектрально-кинетических характеристик. Критерием оптимальности состава люминофорсодержащей композиции был принят уровень приближения формы сигнала рентгенолюминесценции к форме сигнала природного алмаза. Принятое условие иллюстрируется графиками на рис. 3, где показано, что применение реагентов модификаторов различного состава (МЛА-1 – на основе ФЛ-530; МЛА-3 – на основе Э-515-115) придает кинетическим кривым сигнала рентгенолюминесценции отличающуюся форму, при этом в рассматриваемых условиях получаемые характеристики приближаются к характеристикам природных нормально извлекаемых алмазов.

Выбор люминофоров для исследуемых композиций учитывал необходимость требуемого изменения спектральных характеристик обоих типов неизвлекаемых алмазов (слабо и аномально люминесцирующих), для которых ранее была показана перспективность применения люминофоров на основе ортосиликата цинка и сульфидов цинка и кадмия [6]. В настоящем исследовании ставилась задача подтверждения и оценки эффективности выбранных составов реагентов-модификаторов для рассматриваемых типов неизвлекаемых алмазов.

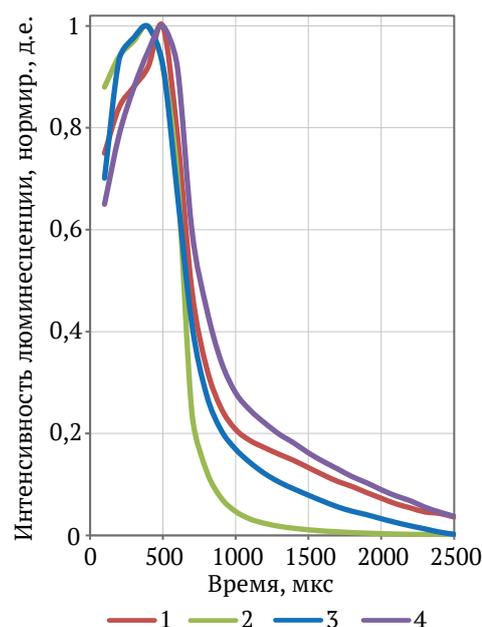


Рис. 3. Спектрально-кинетические характеристики алмазов до и после обработки: 1 и 2 – исходные нормально и аномально люминесцирующие алмазы соответственно; 3 и 4 – аномально люминесцирующие алмазы после обработки реагентами-модификаторами МЛА-1 и МЛА-3 соответственно

Таблица 1

Изменение спектрально-кинетических характеристик алмазов при обработке реагентами-модификаторами различного состава

№	Минерал	Компонента	До обработки	После обработки	Прирост	K_A до обработки	K_A после обработки
МЛА-1 (ФЛ-530-Г3 в ТГКК и ДТФ)							
1	Алмаз слабо люминесцирующий	$A_{МК}$	109	574	465	3,88	1,27
		$A_{БК}$	423	730	307		
2	Алмаз аномально люминесцирующий	$A_{МК}$	287	688	401	21,01	9,23
		$A_{БК}$	6030	6353	323		
МЛА-2 (ФЛ-530-Г3 и антрацен в соотношении 25–40 : 1 в ТГКК и ДТФ)							
3	Алмаз слабо люминесцирующий	$A_{МК}$	102	545	443	4,20	2,01
		$A_{БК}$	428	1095	667		
4	Алмаз аномально люминесцирующий	$A_{МК}$	287	810	523	21,25	8,66
		$A_{БК}$	6100	7011	911		
МЛА-3 (Э-515-115-Г5 в ТГКК и ДТФ)							
5	Алмаз слабо люминесцирующий	$A_{МК}$	100	488	388	4,00	4,80
		$A_{БК}$	400	2340	1940		
6	Алмаз аномально люминесцирующий	$A_{МК}$	347	720	383	17,64	10,18
		$A_{БК}$	6120	7330	1210		
МЛА-4 (ФК-110-Г5 в ТГКК и ДТФ)							
7	Алмаз слабо люминесцирующий	$A_{МК}$	110	455	345	3,83	4,29
		$A_{БК}$	421	1954	1533		
8	Алмаз аномально люминесцирующий	$A_{МК}$	326	647	321	18,53	10,83
		$A_{БК}$	6040	7008	968		
МЛА-5 (ФК-1 в ТГКК и ДТФ)							
9	Алмаз слабо люминесцирующий	$A_{МК}$	109	425	316	3,65	5,09
		$A_{БК}$	398	2163	1765		
10	Алмаз аномально люминесцирующий	$A_{МК}$	339	695	256	17,55	10,10
		$A_{БК}$	5950	7020	1070		



Результаты исследований влияния состава используемых люминофоров на результирующие спектрально-кинетические характеристики алмазов, представленные в табл. 1 и на рис. 4, позволили оценить технологическую возможность и эффективность применения основных типов реагентов-модификаторов в цикле обработки алмазосодержащего материала перед процессом РЛС.

Как видно из представленных данных, в отношении слабо люминесцирующих алмазов наилучшие результаты показали композиции люминофоров реагентов модификаторов МЛА-3 и МЛА-4 на основе сульфидов цинка, что подтверждается диаграммой рис. 3, из которых следует, что результирующие спектрально-кинетические характеристики слабо люминесцирующих алмазов после обработки существенно смещаются в область обнаружения за счет прироста амплитуд быстрой и медленной компонент.

Лучший результат в отношении аномально люминесцирующих алмазов наблюдается для реагентов МЛА-1 и МЛА-2 (на основе ортосиликата цинка). Однако результирующий сигнал обработанных реагентом МЛА-1 алмазов по соотношению быстрой и медленной компонент на слабо люминесцирующих алмазах лежит вблизи границы зоны обнаружения (см. рис. 4, линия 4).

При одновременном присутствии в исходном алмазосодержащем продукте алмазных кристаллов обоих типов наиболее эффективными для целенаправленного модифицирования их люминесцентных свойств будут реагенты МЛА-2 и МЛА-3, поскольку обеспечивают алмазам спектрально-кинетические характеристики, лежащие в глубине разрешенных значений зоны идентификации системы детектирования (см. рис. 4).

Отдельный цикл исследований посвящен экспериментальному обоснованию оптимального фракционного состава органического коллектора, обеспечивающего максимальное закрепление люминофорсодержащей композиции на алмазах. Для выявления закономерностей влияния фракционного состава органического коллектора на основе ТГКК и ДТФ на эффективность закрепления люминофоров и обоснованного выбора состава реагента был проведен комплекс физико-химических исследований, включающий измерение адгезионной активности коллектора как основного воздействующего фактора. Для оценки и сравнения адгезионной активности использовались результаты измерения краевого угла смачивания в системе алмаз – капля коллектора – водная фаза.

Анализ результатов исследований показал, что увеличение доли ДТФ в коллекторе вызывает рост

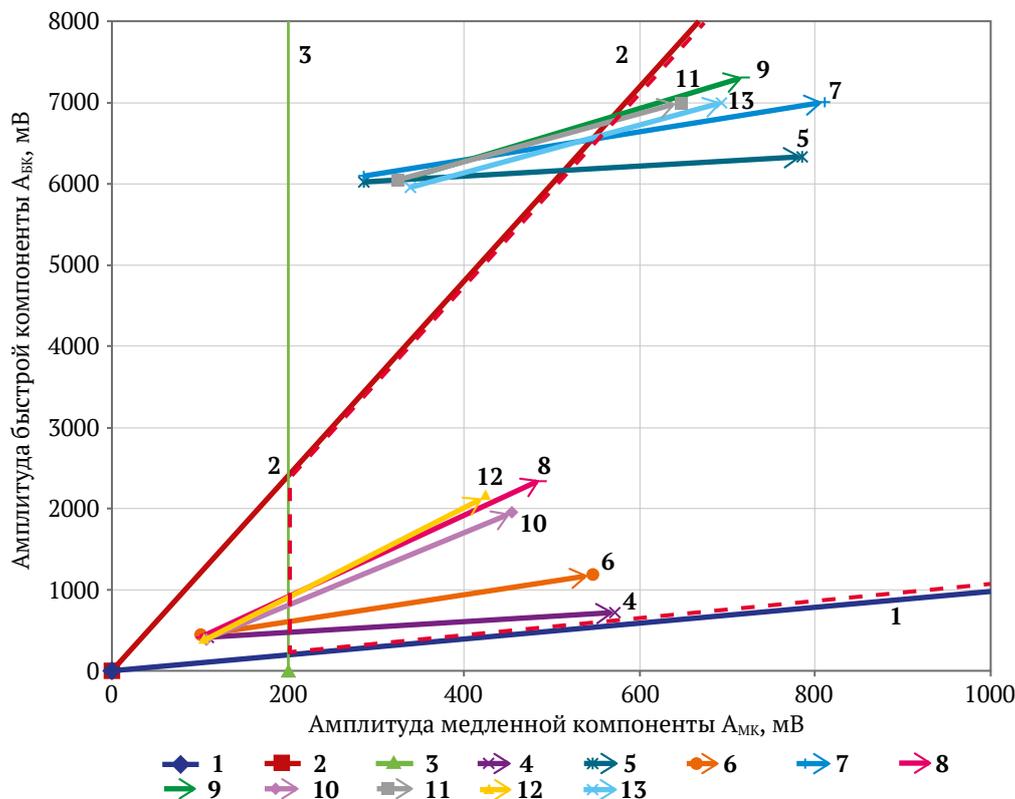


Рис. 4. Диаграмма изменения амплитудных спектрально-кинетических характеристик неизвлекаемых алмазов после обработки люминофорсодержащими реагентами-модификаторами:

1 – нижняя граница области положительной идентификации алмазов по K_A ; 2 – верхняя граница области положительной идентификации алмазов по K_A ; 3 – граница области положительной идентификации алмазов по $A_{МК}$; 4, 6, 8, 10, 12 – смещение характеристик слабо люминесцирующих алмазов; 5, 7, 9, 11, 13 – смещение характеристик аномально люминесцирующих алмазов после обработки: 4, 5 – МЛА-1; 6, 7 – МЛА-2; 8, 9 – МЛА-3; 10, 11 – МЛА-4; 12, 13 – МЛА-5; [red dashed box] – область положительной идентификации (обнаружения)



величины краевого угла смачивания, характеризующего его адгезионную активность. Однако, несмотря на увеличение краевого угла смачивания, при росте массовой доли ДТФ в компаунде выше 15 % происходит уменьшение размера капли коллектора, сохраняющейся на поверхности алмаза после подъема уровня жидкости (табл. 2).

Такой результат обусловлен в основном следующими факторами: снижением вязкости коллектора и, соответственно, уменьшением гистерезисного эффекта, а также снижением плотности и, соответственно, увеличением силы отрыва при подъеме уровня жидкости.

Экстремальная форма зависимости интенсивности закрепления люминофора от массовой доли ДТФ в органическом коллекторе согласуется с аналогичным характером зависимости размера удерживаемой капли коллектора на поверхности минерала от состава компаунда (см. табл. 2). Вероятной причиной такой закономерности является определяющая роль количества органического коллектора, закрепляющегося на поверхности алмаза. Чистый ТГКК характеризуется меньшей адгезионной активностью по отношению к поверхности алмаза, чем компаунды с ДТФ, что обуславливает меньшее количество закрепленной композиции и, соответственно, меньшее количество люминофора на алмазе. Повышение доли ДТФ в коллекторе более 15 % ведет к отрыву капли с поверхности алмаза как вследствие увеличивающейся разности плотностей относительно водной фазы (плотность ДТФ – 0,867 г/см³, плотность ТГКК 0,965 г/см³, воды – 1 г/см³), так и за счет уменьшения вязкости (на 45–58 %), что снижает гистерезисную устойчивость агрегатов минерал – коллектор в турбулентной среде.

2. Выбор режимов повышения селективности закрепления люминофоров на поверхности алмазов и минералов кимберлита

Для решения задачи повышения селективности закрепления люминофоров на поверхности алмазов было исследовано применение реагентов класса полифосфатов, силикатов, природных органических полимеров, лигносульфонатов, способствующих по-

давлению закрепления аполярных и слабо полярных реагентов на гидрофобных минералах [13, 14]. Выполнено экспериментальное обоснование и проведен выбор параметров водной фазы эмульсии реагента-модификатора (рН среды, минерализация, Eh), способствующих более селективному закреплению аполярных и слабо полярных реагентов на минералах [15, 16].

Применение в настоящих исследованиях для диспергирования органической фазы реагента модификатора поверхностно-активных веществ (алкилсульфаты, алкилсульфонаты) обусловлено механизмом их влияния на свойства поверхности алмазов. Согласно положениям физико-химии растворов гетерополярные молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности раздела фаз алмаз – вода и коллектор – вода, ориентируясь аполярным радикалом в гидрофобную фазу и полярной группой в водную фазу, и уменьшают величины межфазных поверхностных натяжений твердое–жидкое $\sigma_{т-ж}$ и вода–коллектор $\sigma_{ж-к}$, что в соответствии с уравнением Юнга [17] ведет к уменьшению краевого угла смачивания, то есть поверхность твердого тела смачивается раствором ПАВ сильнее по сравнению с чистой водой. Такой эффект был подтвержден экспериментально в системе минерал – органический коллектор – водная фаза. Было показано, что добавки алкилсульфоната приводят к снижению гидрофобности поверхности минералов (рис. 5, а) [18]. Напротив, для гидрофильных минералов, вследствие обратной ориентации молекул ПАВ, возможна гидрофобизация поверхности [19], что является негативным фактором вследствие увеличения олеофильности минералов кимберлита, способствующей закреплению на них люминофорсодержащей композиции.

Действие полифосфатов на дисперсную систему минерал – водная фаза – коллектор происходит иначе. Основой действия полифосфатов является их закрепление на поверхности природно-гидрофильных минералов по механизму катионного обмена, когда образуется прочная химическая связь с двухзарядными катионами минерала (кальций, железо, магний) [20, 21]. Эффективное действие полифосфатов натрия также объясняется интенсивной адсорбцией поли-

Таблица 2

Изменение физико-химических характеристик и эффективности закрепления на алмазах при варьировании его фракционного состава органических коллекторов

№	Доля ДТФ в компаундном коллекторе	Краевой угол смачивания, град	Плотность, г/см ³	Динамическая вязкость измеренная, мПа с, 24 °С	Средний размер капли на алмазе, мм	Поверхностная концентрация люминофора, %
1	0 (только ТГКК)	85	965,0	167,0	1,5	16,9
2	5	87,5	961,1	154,5	1,65	21,7
3	10	90,0	957,2	133,0	1,62	24,4
4	15	92,0	951,3	110,3	1,33	24,5
5	20	93,3	947,4	92,1	0,96	22,1
6	25	94,3	942,5	72,0	0,75	20,4
7	30	95,0	937,6	64,1	0,65	18,6
8	100	97,5	867,0	3,64	0,4	15,5

фосфат-ионов на границе слоев кремнекислородных тетраэдров (например, природно-гидрофобных слоистых алюмосиликатов), что обусловлено сходством строения и размеров анионов триполифосфата и кремнекислородных тетраэдров глинистых минералов [22]. Полифосфаты позволяют также гидрофилизировать поверхность фосфатных минералов.

Результаты исследований показали принципиально иное влияние гексаметафосфата на поверхностные свойства минералов в сравнении с алкилсульфатами. Уменьшение величины краевого угла смачивания на алмазе выражено в существенно меньшей степени и, напротив, наблюдается весьма интенсивная гидрофизация поверхности флогопита (рис. 5, б). Гидрофобизации и повышения олеофильности природно-гидрофильных минералов кимберлита при добавках гексаметафосфата не происходит (капля органической жидкости отрывается от минерала).

Органические полимеры, например карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), проявляют регулирующие свойства в отношении как поверхности алмаза, так

и гидрофобных минералов кимберлита, что вытекает из существенного снижения краевого угла смачивания (на $10\text{--}23^\circ$) на этих минералах при увеличении концентрации реагента до 3 г/л (рис. 6, а). Более перспективны реагенты группы алкилфосфонатов. Измерения краевого угла смачивания показали, что в интервале концентраций от 0 до 1 г/л эти реагенты (на примере оксиэтилендифосфоновой кислоты – ОЭДФ) способствуют существенному снижению гидрофобности (олеофильности) флогопита, в то время как состояние поверхности алмаза изменяется в существенно меньшей степени (рис. 6, б). Во многом эта особенность может быть следствием образования координационной связи между анионами реагента и катионами Ca и Mg кристаллической решетки минералов.

Полученные результаты позволили сделать вывод о целесообразности применения реагентов-диспергаторов, не содержащих в своей структуре значительного аполярного радикала и взаимодействующих с минералами кимберлита посредством образования химических или координационных связей.

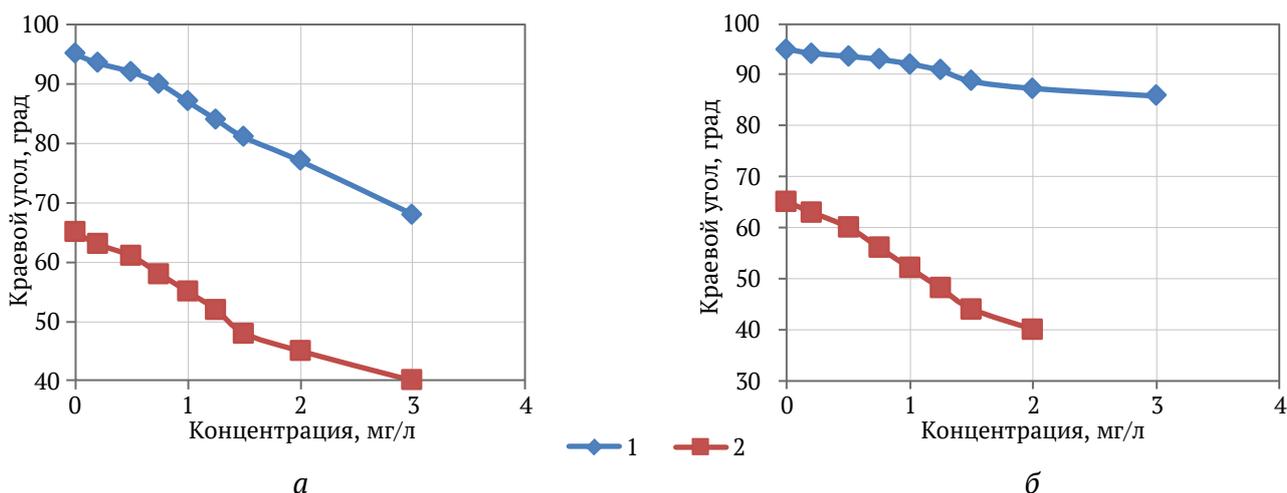


Рис. 5. Влияние концентрации алкилсульфата (а) и гексаметафосфата (б) на краевые углы смачивания алмаза (1) и флогопита (2)

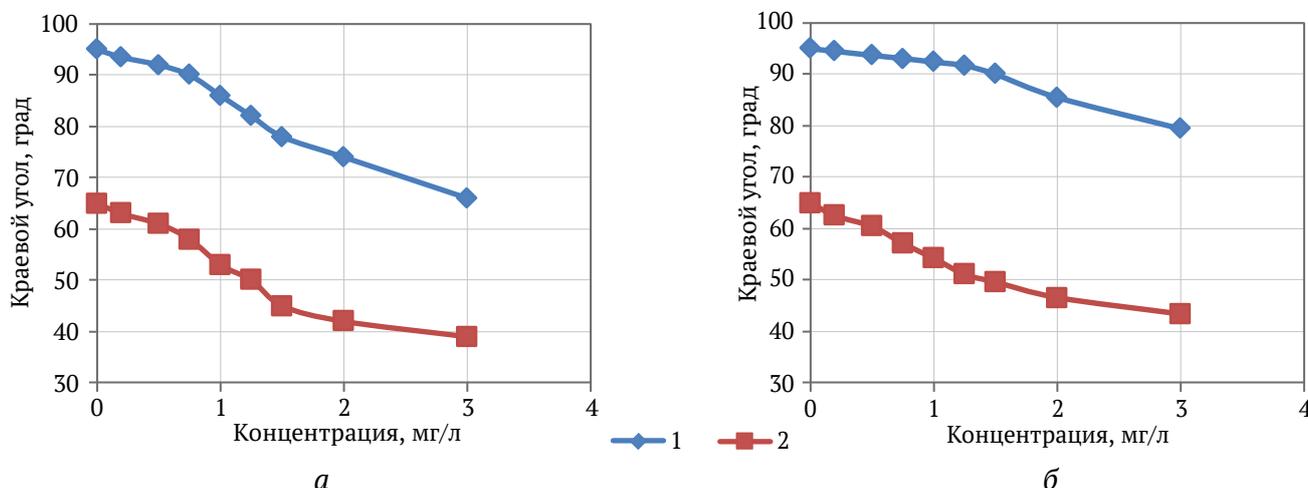


Рис. 6. Влияние концентрации в водной фазе эмульсии реагента-модификатора КМЦ (а) и ОЭДФ (б) на краевой угол смачивания алмаза (1) и флогопита (2)



Проверка выбранных диспергаторов в лабораторных условиях показала их эффективность. Наилучшие результаты при расходе реагента 1,5 г/л (наибольшая селективность закрепления люминофоров) установлены для оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОЭДФ), гексаметафосфата, метасиликата и триполифосфата натрия (табл. 3).

Селективность закрепления рассчитывалась по уравнению

$$СЗЛ_{АК} = \frac{С_{ЛА}}{15} - \frac{С_{ЛК}}{3}.$$

Обозначения переменных в уравнении приведены в табл. 3.

3. Выбор температурного режима обработки алмазосодержащих продуктов реагентами-модификаторами

Температура среды в операции приготовления и обработки алмазосодержащего материала реагентом-модификатором в существенной мере влияет на интенсивность и селективность закрепления люминофоров на поверхности алмазов и кимберлита. При-

чиной существенного влияния температуры является изменение физико-химических характеристик органических жидкостей, представляющих собой продукты нефтепереработки сложного состава [23]. Температура среды влияет на энергию границы раздела фаз и смачиваемость минералов в дисперсных системах, на вязкость коллектора и его способность растекаться по поверхности, а также на устойчивость закрепления в турбулентной среде [24, 25].

Для выбора оптимального температурного режима были проведены исследования по обработке алмазосодержащих кимберлитовых продуктов эмульсиями реагентов-модификаторов, в которых в качестве коллекторов применялись нефтепродукты различного фракционного состава.

Эффективность закрепления люминофоров оценивалась по поверхностной концентрации закрепившихся люминофоров, определяемой визиометрическим способом. В отличие от исследований, описанных в работе [17], обработанный алмазо-минеральный продукт после обработки был направлен на процесс рентгенолюминесцентной сепарации, проведенный в сепараторе «Полюс-М». Результаты прове-

Таблица 3

Влияние реагентов-диспергаторов на поверхностную концентрацию и селективность закрепления люминофоров на поверхности алмазов и кимберлита

№	Реагент-диспергатор	Поверхностная концентрация люминофора на алмазе $C_{ЛА}$, %		Поверхностная концентрация люминофора на кимберлите $C_{ЛК}$, %		Селективность закрепления $СЗЛ_{АК}$, доли ед.	
		При концентрации реагента, г/л					
		0	1,5	0	1,5	0	1,5
1	Триполифосфат	38	21,8	7,5	1,5	0,03	0,95
2	Гексаметафосфат	39,3	23,5	7	1,6	0,29	1,03
3	ОЭДФ	38,3	25,5	7,1	1,9	0,19	1,07
4	Кукурузный крахмал	38	20,4	6,9	2,2	0,23	0,63
5	КМЦ	37,4	18,5	6,7	1,8	0,26	0,63
6	Сульфенол	37,8	19,5	7,1	1,8	0,15	0,70
7	Метасиликат натрия	39,4	22,5	7,9	2,1	-0,01	0,80
8	Лигносульфонат	38,9	20,3	7,6	2,2	0,06	0,62

Таблица 4

Результаты визиометрического анализа влияния температурного режима на эффективность закрепления люминофоров на поверхности алмазов и кимберлита

№	Состав органического коллектора	Температура, °С					
		20	25	30	35	40	45
		Покрытие поверхности алмаза люминофором, %					
3	ТГКК (85%) ДТФ (15%)	17,4	28,4	33	34,1	36,2	35,7
		Покрытие поверхности кимберлита люминофором, %					
6	ТГКК (85%) ДТФ (15%)	2,4	2,6	2,8	2,9	3,2	3,5
		Селективность закрепления, усл. ед.					
9	ТГКК (85%) ДТФ (15%)	0,43	1,03	1,27	1,31	1,35	1,21
		Извлечение алмазов, %					
12	ТГКК (85%) ДТФ (15%)	80	85	90	95	95	95
		Выход кимберлита, %					
15	ТГКК (85%) ДТФ (15%)	1,0	1,1	1,3	1,3	1,3	1,3

Примечания: ТГКК – тяжелый газойль каталитического крекинга; ДТФ – дизельная техническая фракция.



денных исследований подтвердили, что увеличение температуры с 15 до 40 °С усиливает закрепление люминофора на алмазах и кимберлите для всех составов органического коллектора (табл. 4). Результаты исследований показали, что при повышении температуры среды более 40 °С эффективность закрепления люминофора на алмазах незначительно снижается.

Анализ данных расчета селективности закрепления люминофора показывает, что максимальная селективность закрепления люминофора на алмазе и кимберлите наблюдается при температуре обработки от 30 до 45 °С. Анализ результатов рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего кимберлитового продукта подтвердил данные визиометрического анализа и показал возможность максимального извлечения алмазов в диапазоне температур от 30 до 45 °С (см. табл. 4) без существенного увеличения выхода кимберлита. Полученные результаты позволили рекомендовать проводить процесс обработки алмазосодержащих продуктов при повышенной температуре.

4. Выбор компонентного состава эмульсии реагентов-модификаторов спектрально-кинетических характеристик алмазов

Базовыми технологическими параметрами режимов селективного модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов являются следующие характеристики реагента-модификатора: соотношение люминофор – коллектор; соотношение коллектор – водная фаза и концентрация реагента-диспергатора. Учитывая возможность наличия взаимного влияния факторов и необходимость поиска области экстремума для определения оптимального состава реагента-модификатора, был применен метод факторного эксперимента второго порядка. Исходная матрица ПФЭ (ортогональный центрально-композиционный план второго порядка) составлялась по стандартной методике с дополнением нулевой и звездных точек [26]. Экспериментальный массив составил 15 опытов.

Результаты математической обработки результатов эксперимента, проведенные в среде Excel, позволили определить область оптимальных соотношений между компонентами реагента модификатора МЛА-3 в рабочей эмульсии. Для соотношения вода : коллектор выбрано соотношение 90 : 1. Оптимальная концентрация ГМФ – 1,5 г/л (рис. 7). Оптимальное значение соотношения коллектор : люминофор – 9 : 1. Выбранные параметры близки к значениям, которые были выбраны по результатам лабораторных исследований и использовались как координаты центра матрицы (10 : 1, 60 : 1 и 1,5 г/л).

Результаты показали, что применение водной эмульсии реагентов-модификаторов МЛА-1 на основе люминофора ФЛ-530-Г3-Г5 и МЛА-3 на основе люминофора Э-515-115-Г5 с выбранными параметрами компонентного состава эмульсии реагента-модификатора и с применением в качестве реагента-диспергатора гексаметафосфата натрия приводит

к требуемому изменению спектрально-кинетических характеристик слабо и аномально люминесцирующих алмазов (табл. 5).

Результаты испытаний, проведенных на сепараторе «Полюс-М», показали высокую эффективность разработанных реагентов модификаторов и режимов обработки, обеспечивающих возможность извлечения более 80–95 % слабо и аномально светящихся алмазов в концентрат рентгенолюминесцентной сепарации без существенного возрастания выхода в концентрат кимберлита (см. табл. 5).

Таким образом, результатами проведенных исследований подтверждена эффективность выбранной технологии подготовки алмазосодержащих продуктов к процессу РЛС, определены оптимальные состав реагента-модификатора и параметры процесса обработки алмазосодержащих кимберлитовых продуктов.

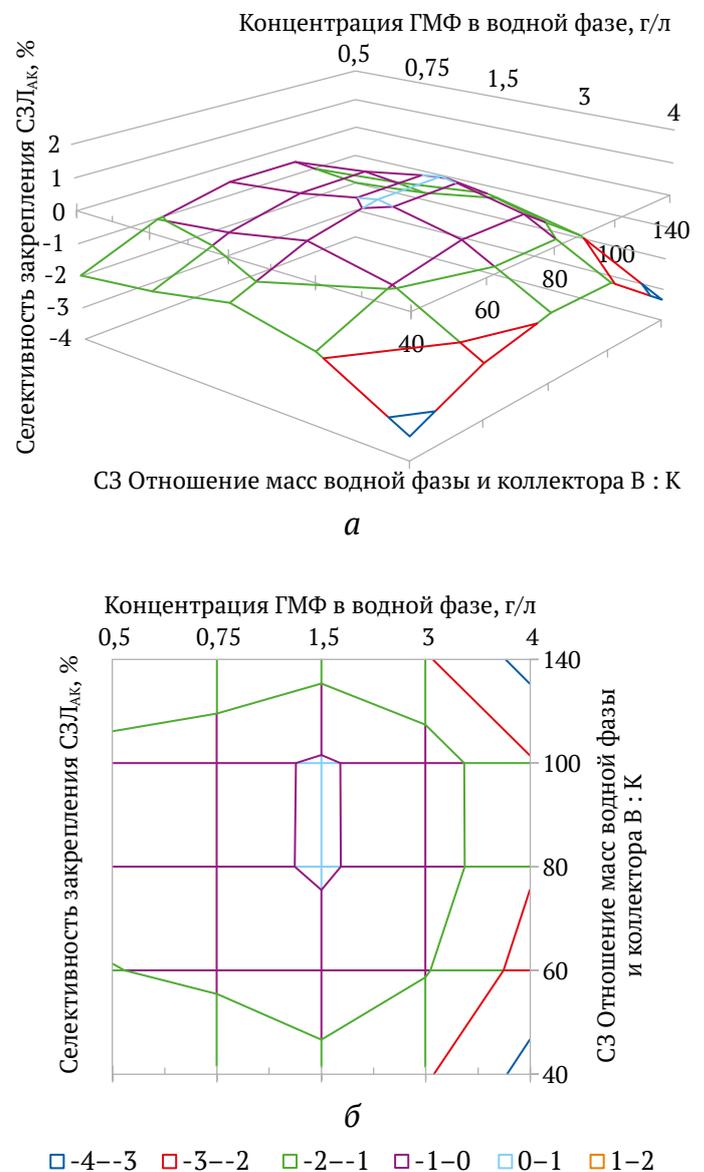


Рис. 7. 3D-графики (а) и сечения (б) зависимостей селективности закрепления люминофора (СЗЛ_{АК}) от соотношения масс водной фазы и коллектора (В : К) и концентрации гексаметафосфата (ГМФ)



Таблица 5

**Результаты испытаний реагентов-модификаторов на основе люминофоров
ФЛ-530 (МЛА-1) и Э-515-115 (МЛА-3) на алмазосодержащих кимберлитовых продуктах**

№	Состав композиции	Минерал	Sv	$\tau_{\text{с}}$, мс	$A_{\text{МК}}$, мВ	$A_{\text{БК}} - A_{\text{Б}}$, мВ	$K_{\text{А}}$	Извлечение, %
1	Без использования люминофоров	Алмаз (сл)	0,15	4,3	120	564	5,7	40
		Алмаз (ан)	–	0,1	Не изм.	1022	≥ 50	20
		Кимберлит	–	–	Не изм.	Менее 50	–	0,75
2	МЛА-1 (ФЛ-530 + ТГКК + ДТФ)	Алмаз (сл)	0,22	1,6	329	1216	4,7	80
		Алмаз (ан)	0,17	0,6	275	1469	6,3	90
		Кимберлит	–	–	Не изм.	Менее 50	–	0,9
3	МЛА-3 (Э-515-115-Г5 + ТГКК + ДТФ)	Алмаз (сл)	0,26	2,3	258	1105	5,0	95
		Алмаз (ан)	0,18	0,5	168	1465	9,9	90
		Кимберлит	–	–	Не изм.	Менее 50	–	0,5
4	Условия селективного режима РЛС	Алмаз	0,1–1	0,1–10	Более 100	–	0,2–12	Извл

Примечания: сл, ан – слабо и аномально люминесцирующие алмазы соответственно, $A_{\text{Б}}$ – амплитуда быстрой компоненты сигнала рентгенолюминесценции воздуха (фон); Не изм. – не измеряется.

Выводы

В результате выполненных исследований определены эффективный состав и режим применения реагентов-модификаторов в технологии подготовки алмазосодержащего материала к процессу рентгенолюминесцентной сепарации.

Установлена возможность целенаправленного модифицирования спектральных характеристик слабо и аномально светящихся алмазов, одновременно присутствующих в алмазосодержащем материале, за счет применения люминофоров на основе ортосиликата цинка и сульфидов цинка (МЛА-1 и МЛА-3), обеспечивающих алмазным кристаллам спектрально-кинетиические характеристики, находящиеся в глубине зоны идентификации системы детектирования.

Выбраны состав коллектора кристаллов (85 % ТГКК и 15 % ДТФ) люминофорсодержащей композиции и температурный режим обработки (30–45 °С) алмазосодержащего продукта, обеспечивающие интенсивное и селективное закрепление люминофоров на поверхности алмазных кристаллов.

Результатами математической обработки с использованием критерия селективности закрепления

люминофорсодержащей эмульсии на алмазах и минералах кимберлита, рассчитываемого по величинам измеренных поверхностных концентраций люминофоров на минералах, определены оптимальные соотношения основных компонентов в эмульсии реагента-модификатора, составляющие: вода : коллектор = 90 : 1; коллектор : люминофор = 9 : 1 при концентрации ГМФ – 1,5 г/л.

Выбраны реагенты-диспергаторы (оксиэтилендифосфоновая кислота, гексаметафосфат, метасиликат и триполифосфат натрия), обеспечивающие селективное закрепление люминофоров на алмазах за счет снижения закрепления люминофоров на поверхности зерен кимберлита.

Результатами испытаний, проведенных на сепараторе «Полус-М», подтверждена высокая эффективность реагентов модификаторов разработанного состава и режимов их применения для обработки алмазосодержащего материала, обеспечивающих извлечение в концентрат рентгенолюминесцентной сепарации слабо и аномально светящихся алмазов на уровне 80–95 % без увеличения выхода в него кимберлита.

Список литературы

1. Миронов В.П. Оптическая спектроскопия алмазов из концентратов и хвостов рентгенолюминесцентной сепарации. *Наука и образование*. 2006;(1)31–36.
2. Мартынович Е.Ф., Миронов В.П. Рентгенолюминесценция алмазов и ее использование в алмазодобывающей промышленности. *Известия вузов. Физика*. 2009;52(12/3):202–210.
3. Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Морозов В.В. и др. Исследование механизма и выбор режимов селективного закрепления люминофорсодержащей эмульсии на алмазах. *Физико-технические проблемы переработки полезных ископаемых*. 2020;(1):104–113. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200111> (Перев. вер.: Chanturiya V.A., Dvoichenkova G.P., Morozov V.V. et al. Selective attachment of luminophore-bearing emulsion at diamonds-mechanism analysis and mode selection. *Journal of Mining Science*. 2020;56(1):96–103. <https://doi.org/10.1134/S1062739120016527>)
4. Морозов В.В., Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Чантурия Е.Л. Анализ гидрофобных взаимодействий в системе «алмаз-органическая жидкость-неорганический люминофор» при модифицировании



спектрально-кинетических характеристик алмазов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(2):94–104. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20220209> (Перев. вер.: Morozov V.V., Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L. hydrophobic interactions in the diamond–organic liquid–inorganic luminophore system in modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds. *Journal of Mining Science*. 2022;58(2):257–266. <https://doi.org/10.1134/s1062739122020090>)

5. Подкаменный Ю. А., Макалин И. А. Обоснование совокупности спектрально-кинетических параметров рентгенolumинесцентных сепараторов для селективного извлечения алмазных кристаллов. В: *Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2021)*. Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет); 2021. С. 341–345.

6. Kondratyev S.A. Effect of Apolar Reagents and Surfactants on the Stability of a Flotation Complex *Journal of Mining Science*. 2000;36(4):399–407. <https://doi.org/10.1023/A:1026697811202>

7. Пентин Ю. А., Вилков Л. В. *Физические методы исследования в химии*. М: Мир; 2003.

8. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. *Цифровая обработка изображений в среде Matlab*. М.: Техносфера; 2006. 616 с. (Orig. ver.: Gonzales R.C., Woods R.E., Eddins S.L. *Digital image processing using MATLAB*. Prentice Hall; 2004.)

9. Горобец Б. С., Рогожин А. А. *Спектры люминесценции минералов*. М.: Изд-во ВИМС; 2001. 316 с.

10. Huhtamäki T., Tian X., Korhonen J.T., Ras R.H.A. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. *Nature Protocols*. 2018;13:1521–1538. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z>

11. Сепаратор «Полюс-М». Паспорт и инструкция по эксплуатации. СПб.: АО «Буревестник»; 2015. 134 с.

12. Mironov V.P., Emelyanov A.S., Shabalin S.A. et al. X-Ray luminescence in diamonds and its application in industry. In: *Luminescence and Laser Physics: XVII International Conference on Luminescence and Laser Physics – LLPh 2019*. 1–6 July, 2019. Irkutsk, Russia. 2021;2392(1):020010. <https://doi.org/10.1063/5.0061972>

13. Liu L., Cheng G., Yu W., Yang Ch. Flotation collector preparation and evaluation of oil shale. *Oil Shale*. 2018;35(3):242–251. <https://doi.org/10.3176/oil.2018.3.04>

14. Морозов В. В., Коваленко Е. Г., Двойченкова Г. П., Чуть-Ды В. А. Выбор температурных режимов кондиционирования и флотации алмазосодержащих кимберлитов компаундными собирателями. *Горные науки и технологии*. 2022;7(4):287–297. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-23>

15. Верхотурова В. А. Елшин И. В., Немаров А. А. и др. Научное обоснование и выбор оптимального варианта по восстановлению гидрофобных свойств поверхности алмазов из руды трубки «Интернациональная». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014;(8):51–56.

16. Авдохин В. М., Чернышева Е. Н. Современные технологии обогащения алмазосодержащих кимберлитов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(S1):465–477.

17. Адамсон А. *Физическая химия поверхностей*. М.: Мир; 1979. 568 с. (Orig. ver.: Adamson A.W. *Physical chemistry of surfaces*. New York: Wiley; 1976. 698 p.)

18. Srdjan M. Bulatovic, in *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice* i 2007. Elsevier, 458 p. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20230311>

19. Somasundaran P., Zhang L. Adsorption of surfactants on minerals for wettability control in improved oil recovery processes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2006;52(1–4):198–212. <https://doi.org/10.1016/j.PETROL.2006.03.022>

20. Lee H., Lim H.-K., Kim H. Hydration Thermodynamics of non-polar aromatic hydrocarbons: comparison of implicit and explicit solvation models. *Molecules*. 2018;23(11):2927. <https://doi.org/10.3390/molecules23112927>

21. Афанасова А. В., Абурова В. А., Прохорова Е. О., Лушина Е. А. Исследование влияния депрессоров на флотоактивные порообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6–2):161–174. https://doi.org/10.25018/0236_14_93_2022_62_0_161

22. Chmielewská E., Hodossyová R., Kovačková M., Urík M. Comparable phosphate adsorption onto some natural aluminosilicates vs. Fe(III)oxyhydroxide. *Desalination and Water Treatment*. 2016;(16):7387–7395. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1017008>

23. Туманян Б. П. *Научные и прикладные аспекты теории нефтяных дисперсных систем*. М.: Техника; 2000. 336 с.

24. Полежаева Н. И. *Физико-химия нефтяных дисперсных систем. Термодинамика и кинетика фазовых переходов в нефтяных дисперсных системах*. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева; 2021. 94 с.

25. Земцов Ю. В., Мазаев В. В. *Современное состояние физико-химических методов увеличения нефтеотдачи: литературно-патентный обзор*. Екатеринбург: ООО «Издательские решения»; 2021. 240 с.

26. Лунев В. А. *Математическое моделирование и планирование эксперимента*. СПб.: Изд-во Политехнического университета; 2012. 153 с.



References

1. Mironov V.P. Optical spectroscopy of diamonds from concentrates and tailings of X-ray luminescence separation. *Nauka i Obrazovaniye*. 2006;(1)31–36. (In Russ.)
2. Martynovich E.F., Mironov V.P. X-ray luminescence of diamonds and its use in the diamond mining industry. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2009;52(12/3):202–210. (In Russ.)
3. Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Morozov V.V. et al. Selective attachment of luminophore-bearing emulsion at diamonds-mechanism analysis and mode selection. *Journal of Mining Science*. 2020;56(1):96–103. <https://doi.org/10.1134/S1062739120016527> (Orig. ver.: Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Morozov V.V. et al. Selective attachment of luminophore-bearing emulsion at diamonds-mechanism analysis and mode selection. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Pererabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2020;(1):104–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200111>)
4. Morozov V.V., Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L. hydrophobic interactions in the diamond–organic liquid–inorganic luminophore system in modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds. *Journal of Mining Science*. 2022;58(2):257–266. <https://doi.org/10.1134/s1062739122020090> (Orig. ver.: Morozov V.V., Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L. hydrophobic interactions in the diamond–organic liquid–inorganic luminophore system in modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Pererabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2022;(2):94–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220209>)
5. Podkamennyi Yu.A., Makalin I.A. Substantiation of the collection of spectral-kinetic parameters of x-ray luminescent separators for selective extraction of diamond crystals. In: *Problems of Integrated and Environmentally Safe Processing of Natural and Technogenic Mineral Raw Materials (Plaksin Readings – 2021)*. Vladikavkaz: North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University); 2021. Pp. 341–345. (In Russ.)
6. Kondratyev S.A. Effect of Apolar Reagents and Surfactants on the Stability of a Flotation Complex *Journal of Mining Science*. 2000;36(4):399–407. <https://doi.org/10.1023/A:1026697811202>
7. Pentin Yu.A., Vilkov L.V. *Physical research methods in chemistry*. Moscow: Mir Publ. House; 2003. (In Russ.)
8. Gonzales R. C., Woods R. E., Eddins S. L. *Digital image processing using MATLAB*. Prentice Hall; 2004. (Transl. ver.: Gonzales R., Woods R., Eddins S. *Digital image processing using Matlab*. Moscow: Tekhnosfera; 2006. 616 p. (In Russ.))
9. Gorobets B.S., Rogozhin A.A. *Luminescence spectra of minerals*. Moscow: Publishing House of the All-Union Institute of Mineral Raw Materials; 2001. 316 p. (In Russ.)
10. Huhtamäki T., Tian X., Korhonen J.T., Ras R.H.A. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. *Nature Protocols*. 2018;13:1521–1538. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z>
11. Separator “Polyus-M”. Passport and operating instructions. Saint Petersburg: JSC “Burevestnik”; 2015.
12. Mironov V.P., Emelyanov A.S., Shabalin S.A. et al. X-Ray luminescence in diamonds and its application in industry. In: *Luminescence and Laser Physics: XVII International Conference on Luminescence and Laser Physics – LLPh 2019*. 1–6 July, 2019. Irkutsk, Russia. 2021;2392(1):020010. <https://doi.org/10.1063/5.0061972>
13. Liu L., Cheng G., Yu W., Yang Ch. Flotation collector preparation and evaluation of oil shale. *Oil Shale*. 2018;35(3):242–251. <https://doi.org/10.3176/oil.2018.3.04>
14. Morozov V.V., Kovalenko E.G., Dvoichenkova G.P., Chut-Dy V.A. Selection of temperature regimes for conditioning and flotation of diamond-bearing kimberlite with compound collectors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):287–297. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-23>
15. Verkhoturova V., Elshin I., Nemarov A., Tolstoy M. et al. Scientific justification and optimum alternative selection to recover hydrophobic properties of diamond surface from “International” tube ore. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;(8):51–56. (In Russ.)
16. Avdokhin V.M., Chernysheva E.N. Modern technologies of diamond-containing kimberlites enrichment. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2010;(S1):465–477.
17. Adamson A.W. *Physical chemistry of surfaces*. New York: Wiley; 1976. 698 p. (Transl. ver.: Adamson A. *Physical chemistry of surfaces*. Moscow: Mir Publ. House; 1979. 568 p. (In Russ.))
18. Srdjan M. Bulatovic, in *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice* i 2007. Elsevier, 458 p. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230311>
19. Somasundaran P., Zhang L. Adsorption of surfactants on minerals for wettability control in improved oil recovery processes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2006;52(1–4):198–212. <https://doi.org/10.1016/j.PETROL.2006.03.022>
20. Lee H., Lim H.-K., Kim H. Hydration Thermodynamics of non-polar aromatic hydrocarbons: comparison of implicit and explicit solvation models. *Molecules*. 2018;23(11):2927. <https://doi.org/10.3390/molecules23112927>
21. Afanasova A.V., Aburova V.A., Prokhorova E.O., Lushina E.A. Investigation of the influence of depressors on flotation-active rock-forming minerals in sulphide gold-bearing ore flotation. *Mining*



Informational and Analytical Bulletin. 2022;(6–2):161–174. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_161

22. Chmielewská E., Hodossyová R., Kovaláková M., Urík M. Comparable phosphate adsorption onto some natural aluminosilicates vs. Fe(III)oxyhydroxide. *Desalination and Water Treatment*. 2016;(16):7387–7395. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1017008>

23. Tumanyan B.P. *Scientific and applied aspects of the theory of oil dispersed systems*. Moscow: Technika; 2000. 336 p.

24. Polezhaeva N.I. *Physico-chemistry of petroleum dispersed systems. Thermodynamics and kinetics of phase transitions in petroleum dispersed systems*. Krasnoyarsk: Sibgau named after M.F. Reshetnev; 2021. 94 p. (In Russ.)

25. Zemtsov Yu.V., Mazaev V.V. *The current state of physico-chemical methods of increasing oil recovery: a literary and patent review*. Yekaterinburg: Publishing Solutions LLC; 2021. 240 p. (In Russ.)

26. Lunev V.A. *Mathematical modeling and experimental planning*. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University; 2012. 153 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Валентин Алексеевич Чантурия – доктор технических наук, профессор, академик РАН, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4410-8182](https://orcid.org/0000-0002-4410-8182), Scopus ID [7004497128](https://scopus.com/authorid/7004497128); e-mail vchan@mail.ru

Валерий Валентинович Морозов – доктор технических наук, профессор кафедры общей и неорганической химии, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4105-944X](https://orcid.org/0000-0003-4105-944X), Scopus ID [7402759618](https://scopus.com/authorid/7402759618)

Галина Петровна Двойченкова – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3637-7929](https://orcid.org/0000-0003-3637-7929), Scopus ID [8837172700](https://scopus.com/authorid/8837172700); e-mail dvoigp@mail.ru

Юрий Александрович Подкаменный – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4104-9113](https://orcid.org/0000-0002-4104-9113), Scopus ID [57209793744](https://scopus.com/authorid/57209793744)

Александр Сергеевич Тимофеев – старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-3382-6007](https://orcid.org/0000-0002-3382-6007), Scopus ID [57191282007](https://scopus.com/authorid/57191282007)

Information about the authors

Valentin A. Chanturiya – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4410-8182](https://orcid.org/0000-0002-4410-8182), Scopus ID [7004497128](https://scopus.com/authorid/7004497128); e-mail vchan@mail.ru

Valeriy V. Morozov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4105-944X](https://orcid.org/0000-0003-4105-944X), Scopus ID [7402759618](https://scopus.com/authorid/7402759618)

Galina P. Dvoichenkova – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3637-7929](https://orcid.org/0000-0003-3637-7929), Scopus ID [8837172700](https://scopus.com/authorid/8837172700); e-mail dvoigp@mail.ru

Yuri A. Podkamennyi – Dr. Sci. (Eng.), Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4104-9113](https://orcid.org/0000-0002-4104-9113), Scopus ID [57209793744](https://scopus.com/authorid/57209793744)

Aleksandr S. Timofeev – Leading Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-3382-6007](https://orcid.org/0000-0002-3382-6007), Scopus ID [57191282007](https://scopus.com/authorid/57191282007)

Поступила в редакцию 06.09.2023

Поступила после рецензирования 16.09.2023

Принята к публикации 10.10.2023

Received 06.09.2023

Revised 16.09.2023

Accepted 10.10.2023



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-07-129>

УДК 502.3.7



Оценка эффективности и экологичности сорбент-ориентированного метода восстановления загрязненных тяжелыми металлами и металлоидами почв

В. В. Юрак^{1,2}   , Р. А. Апакашев¹  , М. С. Лебзин¹  , А. Н. Малышев¹  

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

 vera_yurak@mail.ru

Аннотация

Загрязнение природных экосистем тяжелыми металлами и металлоидами (НММ) – это главным образом результат антропогенной деятельности. Именно поэтому в настоящее время разрабатываются технологии, направленные на ограничение подвижности НММ и уменьшение сроков протекания химических реакций по переводу поллютантов из подвижной в неподвижную форму. Решение проблемы рекультивации всегда предполагает выбор наиболее перспективного и эффективного вида рекультивационных работ, а также обоснование приоритизации земель, подлежащих рекультивации. В части эффективности и перспективности популярность приобретает сорбент-ориентированный метод, основанный на принципе «зеленой» утилизации техногенных отходов в качестве сырья для создания композитных сорбентов нового типа в целях рекультивации нарушенных земель. Зарубежная практика в качестве обоснования необходимости и приоритизации рекультивационных работ использует различные методики оценки экологических рисков. **Цель** текущего исследования – апробировать имеющиеся распространенные методики оценки рисков причинения экологического ущерба и оценить эффективность и «экологичность» разрабатываемых авторских композитных сорбентов с позиции оценки и сравнения уровней возникновения потенциальных экологических рисков/рисков нанесения экологического ущерба после их (сорбентов) применения.

Задачи: 1) рассмотреть теоретические аспекты НММ: сформулировать определение, рассмотреть генезис НММ, исследовать вопрос токсичности НММ и выявить наиболее распространенные методики оценки экологических рисков НММ; 2) апробировать имеющиеся методики оценки экологических рисков НММ; 3) оценить эффективность и «экологичность» разрабатываемых авторских композитных сорбентов с позиции оценки и сравнения уровней возникновения потенциальных экологических рисков/рисков нанесения экологического ущерба после их (сорбентов) применения.

Объект исследования: горный отвод Левихинского рудника (зона экологического бедствия) как экосистема нарушенных земель, в составе которой присутствуют промышленные отвалы, содержащие НММ.

Гипотеза исследования: доказать возможность «зеленой утилизации» техногенных отходов в качестве сырья для композитных сорбентов, используемых для рекультивации нарушенных земель, без увеличения рисков причинения экологического ущерба природной среде. В результате проведенных экспериментов наибольшую эффективность продемонстрировали сорбенты торф/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 20/80, %), торф/диатомит/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 5/15/80, %), где суммарная эффективность превышала 89 %. У сорбента торф/диатомит (пропорция при естественной влажности: 25/75, %) наблюдается суммарная эффективность 67,7 %. Оцениваемые риски *ER* и *EH* после применения авторских композитных сорбентов, в состав которых входят осадки водоподготовки, снижались в среднем на 89,5 и 88 % соответственно.

Ключевые слова

сорбенты, рекультивация, нарушенные земли, экологические риски, методики, оценка, «зеленая» утилизация, тяжелые металлы и металлоиды, биота, токсичность, экологический ущерб

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-24-20102, при финансовой поддержке Правительства Свердловской области.

Для цитирования

Yurak V.V., Apakashev R.A., Lebzin M.S., Malyshev A.N. Assessment of performance and environmental friendliness of a sorbent-based remediation method for heavy metal and metalloid contaminated soils. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):327–340. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-07-129>



SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Assessment of performance and environmental friendliness of a sorbent-based remediation method for heavy metal and metalloid contaminated soils

V. V. Yurak^{1,2}   , R. A. Apakashev¹  , M. S. Lebzin¹  , A. N. Malyshev¹  ¹Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation²Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation vera_yurak@mail.ru

Abstract

The contamination of natural ecosystems with heavy metals and metalloids (HMMs) primarily results from anthropogenic activities. Consequently, ongoing efforts are dedicated to the development of technologies aimed at restraining the mobility of HMMs and expediting chemical reactions that convert pollutants from mobile to immobile states. Addressing the reclamation issue always necessitates the selection of the most promising and effective type of reclamation work, as well as justification of land prioritization for reclamation purposes. In terms of performance and future potential, the sorbent-oriented approach, grounded in the concept of “green” utilization of man-made waste as a raw material for creating novel composite sorbents, is gaining traction for land reclamation in disturbed areas. In international practice, diverse environmental risk assessment methods are employed to substantiate the necessity for and prioritize reclamation efforts.

The aim of the present study is to evaluate established conventional methods for assessing the risks associated with environmental harm. Additionally, this research aims to assess the efficacy and ecological compatibility of the composite sorbents developed by the author. This evaluation will be conducted by assessing and comparing the levels of potential environmental risks or risks of environmental damage subsequent to the application of these sorbents.

The objectives of this study are as follows: 1) to explore the theoretical aspects of HMMs: including the formulation of a definition, investigation onto the origins of HMMs, examination of HMMs’ toxicity, and identification of prevalent methods for evaluating the environmental risks associated with HMMs; 2) to evaluate the effectiveness of established methods for assessing the environmental risks posed by HMMs; 3) to assess the efficacy and environmental sustainability of the composite sorbents developed by the author. This evaluation will involve an examination and comparison of the levels of potential environmental risks and the risks of environmental damage subsequent to the application of these sorbents.

The research subject: the mining allotment within the Levikhinskoye mine (classified as an environmental disaster site) is investigated as a disturbed land ecosystem, encompassing industrial waste dumps containing HMMs.

The research hypothesis aims to establish the viability of “green” waste utilization from industrial sources as a raw material for composite sorbents used in land reclamation, without escalating the environmental damage. The conducted experiments revealed that sorbents composed of peat/water treatment sludge (at a ratio of 20/80 wt. % with natural moisture content) and peat/diatomite/water treatment sludge (at a ratio of 5/15/80 wt. % with natural moisture content) exhibited the highest level of performance, surpassing an overall efficiency of 89%. A sorbent composed of peat/diatomite (at a ratio of 25/75 wt. % with natural moisture content) demonstrated an overall efficiency of 67.7%. The estimated environmental risks (*ER* and *ED*) after the application of the proprietary composite sorbents, which include water treatment sludge, exhibited an average reduction of 89.5% and 88%, respectively.

Keywords

sorbents, reclamation, disturbed lands, environmental risks, methods, assessment, “green” disposal, heavy metals and metalloids, biota, toxicity, environmental damage

Acknowledgments

The study was carried out at the expense of grant of the Russian Science Foundation No. 22-24-20102 with the financial support of the Government of the Sverdlovsk Region.

For citation

Yurak V.V., Apakashev R.A., Lebzin M.S., Malyshev A.N. Assessment of performance and environmental friendliness of a sorbent-based remediation method for heavy metal and metalloid contaminated soils. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):327–340. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-07-129>



Введение

Любая деятельность человека связана с воздействием на природную среду, которая проявляется в виде изъятия природных ресурсов, загрязнения окружающей среды и нарушения поверхности и недр Земли. С каждым годом техногенный пресс на природу возрастает: ежегодно в атмосферный воздух поступает более 30 млн т загрязняющих веществ, 19 % сточных вод сбрасывается в водные объекты без очистки. Практически во всех регионах наблюдается ухудшение состояния почв в силу водной и ветровой эрозии, переувлажнение, подтопление земель и заболачивание. Опустынивание затронуло более 100 млн га, еще 18 млн га представляют собой экологические зоны с загрязнением почв, располагающиеся вокруг промышленных комплексов. Ежегодно образуется около 4 млрд т отходов производства и потребления, при этом санкционированными объектами размещения отходов занято примерно 4 млн га земельных площадей. Накоплено более 30 млн т отходов производства и потребления, из которых к числу высокотоксичных относится более 400 тыс. т, растет число отходов, которые не вовлекаются во вторичный хозяйственный оборот. По экспертным оценкам, ежегодные потери ВВП России, обусловленные ухудшением качества окружающей среды (без учета ущерба здоровью людей), составляют от 4 до 6 %¹. Немаловажную роль в ухудшении состояния экологической безопасности играет горнопромышленный комплекс России, который не относится к числу отраслей с наибольшей ущербностью промышленного производства, но оказывает воздействие на все элементы биосферы и является источником выемки и перемещения огромных масс литосферного массива. Согласно источнику [1] на единицу извлекаемого из недр твердого полезного ископаемого приходится от 1,1 до 6,7 ед. пустой породы, которая размещается на поверхности. В результате растут площади нарушенных земель, в структуре которых основной удельный вес на большинстве предприятий занимают отвалы и хвостохранилища (от 62 до 75 % земельного отвода при разработке железорудных месторождений и еще больше – на меднорудных предприятиях) [1].

По данным Федеральной службы государственной статистики к числу регионов с высоким уровнем деградации земель относятся: Уральский, Сибирский и Дальневосточный, которые формируют минерально-сырьевые центры РФ. Соответственно, в общем объеме нарушенных земель здесь преобладают нарушения, связанные с разработкой месторождений полезных ископаемых, – около 80 % [2]. Наибольшая доля нарушенных земель приходится на открытый способ разработки месторождений при том, что в России данное техническое направление остается основным. Нарушение охватывает и литосферный массив, когда происходит формирование техногенных пустот с вы-

ходом и без выхода на поверхность. В первом случае это карьерные выемки действующих и отработанных карьеров и зоны обрушения действующих и закрытых шахт, во втором – подземные техногенные пустоты. В силу того что скорость изменения окружающей среды под влиянием антропогенных воздействий гораздо выше, чем восстановление экологического равновесия, своевременно требуется ликвидация последствий освоения ресурсов недр, в т.ч. восстановление нарушенных земель и литосферного массива, что привело к появлению рекультивационных работ.

Решение проблемы рекультивации всегда предполагает выбор наиболее перспективного и эффективного вида рекультивационных работ, а также обоснование приоритизации земель, подлежащих рекультивации.

В отношении выбора перспективного и эффективного вида рекультивационных работ следует отметить, что, опираясь на данные исследований [3–5] по восстановлению нарушенных земель, выделяют два подхода к рекультивации нарушенных земель: 1) традиционный, который объединяет сложный комплекс последовательно выполняемых реконструктивно-восстановительных мероприятий (горнотехнических, мелиоративных, биологических), начиная от очистки и выравнивания рекультивируемой территории, ее землевания путем нанесения плодородного слоя почв необходимой мощности и заканчивая внесением удобрений и мелиорантов, посевом или посадкой растений; 2) инновационный, который ориентирован на приемы и способы стимулирования естественных процессов ренатурализации нарушенной природной среды, главным образом процесса почвообразования, путем физико-химического и биологического воздействия на техногенный субстрат. Согласно авторской классификации данный подход подразделяется на четыре базовых метода: водорослевой, промывки, биоремедиации и сорбент-ориентированный [6]. При этом наибольший интерес в рамках инновационного подхода вызывают биоремедиационные и сорбент-ориентированные технологии, направленные на стимулирование почвенной микрофлоры. Сравнение по критерию экономической целесообразности показало, что сорбент-ориентированный метод в сравнении с биоремедиационным – наиболее перспективен [7, 8]. Более подробное исследование сорбент-ориентированного метода показало, что на повестку дня в настоящий момент выходят композитные органоминеральные сорбенты природного происхождения в связи с их низкой стоимостью, эффективностью и наличием больших запасов, а также функциональной способностью выступать не только сорбентами, но и мелиорантами [9–11]. При этом современный научный тренд представлен «зеленой» утилизацией отходов деревообработки, сельского хозяйства, ЖКХ и других отраслей экономики в качестве составляющих новаторских композитных сорбентов-мелиорантов [12–15].

Относительно приоритизации, например, по состоянию на 2020 г. согласно заявлению заместителя главного прокурора: «Более 350 объектов накоплен-

¹ Проект «Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года», 2017 г.; Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, утв. Указом Президента РФ на 19.04.2017 № 176.



ного экологического вреда на Урале требуют рекультивации»². Как в таком случае определить, какие объекты рекультивировать в первую очередь, а какие во вторую, и т.д. (табл. 1). В таких условиях в зарубежной практике на законодательном уровне принято использовать методики оценки рисков причинения экологического ущерба биоте [16–19].

Именно поэтому **цель** текущего исследования – апробировать имеющиеся распространенные методики оценки рисков причинения экологического ущерба и оценить эффективность и «экологичность» разрабатываемых авторских композитных сорбентов с позиции оценки и сравнения уровней возникновения потенциальных экологических рисков/рисков нанесения экологического ущерба после их (сорбентов) применения.

Задачи: 1) рассмотреть теоретические аспекты НММ: сформулировать определение, рассмотреть генезис НММ, исследовать вопрос токсичности НММ и выявить наиболее распространенные методики оценки экологических рисков НММ; 2) апробировать имеющиеся методики оценки экологических рисков НММ; 3) оценить эффективность и «экологичность» разрабатываемых авторских композитных сорбентов с позиции оценки и сравнения уровней возникновения потенциальных экологических рисков/рисков нанесения экологического ущерба после их (сорбентов) применения.

Объект исследования: горный отвод Левихинского рудника (зона экологического бедствия) как экосистема нарушенных земель, в составе которой присутствуют промышленные отвалы, содержащие НММ.

Гипотеза исследования: доказать возможность «зеленой утилизации» техногенных отходов в качестве сырья для композитных сорбентов, используемых для рекультивации нарушенных земель, без увеличения рисков причинения экологического ущерба природной среде.

² Более 350 объектов накопленного экологического вреда на Урале требуют рекультивации. ИТАР-ТАСС. 28 октября 2020 г. URL: https://news.rambler.ru/ecology/45113183-bolee-350-obektov-nakoplennogo-ekologicheskogo-vreda-na-urale-trebuyut-rekultivatsii/?utm_source=copysaring&utm_medium=social

О сущности тяжелых металлов: понятие, генезис, токсичность, оценка экологических рисков

Термин «тяжелые металлы» на данный момент очень сложен и противоречив [21]. Его часто используют для обозначения металлов и металлоидов, являющихся поллютантами биогеоценозов, токсичных для биоты. Этот термин определяют по-разному, но обычно по критерию плотности относительно атомной массы и атомного номера. Такое разнообразие дефиниций вызвало вопросы об итоговом перечне тяжелых металлов и металлоидов, т.е. какие элементы попадают в этот список, а какие нет. Например, до сих пор ученые спорят: включать металлоид As и по сути неметалл Se в перечень тяжелых металлов и металлоидов или нет. Присутствует даже мнение, что этот термин бессмысленный и от него необходимо отказаться [21]. Тем не менее в рамках текущего исследования предлагается использовать широкое понимание данного термина, подтвержденное многими научными работами как отечественных [22–24], так и зарубежных исследователей [25–26], где тяжелые металлы и металлоиды (НММ) выступают загрязнителями, устойчивыми к биологической и химической деградации, способными накапливаться в течение длительного времени в природной среде и проявлять свои токсичные свойства в отношении биотического разнообразия экосистем. Согласно исследованию [27, 28] наиболее распространенными НММ в природной среде принято считать медь, цинк, хром, никель, свинец, марганец, кадмий и мышьяк. Поступление НММ в окружающую среду в большей степени происходит в результате выветривания горных пород и антропогенной деятельности, при этом с последней связывают обострение экологической проблематики. Согласно вышеизложенному ключевой характеристикой НММ является их токсичность. НММ даже при относительно небольшой концентрации наносят вред почве, растениям, живым организмам и, как следствие, здоровью человека. Наиболее токсичные НММ – это хром, кадмий, свинец, цинк, медь, ртуть и мышьяк [29, 30] (табл. 2). В табл. 2 отражен общий уровень ПДК, включающий в себя как подвижные водорастворимые формы, так и неподвижные.

Таблица 1

Характеристика горных отвалов месторождений Свердловской области [20]

№	Объект	Площадь населенного пункта, км ²	Площадь горного отвода, км ²	Степень нарушенности	Характеристика
1	Левихинское месторождение	10,2	21	Высокая степень нарушенности	Зона экологического бедствия
2	Дегтярское месторождение	19	2,2	Высокая степень нарушенности	Зона экологического бедствия
3	Березовское месторождение	33	15,1	Средняя степень нарушенности	Территория плотной застройки
4	Буланашское месторождение	16,8	3,3	Высокая степень нарушенности	Зона опасного обрушения и подтопления территории
5	Пышминско-Ключевское месторождение	20	Нет данных	Средняя степень нарушенности	Территория плотной застройки

Табл. 2 демонстрирует, что предельно допустимые значения по НММ изменяются в разных границах, более того, не в каждой стране или объединении стран предельно допустимые концентрации приняты на законодательном уровне, это касается, например, в целом Евросоюза [28]. Тем не менее повышенные концентрации несут за собой экологические риски для здоровья человека и его качества жизни (рис. 1). В отношении последних в исследовательской практике существуют методики оценки экологических рисков от уровня загрязнения почв и грунтов НММ [16–19]. Среди самых известных выделяют две методики:

1. Методика оценки потенциального экологического риска от НММ (ER):

$$ER = I_t \times Z = I_t \times \frac{Z_m}{Z_a}, \quad (1)$$

где I_t – уровень токсичности НММ и чувствительности к нему биоты. Данный показатель определен эмпирически и принимается в качестве константы для Cr, Ni, Cu, As, Cd, Pb, Zn и S, равен соответственно 2, 6, 5, 10, 30, 5, 5, 15; Z – коэффициент загрязнения микро-

элементом; определяется отношением измеренной концентрации элемента на исследуемом объекте (Z_m) к фоновой (Z_a).

Результаты расчета ER характеризуют исследуемую почву/грунт следующим образом: если $ER < 150$, то экологический риск от НММ признается низким; если $150 \leq ER < 300$, то экологический риск от НММ – средний; если $300 \leq ER < 600$, то экологический риск от НММ – высокий; если $ER \geq 600$, то экологический риск от НММ – очень высокий.

Недостатком данной методики можно считать ограничения по перечню элементов НММ в части наличия данных по показателю I_t .

2. Вторая методика направлена на определение рисков возникновения экологического ущерба (EH):

$$EH = \frac{Z_m}{Z_l}, \quad (2)$$

где Z_m – как и в первой формуле, это измеренная концентрация элемента на исследуемом объекте; Z_l – в отличие от Z_a , это предельно допустимая концентрация элемента, установленная действующим законодательством.

Таблица 2

Токсичность НММ: общий уровень ПДК, включающий в себя подвижные водорастворимые и неподвижные формы

Страна/организация	Категория земель/тип почв, ед. изм.	Cr (VI)	Cd	Pb	Zn	Cu	Hg	As	S
ООН [31]	Земли сельхозназначения, ppm	0,1	0,003	0,1	н/д	н/д	0,08	н/д	н/д
Китай [31]	Земли сельхозназначения, ppm	150–300	0,3–0,6	80	н/д	н/д	0,3–1,0	н/д	н/д
США ¹	Земли сельхозназначения, ppm	11	0,43	200	н/д	н/д	1,0	н/д	н/д
Италия ²	Земли населенных пунктов, мг/кг	2	2	100	150	120	1	20	н/д
	Земли промышленности, мг/кг	15	15	1000	1500	600	5	50	н/д
Финляндия ³ [32]	Пороговое значение, мг/кг	100	1	60	60	100	0,5	5	н/д
	Минимальное значение, мг/кг	200	10	200	200	150	2	50	н/д
	Максимальное значение, мг/кг	300	20	750	400	250	5	100	н/д
Канада ⁴	Земли сельхозназначения, мг/кг	250	3	200	н/д	н/д	0,8	н/д	н/д
Германия [33, 34]	Земли сельхозназначения, мг/кг	500	5	1000	10–300	2–100	5	1–50	н/д
Испания ⁵	Кислые почвы, мг/кг	100	1	50	150	1.000	1	5	н/д
	Щелочные почвы, мг/кг	150	3	300	450	1700	1,5	55	н/д
Российская Федерация ⁶	Песчаные и супесчаные, мг/кг	0,05	0,5	32,0	55,0	33,0	2,1	2,0	н/д
	Кислые (суглинистые и глинистые), рН _{KCl} < 5,5, мг/кг	0,05	1,0	65,0	110,0	66,0	2,1	5,0	н/д
	Близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые) рН _{KCl} > 5,5, мг/кг	0,05	2,0	130,0	220,0	132,0	2,1	10,0	160

Примечание: «н/д» – нет данных.

Источник: таблица составлена авторами с использованием [28].

¹ New York state brownfield cleanup program. Development of soil cleanup objectives. Technical support document. Albany, NY, USA: New York State Department of Environmental Conservation and New York State Department of Health; 2006.

² Decreto Legislativo n. 152 del 3 aprile 2006 “Norme in materia ambientale”, Supplemento Ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” n. 88 del 14 aprile 2006. URL: <https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/06152dl.htm>

³ Government Decree on the Assessment of Soil Contamination and Remediation Needs 214/2007, 1 March 2007; Ministry of Environment: Helsinki, Finland, 2007 (the legally binding document is in Finnish or Swedish)

⁴ Soil, Ground Water and Sediment Standards for Use under Part XV.1 of the Environmental Protection Act. Toronto, ON, Canada: Canadian Ministry of the Environment (CME); 15 April 2011.

⁵ Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. URL: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1990-26490>

⁶ СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».



Результаты расчета показателя риска возникновения экологического ущерба (EH) демонстрируют малую вероятность наступления негативных последствий, если $EH < 1$. И, наоборот, если $EH > 1$, то вероятность наступления неблагоприятных событий и возникновения экологического ущерба высока, а значит, почва/грунт должны быть восстановлены и рекультивированы.

Таким образом, как при первой методике определения потенциального экологического риска от НММ, так и при второй – определение рисков возникновения экологического ущерба, в случае высоких значений итоговых показателей почва/грунт подлежат восстановительным работам.

Материалы исследования

В исследовании использовали:

1. Композитный сорбент торф/осадки водоподготовки в соотношении 20/80 по массе естественной влажности. Оптимальный состав был обоснован мно-

жественными экспериментами и построением изотерм адсорбции [35].

2. Композитный сорбент торф/диатомит/осадки водоподготовки. Композитный сорбент торф/диатомит/осадки водоподготовки в соотношении 5/15/80 по массе естественной влажности.

3. Композитный сорбент торф/диатомит. Композитный сорбент торф /диатомит в соотношении 25/75 по массе естественной влажности.

Торф верховой нейтрализованный, фракционированный (фракция 0–10). Влажность торфа от 50 до 60 %, водородный показатель водной вытяжки (рН) в пределах 5,5–6,0, зольность – менее 5 %. Основные неорганические соединения торфа: азот до 1,5 % (масс.), фосфор, калий, кальций (в сумме) до 0,6 %. Содержание гуминовых веществ – 7,4–7,9 %.

Диатомит Камышловского месторождения. Данный материал используется для создания силикатных вяжущих наполнителей, содержащих кремний, активированных сорбентов, строительных и огнеупор-

Хром

Устойчивые формы, токсичные для человека: Cr(III) и Cr(VI). Cr(VI) наиболее опасен, так как легче проникает в тело человека при дыхании, приеме внутрь и тактильно – через кожу. Органы человека, которые подвергаются негативному воздействию – это печень, почки, селезенка и костный скелет. Болезни и проявления, которые вызывает данный тяжелый металл: язвы, дерматиты, перфорация носовой перегородки, рак органов дыхания. При попадании в педосферу хром способен изменять структуру микробных сообществ и замедлять их рост.

Медь

Медь участвует во многих биологических процессах: окисление, фотосинтез, метаболизм углеводов, белков и клеточных стенок и др. Высокие концентрации меди способствуют повреждению органов человека на клеточном уровне. Болезни и проявления, которые вызывает данный тяжелый металл: тошнота, рвота, боль в животе; при длительном воздействии повреждает печень и почки. Во флоре медь накапливается в корнях, снижая их рост и способность поглощать другие микроэлементы, полезные для развития растений.

Цинк

Этот элемент играет важную роль в метаболизме нуклеиновых кислот и белков, в росте, делении и функционировании клеток. Высокая концентрация цинка может вызвать рвоту, мышечные судороги и повреждение почек. У растений высокая – приводит к замедлению роста и развития растения, хлорозу, изменению процессов метаболизма и др.

Кадмий

Кадмий препятствует пролиферации клеток, дифференцировке, апоптозу и механизму восстановления ДНК. Болезни и проявления, которые вызывает данный тяжелый металл: деминерализация скелета, проблемы с почками и печенью. Избыточное накопление в растениях может влиять как на фотосинтез, так и на дыхание, транспорт и усвоение элементов минерального питания, влияя на рост и развитие растений.

Свинец

Этот микроэлемент быстро всасывается в кровоток, повреждая различные системы, например, нервную и лимфатическую, а также влияет на функции почек и развитие организма.

Ртуть

Может откладываться во многих частях человеческого тела, повреждая мозг, щитовидную железу, грудную мышцу, миокард, мышцы, печень, почки, кожу и поджелудочную железу. Наибольшему повреждению подвержена нервная система.

Мышьяк

Этот металлоид вызывает кожные поражения; рак легких, мочевого пузыря, печени и почек; ишемическую болезнь сердца, нарушение когнитивных способностей, двигательных функций и гормональной регуляции.

Сера

При воздействии серы происходит раздражение слизистой оболочки глаз, слезотечение, затруднение дыхания, тошнота, рвота, головные боли. Повышенная утомляемость, ослабление мышечной силы, снижение памяти. Замедление восприятия, ослабление функциональной способности сердца, изменение бактерицидности кожи.

Рис. 1. Токсичное воздействие НММ на биоту



ных материалов, для модификации агрохимических свойств почв и т.п.

Осадки водоподготовки Западной фильтрационной станции г. Екатеринбурга. По результатам проведенного рентгенофазового анализа основную массу осадка (более 70 %) составляет рентгеноаморфная органика. Химический состав осадка характеризуется наличием кремния, алюминия, железа. Гранулометрический состав осадка полидисперсен. Методом мокрого ситового анализа установлено, что в нем преобладают частицы размером менее 50 мкм (21 %) и частицы, размер которых больше 100 мкм (18 %);

Техногенный грунт отвала пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений (п. Левиха, Свердловской области). Грунт представляет собой рыхлый терригенный материал, сложенный неокатанными зернами в верхней части отвалов преимущественно псаммитовой и псефитовой фракциями (песок и щебень), а в нижней части – псефитовой (глыбы). Количество пелитовой фракции обычно не превышает 5–10 %. Сложены отходы фрагментами и обломками кварц-серицитовыми и кварц-хлоритовыми сланцами, колчеданной руды, лимонитом, халцедоном, кварцем с прожилками и вкрапленниками сульфидов.

Методы и алгоритм проведения исследования

Пробы, отобранные на отвалах пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений (п. Левиха, Свердловской области), тщательно перемешивались в единой емкости. Перемешанная масса породы не подвергалась измельчению для воспроизводства естественных условий техногенных территорий. Фракционный состав минеральной породы – от 12 см до 1,5 мм.

Масса породы, взятая с помощью напольных весов, засыпанная в каждую емкость, составила – 500 г (± 5 г). Высота породы в емкостях составила 2 см. Емкость прямоугольного сечения объемом 880 см³ для эксперимента была поделена на две части пластмассовой перегородкой. В первую часть емкости сначала размещали породу и сверху засыпали сорбенты (каждый сорбент в разные емкости):

1. Торф/осадки водоподготовки (пропорции по мас. естественной влажности, % – 20/80) – Т/ОВ (20/80);

2. Торф/диатомит/осадки водоподготовки. Композитный сорбент торф/диатомит/осадки водоподготовки в соотношении 5/15/80 в процентах по массе естественной влажности. Масса навески каждого сорбента составила – 50 г ($\pm 0,5$ г). Высота сорбента варьировалась от 0,4 до 0,6 см в зависимости от вида сорбента и рыхлости минерального грунта – Т/Д/ОВ (5/15/80).

3. Торф/диатомит. Композитный сорбент торф/диатомит в соотношении 25/75 пропорции по мас. естественной влажности – Т/Д (25/75).

Масса навески каждого сорбента составила – 50 г ($\pm 0,5$ г). Высота сорбента варьировалась от 0,4 до 0,6 см в зависимости от вида сорбента и рыхлости грунта (породы).

В первую часть емкости с засыпанными породой и сорбентами равномерно приливали 500 мл дис-

тиллированной воды в каждую с целью создания обводненных условий в емкости для свободной миграции ионов НММ в растворе «сорбент – порода», который перетекал во вторую часть емкости. Циркуляция раствора «сорбент – порода» между двумя частями в емкости происходила всё время эксперимента, но порода (грунт) и сорбент не попадали во вторую часть.

Емкости закрывали для снижения погрешности, попадания различной пыли и уменьшения испаряемости раствора из емкости.

Исследуемый раствор выдерживался не менее 24 ч при комнатной температуре.

Далее растворы «сорбент – порода» фильтровали через бумажный фильтр средней плотности для исследования количественного и качественного химического состава растворов.

В целях исследования количественного химического состава техногенного грунта и авторских сорбентов, определения степени адсорбции ионов тяжелых металлов был использован метод атомно-абсорбционной и атомно-эмиссионной спектрометрии. Соответствующие анализы проводили с помощью атомно-эмиссионного спектрометра параллельного действия с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9820 производства Shimadzu (Япония) и спектрометра атомно-абсорбционного с пламенной атомизацией «Квант-2». Эксперименты проводились согласно ГОСТ ISO 22036–2014 Качество почвы. Определение микроэлементов в экстрактах почвы с использованием атомно-эмиссионной спектрометрии индуктивно связанной плазмы (ИСП-АЭС) и ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.78-2013 «Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли подвижных форм металлов: меди, цинка, свинца, кадмия, марганца, никеля, кобальта, хрома в пробах почв, грунтов, донных отложений, осадков сточных вод методом пламенной атомно-адсорбционной спектрометрии».

Результаты

Оценка ER и EH техногенного грунта

Проведены лабораторные анализы проб с отвалов пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений [36]. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Результаты исследований³ показали, что максимальные концентрации S, Cu, Zn в пробах относятся к опасной категории загрязнения почв согласно методике, представленной авторами исследования. Главный потенциальный источник загрязнения – сера, в меньшей степени медь и цинк.

Для определения начальной концентрации водорастворимых ионов НММ в техногенном грунте отвала пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений был проведен однотипный эксперимент, но без композитного сорбента. В результате в техногенном грунте (породе) были выявлены ионы НММ, представленные в табл. 4.

³ СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Оценка рисков по формулам (1) и (2) приведена в табл. 5.

Показатель *ER* по всем трем НММ выше 300, то есть по цинку и сере риск характеризуется как высокий, а по показателю меди – как очень высокий. Противоречиво выглядят результаты по показателю *EH*, где показатель риска возникновения экологического ущерба по всем трем НММ ниже 1, то есть вероятность наступления негативных последствий признается низкой, это объясняется фактом усредненности пробы и длительным воздействием поверхностных осадков на территории экологического бедствия, именно поэтому концентрации в поверхностном слое грунта незначительны в отношении ПДК, но чрезмерны в сравнении с фоновыми значениями. Средняя арифметическая показателей уровня риска также в отношении *ER* демонстрирует высокое значение, в отношении *EH* – низкое.

Анализ содержания НММ в техногенном грунте после применения авторских сорбентов

Данные табл. 4 концентрации ионов НММ в пробах техногенного грунта отвалов пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений

(п. Левиха, Свердловской области) визуально отражены на рис. 2.

В результате исследований с использованием авторских сорбентов концентрации НММ в техногенном грунте уменьшились. На рис. 3 представлены результаты исследований степени извлечения водорастворимых ионов Cu (а), Zn (б), S (в) сорбентами.

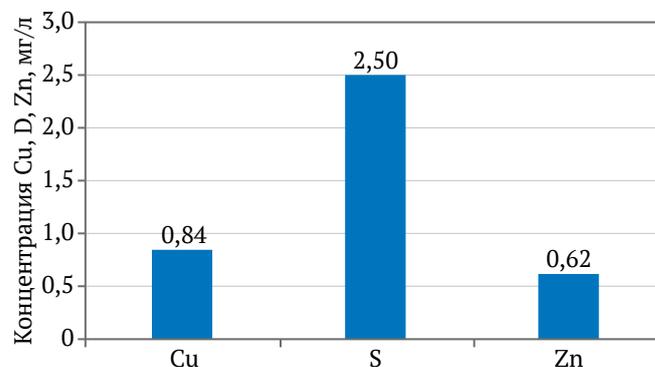


Рис. 2. Концентрация НММ в техногенном грунте отвала пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений

Таблица 3

Концентрация (общая) ионов НММ в отвалах пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений

Компонент	Содержание, масс. % min/max	Содержание в сульфидных песках, масс. %	Норма ПДК и ОДК*, масс. %	Коэффициент концентрации min/max	Коэффициент концентрации в сульфидных песках min/max
S	0,026/1,370	32,6	0,016	1,6/85,6	2037,5
Cu	0,005/0,1	0,16	0,0132	0,4/7,6	11,9
Zn	0,0097/0,0353	0,015	0,022	0,4/1,6	0,7

Примечание: * для группы почв близких к нейтральным и нейтральных (суглинистые и глинистые), $pH_{KCl} > 5,5$.

Таблица 4

Концентрация водорастворимых ионов НММ (подвижная форма) в техногенном грунте отвала пустой породы Левихинской группы медноколчеданных месторождений и контрольной пробе

Проба	Cu, мг/л	Zn, мг/л	S, мг/л
Усредненная проба с отвалов (12 точек отбора)	0,84427	0,61632	2,50000
Контрольная проба (фоновое загрязнение)	0,00500	0,00970	0,08900

Таблица 5

Оценка потенциальных экологических рисков от НММ (*ER*) и рисков возникновения экологического ущерба (*EH*) исходя из содержания НММ в техногенном грунте

НММ	Концентрация, мг/л	Коэффициент опасности	Фон, мг/л	ПДК ¹ (подвижная форма, кислые почвы, по сере – нейтральные), мг/кг	Концентрация, мг/кг	<i>ER</i>	<i>EH</i>
Cu	0,84427	5,00000	0,00500	3,00000	1,68854	844,27000	0,56285
Zn	0,61632	5,00000	0,00970	23,00000	1,23264	317,69072	0,05359
S	2,50000	15,00000	0,08900	160,00000	5,00000	421,34831	0,03125
Средняя арифметическая уровня риска по НММ						527,76968	0,21590

¹ СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Из рис. 3 следует, что в отношении связывания ионов Cu, Zn, S сорбенты проявляют эффективность, близкую к максимальной, за исключением сорбента торф/диатомит (пропорция при естественной влажности: 25/75, %) по отношению к ионам S, где проявляется средняя эффективность адсорбции.

Исследования показали, что адсорбция ионов Cu проходит эффективнее, если содержание торфа в сорбенте превышает 20 % (пропорция при естественной влажности). Осадки водоподготовки значительно увеличивают адсорбцию Zn и S. Не удалось оценить влияние количественного содержания на эффективность адсорбции осадков водоподготовки, так как в эксперименте представлено только одно содержание данного техногенного компонента (пропорция при естественной влажности 80 %). Увеличение массы диатомита в составе композиционного сорбента ухудшает адсорбцию Zn и S.

Наибольшую эффективность продемонстрировали сорбенты торф/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 20/80, %), торф/диатомит/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 5/15/80, %), где суммарная эффективность превышала 89 %. Сорбент торф/диатомит (пропорция при естественной влажности: 25/75, %) продемонстрировал суммарную эффективность на уровне 67,7 %.

Так, после применения авторских сорбентов были получены следующие результаты, табл. 6–8.

После использования авторских сорбентов показатель *ЕН* еще более снизился. Максимальную эффективность по минимизации рисков возникновения экологического ущерба проявил сорбент Т/ОВ (20/80). Аналогично и в отношении среднего значения показателя потенциальных экологических рисков от НММ (*ЕР*), сорбент Т/ОВ был наиболее интересен в применении. Тем не менее по показателю *ЕР* при селективной сорбции в отношении цинка и серы сорбент Т/Д/ОВ (5/15/80) продемонстрировал максимальную эффективность. Сорбент Т/Д (25/75) показал наихудшие результаты. Полученные расчетные данные доказывают гипотезу о возможности и, более того, эффективности «зеленой утилизации» техногенных отходов для целей рекультивации нарушенных земель, так как все сорбенты, в состав которых входили осадки водоподготовки селективно или комплексно, продемонстрировали максимальные показатели сорбции (табл. 9).

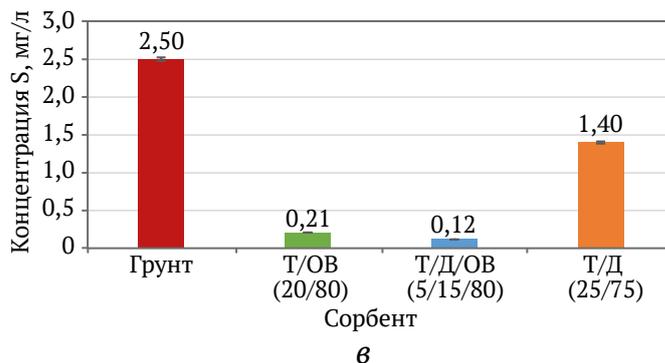
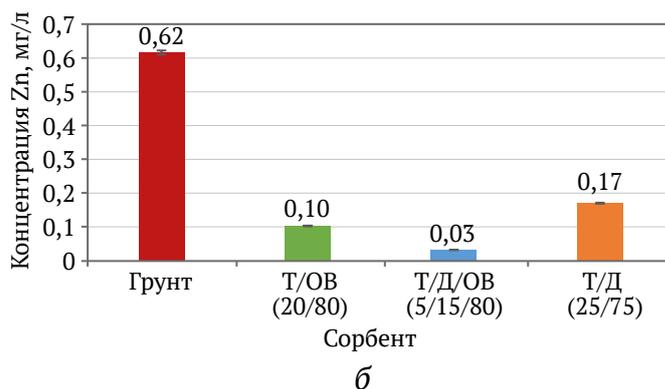
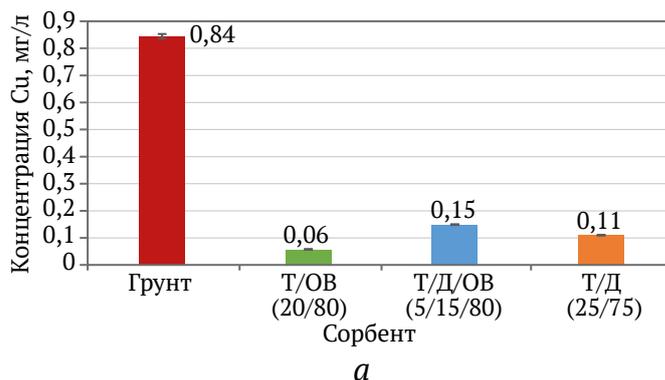


Рис. 3. Степень извлечения ионов Cu, Zn, S сорбентами: торф/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 20/80, %), торф/диатомит/осадки водоподготовки (пропорция при естественной влажности: 5/15/80, %) и торф/диатомит (пропорция при естественной влажности: 25/75, %): а – степень извлечения ионов Cu; б – степень извлечения ионов Zn; в – степень извлечения ионов S

Таблица 6

Оценка потенциальных экологических рисков от НММ (*ЕР*) и рисков возникновения экологического ущерба (*ЕН*) исходя из содержания НММ в техногенном грунте после использования сорбента Т/ОВ (20/80)

НММ	Концентрация после сорбента Т/ОВ (20/80), мг/л	Коэффициент опасности	Фон, мг/л	ПДК (подвижная форма, кислые почвы), мг/кг	Концентрация после сорбента Т/ОВ (20/80), мг/кг	<i>ЕР</i>	<i>ЕН</i>
Cu	0,06000	5,00000	0,00500	3,00000	0,12000	60,00000	0,04000
Zn	0,10000	5,00000	0,00970	23,00000	0,20000	51,54639	0,00870
S	0,21000	15,00000	0,08900	160,00000	0,42000	35,39326	0,00263
Средняя арифметическая уровня риска по НММ						48,97988	0,01711



Таблица 7

Оценка потенциальных экологических рисков от НММ (ER) и рисков возникновения экологического ущерба (EH) исходя из содержания НММ в техногенном грунте после использования сорбента Т/Д/ОВ (5/15/80)

НММ	Концентрация после сорбента Т/Д/ОВ (5/15/80), мг/л	Коэффициент опасности	Фон, мг/л	ПДК (подвижная форма, кислые почвы), мг/кг	Концентрация после сорбента Т/Д/ОВ (5/15/80), мг/кг	ER	EH
Cu	0,15000	5,00000	0,00500	3,00000	0,30000	150,00000	0,10000
Zn	0,03000	5,00000	0,00970	23,00000	0,06000	15,46392	0,00261
S	0,12000	15,00000	0,08900	160,00000	0,24000	20,22472	0,00150
Средняя арифметическая уровня риска по НММ						61,89621	0,03470

Таблица 8

Оценка потенциальных экологических рисков от НММ (ER) и рисков возникновения экологического ущерба (EH) исходя из содержания НММ в техногенном грунте после использования сорбента Т/Д (25/75)

НММ	Концентрация после сорбента Т/Д (25/75), мг/л	Коэффициент опасности	Фон, мг/л	ПДК (подвижная форма, кислые почвы), мг/кг	Концентрация после сорбента Т/Д (25/75), мг/кг	ER	EH
Cu	0,11000	5,00000	0,00500	3,00000	0,22000	110,00000	0,07333
Zn	0,17000	5,00000	0,00970	23,00000	0,34000	87,62887	0,01478
S	1,40000	15,00000	0,08900	160,00000	2,80000	235,95506	0,01750
Средняя арифметическая уровня риска по НММ						144,52797	0,03521

Таблица 9

Оценка изменений установленных уровней рисков после использования авторских сорбентов

Риск	Среднее по НММ в техногенном грунте	Среднее по НММ после сорбента Т/ОВ (20/80)		Среднее по НММ после Т/Д/ОВ (5/15/80)		Среднее по НММ после Т/Д (25/75)		Средние по показателям изменений после сорбентов с ОВ, %
		Фактические показатели	Изменения от среднего значения по НММ в техногенном грунте	Фактические показатели	Изменения от среднего значения по НММ в техногенном грунте	Фактические показатели	Изменения от среднего значения по НММ в техногенном грунте	
ER	527,76968	48,97988	90,72	61,89621	88,27	144,52797	72,62	89,50
EH	0,21590	0,01711	92,08	0,03470	83,93	0,03521	83,69	88,00

Выводы

Таким образом, цель текущего исследования была достигнута, а именно: были апробированы имеющиеся распространенные методики оценки рисков причинения экологического ущерба и была произведена оценка эффективности и «экологичности» разрабатываемых авторских композитных сорбентов с позиции оценки и сравнения уровней возникновения потенциальных экологических рисков/рисков нанесения экологического ущерба после их (сорбентов)

применения. Оцениваемые риски ER и EH после применения авторских композитных сорбентов, в состав которых входят осадки водоподготовки, снижались в среднем на 89,5 и 88 % соответственно. Так была доказана гипотеза исследования о возможности «зеленой утилизации» техногенных отходов в качестве сырья для композитных сорбентов, используемых для рекультивации нарушенных земель, без увеличения рисков причинения экологического ущерба природной среде.

Список литературы

1. Чаплыгин Н.Н., Галченко Ю.П., Папичев В.И. и др. *Экологические проблемы геотехнологий: новые идеи, методы и решения*. М.: ООО Издательство «Научтехлитиздат». 2009. 320 с.
2. Наумов И.В. Исследование пространственных диспропорций в процессах нарушения и рекультивации земельных ресурсов в России. *Известия УГТУ*. 2019;(4):142–151. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-4-143-152>
3. Chiampo F., Zacchini M. Environmental restoration of metal-contaminated soils. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10805. <https://doi.org/10.3390/app112210805>
4. Ворончихина Е.А. *Рекультивация нарушенных ландшафтов: теория, технологии, региональные аспекты*: монография. Пермь; 2010. 165 с.



5. Zhu J., Wang P., Lei M.-J., Zhang W.-L. Polyhydroxyl-aluminum pillaring improved adsorption capacities of Pb²⁺ and Cd²⁺ onto diatomite. *Journal of Central South University*. 2014;21:2359–2365. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2188-9>
6. Юрак В.В., Усманов А.И. Подходы к восстановлению нарушенных горно-металлургическим комплексом земель. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023. В печати.
7. Mishra M., Mohan D. Bioremediation of contaminated soils: an overview. In: Rakshit A., Abhilash P., Singh H., Ghosh S. (eds) *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*. Springer, Singapore; 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5_16
8. Singh A., Prasad S.M. Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015;12:353–366. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0542-y>
9. Ignatyeva M., Yurak V., Pustokhina N. Recultivation of post-mining disturbed land: review of content and comparative law and feasibility study. *Resources*. 2020;9(6):73. <https://doi.org/10.3390/resources9060073>
10. Ермаков А.С., Ермакова А.Я. Восстановление нарушенного почвенного покрова отрицательно-го воздействия от промышленных предприятий. *Научный вестник МГТУ*. 2014;(1):24–29.
11. Marques J.P., Rodrigues V.G.S., Raimondi I.M., Lima J.Z. Increase in Pb and Cd Adsorption by the application of peat in a tropical soil. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2020;231:136. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04507-z>
12. Яконовская Т.Б., Жигульская А.И. Особенности оценки экономической безопасности предприятий торфодобывающей отрасли тверского региона России (обзор отрасли). *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):5–15. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-5-15>
13. Игнатъева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В., Стровский В.Е. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике. *Горные науки и технологии*. 2021; 6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>
14. Апакашев Р.А., Малышев А.Н., Лебзин М.С. Исследование физико-химических свойств осадков водоподготовки для «зеленой» почвенной утилизации. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2022;(3):117–124.
15. Букин А.В., Моторин А.С., Игловиков А.В. Создание рекультивационной смеси на основе осадка водоподготовки няганьской грэс и торфа. *Агротехнологическая политика России*. 2016;(12):70–75.
16. Näkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*. 1980;14(8):975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
17. Baran A., Wiczeorek J., Mazurek R. et al. Potential ecological risk assessment and predicting zinc accumulation in soils. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018;40:435–450. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9924-7>
18. Wu Q., Leung J.Y.S., Geng X. et al. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. *Science of the Total Environment*. 2015;506–507:217–225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.121>
19. Pan X.-D., Wu P.-G., Jiang X.-G. Levels and potential health risk of heavy metals in marketed vegetables in Zhejiang, China. *Scientific Reports*. 2016;6:20317. <https://doi.org/10.1038/srep20317>
20. Старицына И.А., Беличев А.А. Анализ использования нарушенных земель Свердловской области. *Аграрный вестник Урала*. 2018;4:31–36.
21. Ali H., Khan E. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’ – Proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2018;100:6–19. <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>
22. Селезнев А.А., Климшин А.В. Тяжелые металлы в грунтах на территории г. Екатеринбурга. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2020;(1):96–104. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-1-96-104>
23. Семенов А.И., Кокшаров А.В., Погодин Ю.И. Содержание тяжелых металлов в почве г. Челябинска. *Медицина труда и экология человека*. 2015;(3):184–191.
24. Писарева А.В., Белопухов С.Л., Савич В.И. и др. Миграция тяжелых металлов от очага загрязнения в зависимости от взаимосвязей в ландшафте. *Вестник технологического университета*. 2017;20(6):160–163.
25. Bou Kheir R., Greve M., Greve M. et al. Comparative GIS tree–pollution analysis between arsenic, chromium, mercury, and uranium contents in soils of urban and industrial regions in Qatar. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2019;4:10. <https://doi.org/10.1007/s41207-019-0099-8>
26. Mikkonen H.G., Dasika G., Drake J.A. et al. Evaluation of environmental and anthropogenic influences on ambient background metal and metalloid concentration in soil. *Science of the Total Environment*. 2018;624:599–610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.131>
27. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019;2019:6730305 <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>



28. Raffa C.M., Chiampo F., Shanthakumar S. Remediation of metal/metalloid-polluted soils: a short review. *Applied Sciences*. 2021;11:4134. <https://doi.org/10.3390/app11094134>
29. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Network*. 2011;2011:402647. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
30. Dutta S., Mitra M., Agarwal P. et al. Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability. *Plant Signaling & Behavior*. 2018;13(8):e1460048 <https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1460048>
31. Kinuthia G.K., Ngure V., Beti D. et al. Levels of heavy metals in wastewater and soil samples from open drainage channels in Nairobi, Kenya: Community health implication. *Scientific Reports*. 2020;10:8434. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65359-5>
32. Carlon C. (Ed.) *Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization*. Ispra: European Commission, Joint Research Centre; 2007. 306 p.
33. He Z., Shentu J., Yang X. et al. Heavy Metal Contamination of Soil: Sources, Indicators, and Assessment. *Journal of Environmental Indicators*. 2015;9:17–18.
34. Касьяненко А.А. *Контроль качества окружающей среды*. М.: Российский университет дружбы народов; 1992. 136 с.
35. Апакашев Р.А., Лебзин М.С., Юрак В.В., Малышев А.Н. Гибридные сорбенты – мелиоранты для рекультивации загрязненных мышьяком почв. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(11–1):18–28. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_111_0_18
36. Fedorov S., Zavyalov S., Yurak V. Ore minerals in technogenic wastes of the levikhinsky mine (Middle Urals) In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference "Earth Science", ISTC EarthScience 2022*. 2022;988(2):032088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/3/032088>

References

1. Chaplygin N.N., Galchenko Yu.P., Papichev V.I. et al. *Environmental Problems of Geotechnologies: New concepts, methods and solutions*. Moscow: Nauchtechlitzdat Publishing House LLC; 2009. 320 p. (In Russ.)
2. Naumov I.V. The study of spatial imbalances in the processes of disruption and land reclamation in Russia. *News of the Ural State Mining University*. 2019;(4):142–151. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-4-143-152> (In Russ.)
3. Chiampo F., Zacchini M. Environmental restoration of metal-contaminated soils. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10805. <https://doi.org/10.3390/app112210805>
4. Voronchikhina E.A. *Reclamation of disturbed landscapes: theory, technologies, regional aspects: monograph*. Perm; 2010. 165 p. (In Russ.)
5. Zhu J., Wang P., Lei M.-J., Zhang W.-L. Polyhydroxyl-aluminum pillaring improved adsorption capacities of Pb²⁺ and Cd²⁺ onto diatomite. *Journal of Central South University*. 2014;21:2359–2365. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2188-9>
6. Yurak V.V., Usmanov A.I. Approaches to the restoration of lands disturbed by the mining and metallurgical complex. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. In print.
7. Mishra M., Mohan D. Bioremediation of contaminated soils: an overview. In: Rakshit A., Abhilash P., Singh H., Ghosh S. (eds) *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices*. Springer, Singapore; 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5_16
8. Singh A., Prasad S.M. Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015;12:353–366. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0542-y>
9. Ignatyeva M., Yurak V., Pustokhina N. Recultivation of post-mining disturbed land: review of content and comparative law and feasibility study. *Resources*. 2020;9(6):73. <https://doi.org/10.3390/resources9060073>
10. Ermakov A.S., Ermakova A.Ya. Restoration of soil cover disturbed due to adverse impact from industrial enterprises. *Nauchnyy Vestnik MGGU*. 2014;(1):24–29. (In Russ.)
11. Marques J.P., Rodrigues V.G.S., Raimondi I.M., Lima J.Z. Increase in Pb and Cd Adsorption by the application of peat in a tropical soil. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2020;231:136. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04507-z>
12. Yakonovskaya T.B., Zhigul'skaya A.I. Features of evaluating the economic security of peat industry enterprises in the Tver Region of Russia (the industry review). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):5–15. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-5-15>
13. Ignatyeva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., Strovsky V.E. Technogenic mineral accumulations: problems of transition to circular economy. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>



14. Apakashev R.A., Malyshev A.N., Lebzin M.S. Study of the physicochemical properties of water treatment residuals for “green” soil utilization. *News of the Ural State Mining University*. 2022;(3):117–124. (In Russ.)
15. Bukin A.V., Motorin A.S., Iglovikov A.V. Creation of a reclamation mixture based on water treatment sludge (from the Nyagan State District Power Plant) and peat. *Agroproduvol'stvennaya politika Rossii*. 2016;(12):70–75. (In Russ.)
16. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*. 1980;14(8):975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
17. Baran A., Wiczorek J., Mazurek R. et al. Potential ecological risk assessment and predicting zinc accumulation in soils. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018;40:435–450. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9924-7>
18. Wu Q., Leung J.Y.S., Geng X. et al. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. *Science of the Total Environment*. 2015;506–507:217–225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.121>
19. Pan X.-D., Wu P.-G., Jiang X.-G. Levels and potential health risk of heavy metals in marketed vegetables in Zhejiang, China. *Scientific Reports*. 2016;6:20317. <https://doi.org/10.1038/srep20317>
20. Staritsyn I.A., Belichev A.A. Analysis of the Sverdlovsk region' disturbed lands use. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2018;4:31–36. (In Russ.)
21. Ali H., Khan E. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’ – Proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2018;100:6–19. <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>
22. Seleznev A.A., Klimshin A.V. Heavy metals in urban grounds in Ekaterinburg (Russia). *News of the Ural State Mining University*. 2020;(1):96–104. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-1-96-104>
23. Semyenov A.I., Koksharov A.V., Pogodin Yu.I. The content of heavy metals in Chelyabinsk soils. *Occupational Medicine and Human Ecology*. 2015;(3):184–191.
24. Pisareva A.V., Belopukhov S.L., Savich V.I. et al. Migration of heavy metals from the source of pollution depending on the interconnections in a landscape. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2017;20(6):160–163. (In Russ.)
25. Bou Kheir R., Greve M., Greve M. et al. Comparative GIS tree–pollution analysis between arsenic, chromium, mercury, and uranium contents in soils of urban and industrial regions in Qatar. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2019;4:10. <https://doi.org/10.1007/s41207-019-0099-8>
26. Mikkonen H.G., Dasika G., Drake J.A. et al. Evaluation of environmental and anthropogenic influences on ambient background metal and metalloid concentration in soil. *Science of the Total Environment*. 2018;624:599–610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.131>
27. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019;2019:6730305 <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
28. Raffa C.M., Chiampo F., Shanthakumar S. Remediation of metal/metalloid-polluted soils: a short review. *Applied Sciences*. 2021;11:4134. <https://doi.org/10.3390/app11094134>
29. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Network*. 2011;2011:402647. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
30. Dutta S., Mitra M., Agarwal P. et al. Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability. *Plant Signaling & Behavior*. 2018;13(8):e1460048 <https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1460048>
31. Kinuthia G.K., Ngure V., Beti D. et al. Levels of heavy metals in wastewater and soil samples from open drainage channels in Nairobi, Kenya: Community health implication. *Scientific Reports*. 2020;10:8434. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65359-5>
32. Carlon C. (Ed.) *Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization*. Ispra: European Commission, Joint Research Centre; 2007. 306 p.
33. He Z., Shentu J., Yang X. et al. Heavy Metal Contamination of Soil: Sources, Indicators, and Assessment. *Journal of Environmental Indicators*. 2015;9:17–18.
34. Kasyanenko A.A. *Environmental quality control*. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia; 1992. 136 p. (In Russ.)
35. Apakashev R.A., Lebzin M.S., Yurak V.V., Malyshev A.N. Hybrid sorbents – meliorants for recultivation of arsenic-contaminated soils. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(11–1):18–28. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_111_0_18
36. Fedorov S., Zavyalov S., Yurak V. Ore minerals in technogenic wastes of the levikhinsky mine (Middle Urals) In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference “Earth Science”, ISTC EarthScience 2022*. 2022;988(2):032088. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/3/032088>



Информация об авторах

Вера Васильевна Юрак – доктор экономических наук, доцент кафедры экономики и менеджмента, заведующая научно-исследовательской лабораторией рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1529-3865](https://orcid.org/0000-0003-1529-3865), Scopus ID [57190411535](https://scopus.com/authorid/57190411535), ResearcherID [J-7228-2017](https://orcid.org/J-7228-2017); e-mail vera_yurak@mail.ru

Рафаил Абдрахманович Апакашев – доктор химических наук, профессор, проректор по научной работе, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9006-3667](https://orcid.org/0000-0002-9006-3667), Scopus ID [6603092433](https://scopus.com/authorid/6603092433); e-mail Apakashev.R@m.ursmu.ru

Максим Сергеевич Лебзин – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5959-135X](https://orcid.org/0000-0001-5959-135X), Scopus ID [57218647741](https://scopus.com/authorid/57218647741); e-mail science@ursmu.ru

Александр Николаевич Мальшев – лаборант-исследователь научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-3104-1687](https://orcid.org/0000-0002-3104-1687), Scopus ID [57223099993](https://scopus.com/authorid/57223099993); e-mail malyshev.k1b@gmail.com

Information about the authors

Vera V. Yurak – Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Management, Head of the Research Laboratory for Reclamation of Disturbed Lands and Technogenic Objects, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; Senior Researcher, Institute of Economics of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1529-3865](https://orcid.org/0000-0003-1529-3865), Scopus ID [57190411535](https://scopus.com/authorid/57190411535), ResearcherID [J-7228-2017](https://orcid.org/J-7228-2017); e-mail vera_yurak@mail.ru

Rafail A. Apakashev – Dr. Sci. (Chem.), Professor, Vice-Rector for Research, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9006-3667](https://orcid.org/0000-0002-9006-3667), Scopus ID [6603092433](https://scopus.com/authorid/6603092433); e-mail Apakashev.R@m.ursmu.ru

Maxim S. Lebzin – Junior Researcher, Research Laboratory for the Reclamation of Disturbed Lands and Technogenic Objects, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5959-135X](https://orcid.org/0000-0001-5959-135X), Scopus ID [57218647741](https://scopus.com/authorid/57218647741); e-mail science@ursmu.ru

Alexander N. Malyshev – Research Assistant, Research Laboratory for the Reclamation of Disturbed Lands and Technogenic Objects, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-3104-1687](https://orcid.org/0000-0002-3104-1687), Scopus ID [57223099993](https://scopus.com/authorid/57223099993); e-mail malyshev.k1b@gmail.com

Поступила в редакцию 07.07.2023
Поступила после рецензирования 28.07.2023
Принята к публикации 15.09.2023

Received 07.07.2023
Revised 28.07.2023
Accepted 15.09.2023



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-79>

УДК 622:331.45



Добавка на основе олеата натрия и льняного масла для углепылеподавляющих растворов

В. А. Голубков¹   , Г. А. Горенкова² , Е. П. Ворожцов² , М. А. Беспалова² , С. В. Бортников² ¹ Институт химии и химической технологии СО РАН, г. Красноярск, Российская Федерация² Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, г. Абакан, Российская Федерация golubkov.va@icct.krasn.ru

Аннотация

Добыча угля, его транспортировка и переработка сопровождаются образованием и поступлением в воздушную среду значительных объемов твердых частиц, в том числе угольной пыли. Наиболее распространенной технологией борьбы с угольной пылью в воздухе является гидрообеспыливание. Эта технология основана на способности воды смачивать пылевые частицы и связывать их между собой и с поверхностями, на которые осаждаются пыль. Существенное ограничение данной технологии заключается в гидрофобности поверхности угля, которая препятствует смачиванию водой частиц угольной пыли. Для увеличения смачиваемости гидрофобной поверхности угольных частиц в воду добавляют поверхностно-активные вещества. В настоящей работе нами предложен состав для пылеподавления на основе олеиновой кислоты, гидроксида натрия и льняного масла в воде, изучены его свойства и оценена способность улучшать смачиваемость угольной пыли. Найдена наиболее эффективная концентрация, которая позволяет рабочему раствору улучшить смачиваемость угольной пыли на 187 % относительно воды, что превышает смачивающую способность большинства известных реагентов. Предлагаемый состав содержит 140 мг/л олеиновой кислоты, 100 мг/л гидроксида натрия, 70 мг/л льняного масла в воде. Простота состава, отсутствие вредности для окружающей среды и человека, незначительное влияние на дальнейшую эксплуатацию угольного сырья делают предлагаемый состав смачивателя перспективным для применения в технологиях гидрообеспыливания в угольной промышленности.

Ключевые слова

угольная пыль, пылеподавление, гидрообеспыливание, смачиваемость, поверхностно-активные вещества, олеат натрия, льняное масло

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение № 93 от 13.12.2022).

Для цитирования

Golubkov V.A., Gorenkova G.A., Vorozhtsov E.P., Bepalova M.A., Bortnikov S.V. Chemical additive based on sodium oleate and linseed oil for preparation coal dust suppression composition. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):341–349. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-79>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Chemical additive based on sodium oleate and linseed oil for preparation coal dust suppression composition

V. A. Golubkov¹   , G. A. Gorenkova² , E. P. Vorozhtsov² , M. A. Bepalova² , S. V. Bortnikov² ¹ Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation² Khakassian State University named after N. F. Katanov, Abakan, Russian Federation golubkov.va@icct.krasn.ru

Abstract

The mining, transportation, and processing of coal involve the formation and emission of significant amounts of particulate matter, which includes coal dust. The most commonly employed method for controlling coal dust in an air is water spray dust suppression (hydrodedusting). This method is founded on water's capacity to moisten dust particles and bond them to both each other and the surfaces where the dust settles. One



notable limitation of this method is the coal's hydrophobic nature, which hinders water from wetting coal dust particles. In order to overcome this, surfactants are introduced into the water to increase the wettability of the hydrophobic coal particle surface. In this paper, we proposed a dust suppressant composition consisting of oleic acid, sodium hydroxide, and linseed oil in water. We examine its properties and evaluated its ability to enhance the wettability of coal dust. We have identified the most effective concentration, resulting in a working solution that improves the wettability of coal dust by 87 % compared to water, surpassing the wettability of most known reagents. The proposed composition contains 140 mg/L oleic acid, 100 mg/L sodium hydroxide, and 70 mg/L linseed oil in water. The simplicity of this composition, its minimal impact on the environment and human health, and its negligible influence on the further use of coal raw materials make this wetting agent composition highly promising for application in coal industry technologies of water spray dust suppression.

Keywords

coal dust, dust suppression, hydrodedusting, wettability, surfactants, sodium oleate, linseed oil

Acknowledgments

The research was carried out at the expense of a grant of the Ministry of Education and Science of the Republic of Khakassia (Agreement No. 93 of 13.12.2022).

For citation

Golubkov V. A., Gorenkova G. A., Vorozhtsov E. P., Bepalova M. A., Bortnikov S. V. Chemical additive based on sodium oleate and linseed oil for preparation coal dust suppression composition. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):341–349. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-79>

Введение

Разработка каменноугольных месторождений, транспортировка угля и его переработка сопровождаются образованием и поступлением в воздушную среду значительных объемов твердых взвешенных частиц горных пород, в том числе угольной пыли.

Длительное воздействие угольной пыли может привести к предотвратимым, но неизлечимым заболеваниям легких, таким как: пневмокозиоз, хроническая обструктивная болезнь легких, туберкулез, хронический бронхит, эмфизема и другие, вплоть до летального исхода [1–4]. Этим болезням в наибольшей степени подвержены рабочие и инженеры угольных шахт и карьеров, станций перегрузки угля, цехов обогащения и занятые в его транспортировке. Кроме того, при высоких концентрациях каменноугольная пыль в смеси с кислородом воздуха является пожаро- и взрывоопасной [5]. Эти существенные проблемы указывают на необходимость применения эффективных технологий удаления угольной пыли из воздушной среды с минимизацией аэрологических рисков [6].

В целях предотвращения пылеобразования при разрушении, переработке и транспортировке пылящего материала и подавления образовавшейся пыли на добывающих и перерабатывающих горных предприятиях проводятся работы по увлажнению массивов горных пород и улавливанию летающей пыли. Эта группа методов, направленных на снижение содержания в атмосфере пыли и основанных на смачивании частиц водой, называется гидрообеспыливанием [7]. При гидрообеспыливании используется свойство воды смачивать пылевые частицы, связывать их и осаждать. Существенное ограничение данной технологии заключается в гидрофобности поверхности угля, которая препятствует смачиванию водой частиц угольной пыли. Для увеличения способности смачиваться необходимо модифицировать поверхность частиц – сделать её гидрофильной.

Значительные исследования были проведены в области разработки технологий борьбы с угольной

пылью. Подавление пыли распылением воды с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ) является одним из наиболее эффективных подходов [8]. Разработки данной технологии начались в первой половине XX в. и стали особенно востребованы после 1970-х годов из-за механизации и интенсификации добычи угля [9, 10].

Благодаря дифильной природе ПАВ эффективно адсорбируются на поверхности раздела вода–уголь и делают поверхность угольных частиц гидрофильной, этот процесс адсорбции уменьшает свободную поверхностную энергию угольной пыли и ускоряет процесс смачивания [11, 12].

Известные смачиватели для подавления угольной пыли, как правило, содержат в качестве основного компонента, улучшающего смачивание частиц пыли, различные ПАВ. Например, в работе [13] авторы предлагают использовать сочетание натриевой соли алкилбензосульфокислоты и оксиэтилированного алкилфенола (неонол), в работе [14] – натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы. Кроме ПАВ, рассматриваемые смачиватели содержат другие компоненты в количествах 0,2–2,0 мас.% от общего состава: карбамид, неорганические соли, одноатомные и многоатомные спирты. Хотя известно много составов для пылеподавления, поиск новых, более эффективных и экологических, является актуальной задачей.

Целью настоящей работы явилось совершенствование процесса подавления угольной пыли методом гидрообеспыливания путем разработки нового состава смачивающего агента. Критериями отбора реагентов в настоящей работе стали:

- эффективность действия реагента в процессе пылеподавления, подтвержденная хотя бы косвенными методами;

- простота и экономичность предлагаемой технологии;

- экологичность применяемых реагентов.

В связи с этим представлялось целесообразным рассмотреть возможность использования вещества

природного происхождения, обладающего поверхностной активностью. В качестве подобного компонента использовали натриевую соль олеиновой кислоты.

Олеиновая кислота – анионогенное поверхностно-активное вещество, которое снижает адгезию неполярных веществ в системе поверхностей твердая неполярная поверхность : полярная жидкость. Также олеат натрия значительно снижает потенциал взрыва угольной пыли [15].

Гидроксид натрия – реагент, взаимодействующий с олеиновой кислотой с образованием водорастворимого олеата натрия.

Льняное масло – реагент, способный вызывать слипание частиц посредством средства полярности масла и частиц угля, кроме того, жирные непредельные кислоты с длинными алкильными цепями способны полимеризоваться с образованием монослоя на поверхности [16].

Нами предложен состав [17] для применения в процессах гидрообеспыливания и определены оптимальные концентрации для улучшения эффективности пылеподавления рядом физико-химических методов.

Материалы и методы

Приготовление реагента

К 8 г (~28 ммоль) олеиновой кислоты прибавляли 30 мл воды и вносили 6 г (~150 ммоль) гидроксида натрия, после чего нагревали до 89–95 °С, после остывания доводили до 1 л водой. К полученному раствору при перемешивании добавляли навеску льняного масла для получения концентраций 1, 4, 8, 20 г/л.

Изучение смачиваемости угольной пыли проводили на образцах каменного угля Черногорского месторождения Минусинского угольного бассейна. Согласно данным С.И. Арбузова [18] по генетической классификации уголь Черногорского месторождения относится к каменным гумусовым углям, марки Д (длиннопламенные). Макрокомпонентный состав представлен витринитом (67–74 %), семивитринитом (1–4 %), фюзинитом (17–27 %), липтинитом (2–8 %) в разных процентных соотношениях по каждому отдельному пласти. Уголь месторождения среднезольный, содержание золы составляет 2,8–30 %. Выход летучих веществ в среднем 36–43 %, нижняя теплота сгорания – 4830 ккал/кг. Угольную пыль получали измельчением каменного угля Черногорского месторождения в фарфоровой ступке, усреднение проводили методом конверта, порошок просеивали через сито диаметром 0,5 мм. Согласно гранулометрическому анализу, проведённому на лазерном анализаторе размеров частиц Ласка ТД (Россия), доля частиц с размерами 0,5–5 мкм составляет менее 0,05%, 5–20 мкм – 56,0 %, 20–50 мкм – 43,5 %, 50–100 мкм – 0,5 %.

Метод капиллярного впитывания

Измерение смачивания поверхности угольных частиц водными растворами различного состава проводили по известному методу капиллярного впитывания [19], схема представлена на рис. 1. Навеску угольной пыли массой 1 г помещали в воронку Шотта (ПОР 100) с пористостью 0,04–0,1 мм, температура в помещении составляла 21 °С, максимальное время экспозиции 180 с. Смачиваемость, т.е. максимальное поглощение раствора, определена как отношение объема поглощенной жидкости к массе угля в %.

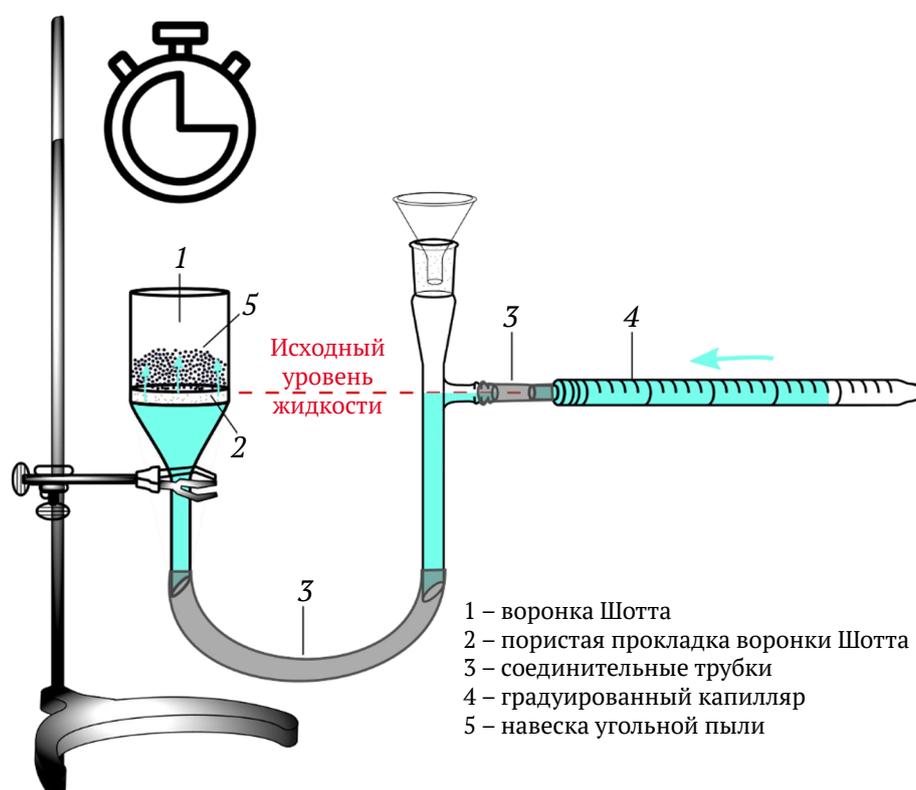


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения смачиваемости

Метод плёночной флотации

Определение массы частиц угля, нанесенного на поверхность жидкости, оседающих во времени, проводили с использованием торсионных весов ВТ-500. Для этого 1 г угля наносили на поверхность воды или раствора реагента и измеряли массу осевших через 1 и 3 мин частиц.

Метод непрерывного взвешивания оседающих частиц

Седиментационные кривые (кривые зависимости массы оседающих частиц от времени оседания) для частиц угля в воде и в растворах реагента получали с использованием торсионных весов ВТ-500. Для этого 1 г угля диспергировали в 300 мл раствора и измеряли массу оседающих частиц во времени.

Измерение электрокинетического потенциала

Измерения распределения частиц по гидродинамическому диаметру методом динамического рассеяния света (DLS) и распределения частиц по электрокинетическому потенциалу методом электрофоретической подвижности проводили на приборе Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments, Великобритания): лазер – 633 нм; режим обратного рассеяния, угол 173°; поликарбонатная ячейка с Pd-электродами; температура измерений 25 °С. Все измерения коллоидов угля проводили при pH 11±0,1 и автогенной ионной силе. Измерения мицелл исходного реагента проводили при автогенных pH и ионной силе.

Коллоид каменного угля для измерения электрокинетического потенциала получали обработкой ультразвуком в воде с помощью ультразвукового гомогенизатора SONOPULS mini20 (Bandelin, Германия). 1 г угля заливали 50 мл деионизованной воды и обрабатывали в течение 15 мин (100 кДж). Суспензию отстаивали 24 ч при комнатной температуре и отбирали верхний слой, частички которого использовались в качестве модели пылевых частиц угля.

Результаты и обсуждение

Измерение смачиваемости и оптимизация состава

Смачиваемость угольной пыли различается в зависимости от используемого смачивающего состава. При обработке пыли дистиллированной водой показатель смачиваемости составляет 39 %. Для увеличения смачиваемости частиц пыли нами применялась натриевая соль олеиновой кислоты – олеат натрия. Добавление олеата натрия привело к повышению смачиваемости до 54 %. Более существенное повышение смачиваемости (до 64 %) наблюдается при использовании раствора олеата натрия с добавкой льняного масла. Внесение льняного масла в рабочий раствор производили в количестве 1, 4, 8, 20 г/л. Оптимальной концентрацией льняного масла в растворе является 4 г/л (рис. 2).

Синтез реагента оптимального состава для пылеподавления и его характеристики

На основании экспериментальных данных был подобран наиболее эффективный состав реагента: 8 г/л олеиновой кислоты, 6 г/л гидроксида натрия, 4 г/л льняного масла. Полученный реагент представляет собой прозрачную жидкость светло-жёлтого цвета; pH 12,85; электропроводность 22 мСм/см.

Поскольку концентрация ПАВ превышает критическую концентрацию мицеллообразования, реагент представляет собой дисперсную систему. Распределение дисперсной фазы по размеру имеет две моды: 1 – со средним размером 7,5 нм предположительно мицеллы; и 2 – со средним размером 150 нм (рис. 3). Более крупные частицы предположительно являются агрегатами мицелл ПАВ. При достаточно сильном разбавлении и те, и другие растворяются. Таким образом, данный состав подходит под большинство требований к смачивателям для пылеподавления в угольной и горнорудной промышленности [20].

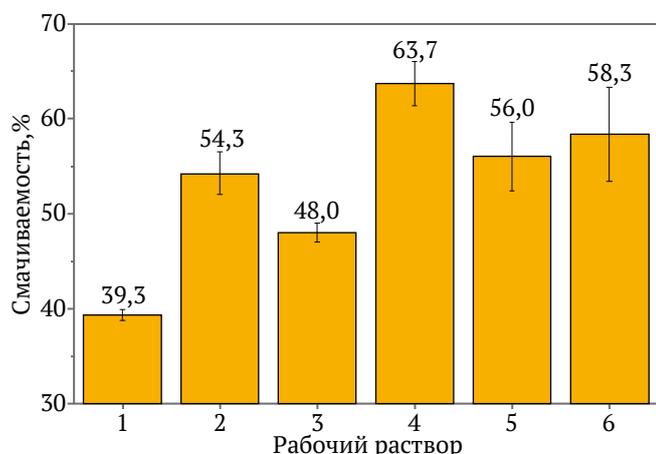


Рис. 2. Смачиваемость угольной пыли при использовании рабочих растворов:

- 1) дистиллированной воды; 2) олеата натрия (ОН); 3) ОН с льняным маслом C_M 1 г/л; 4) ОН с льняным маслом C_M 4 г/л; 5) ОН с льняным маслом C_M 8 г/л; 6) ОН с льняным маслом C_M 20 г/л

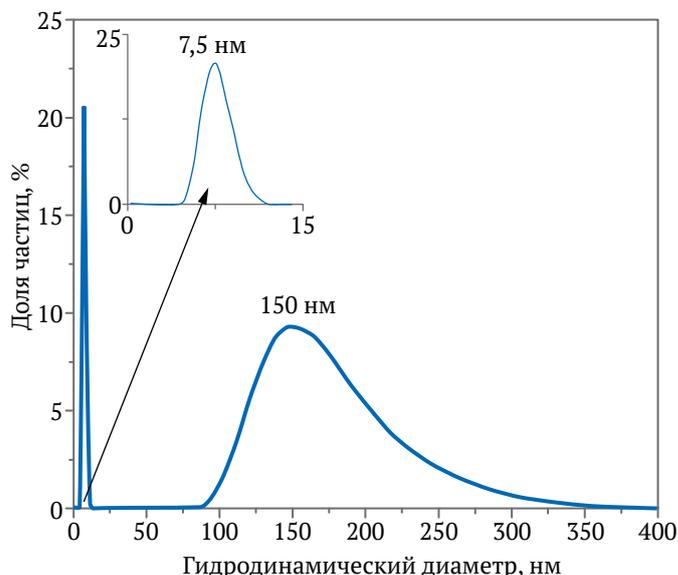


Рис. 3. Распределение мицелл и флоккул по размеру в исходном реагенте

Подбор степени разбавления реагента

Поскольку использование в гидрообеспыливающих реагентах большой концентрации нецелесообразно по экономическому эффекту, чревато техническими и инженерными проблемами и даже негативным воздействием на окружающую среду, необходимо подобрать степень разбавления. Методом капиллярного впитывания было изучено влияние концентрации реагента на смачиваемость угольной пыли. Чистая вода показывает низкую эффективность смачивания (39 %), исходный реагент значительно более высокую – 64 %. Разбавление приводит к увеличению смачиваемости угля: 10 %-ный раствор – 68 %, 3,3 %-ный раствор – 69 %, 1,7 %-ный раствор – 73 % (рис. 4).

Приняв эффективность воды в смачивании угольной пыли за 100 %, можно оценить добавочную эффективность смачивания при использовании ПАВ, %:

$$E_r = \frac{E_w P_r}{P_w},$$

где E_r – эффективность смачивающего реагента, %; E_w – эффективность воды (100 %); P_r – показатели смачивающего агента в эксперименте, в данном случае смачиваемость, %; P_w – показатели воды в эксперименте.

В исследованиях разных добавок эта относительная эффективность колебалась от 100 % (равно эффекту чистой воды) до 193 % (превышает эффективность воды почти в 2 раза) [8]. Максимальную эффективность в смачивании угольной пыли предложенный нами состав имеет при разбавлении до 1,7 % (140 мг/л олеиновой кислоты, 100 мг/л гидроксида натрия, 70 мг/л льняного масла в воде). Его эффективность относительно чистой воды составила 187 %. Учитывая доступность и дешевизну компонентов, их малое потенциальное воздействие на окружающую среду, данный вариант реагента может быть рекомендован к дальнейшим исследованиям.

От используемого состава зависит не только смачиваемость, но и скорость смачивания. Показано, что вода имеет меньшую начальную скорость смачивания, а растворы реагента для гидрообеспыливания – значительно большую. Однако от концентрации ПАВ в системе начальная скорость оседания не зависит (рис. 5).

Тесты на погружение частиц в растворах ПАВ, такие как метод плёночной флотации и седиментационный анализ, являются традиционными способами оценки эффективности смачивания угольной пыли рабочими растворами [8, 21]. Скорость погружения частиц с поверхности раствора определяется в том числе эффективностью смачивания. При повышении концентрации до 3,3 % наблюдается увеличение массы осевших частиц. Это явным образом свидетельствует об улучшении смачивания частиц и, соответственно, более лёгком прохождении ими поверхности жидкости. При концентрации реагента более 5 % масса осевших за время частиц значительно снижается, показатель даже ниже, чем для воды. В этих случаях процесс седиментации лимитируется не проникновением частицы с поверхности жидкости в объём раствора, а агрегативной устойчивостью частиц. Естественно, что в результате адсорбции анионогенного

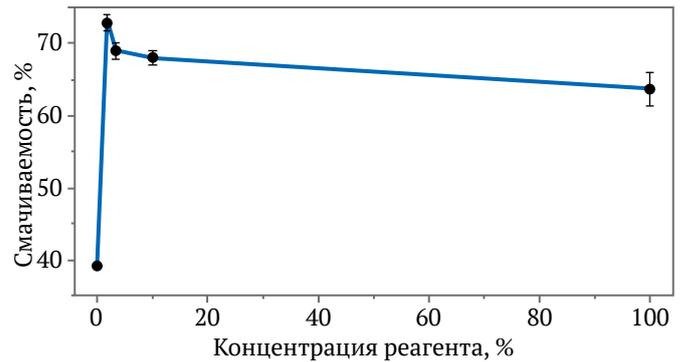


Рис. 4. Смачиваемость угля растворами реагента разной концентрации

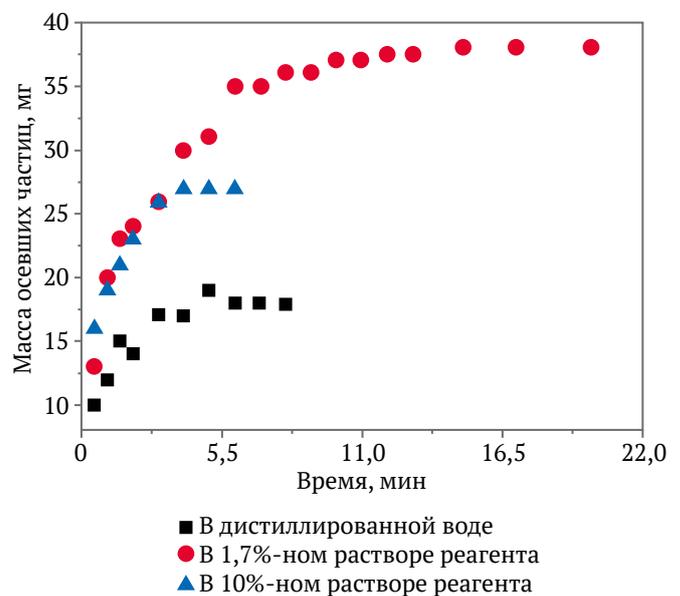


Рис. 5. Скорость седиментации частиц угольной пыли в водных растворах смачивающего реагента

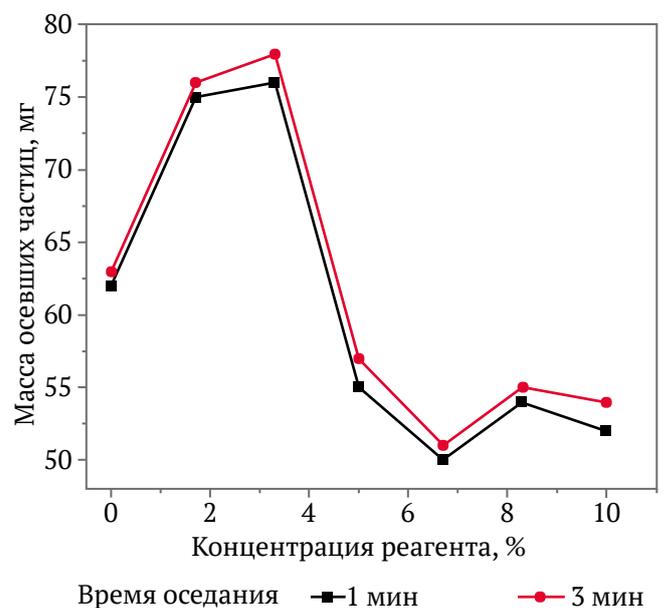


Рис. 6. Зависимость массы осевших частиц от концентрации реагента

ПАВ происходит усиление поверхностного заряда частиц и возникает большее электростатическое отталкивание между ними.

Для проверки установленных закономерностей были измерены распределения гидродинамических радиусов и электрокинетических потенциалов коллоидов угля (рис. 7).

Распределение частиц в воде мономодальное, средний размер 230 нм. Добавка ПАВ приводит к образованию 2 мод в распределении по размерам при всех концентрациях реагента. Значительная доля частиц уменьшила свой размер и образовалась мода со средним размером 100–110 нм, то есть происходит дезагрегация или дезагломерация частиц из-за электростатического отталкивания, что является хорошо известным явлением [22]. В том числе известно применение олеата натрия для диспергирования технического углерода с уменьшением размеров частиц [23].

Коллоид угля при pH 11 имеет очень выраженный отрицательный заряд, средний ζ потенциал -46 мВ. Добавление ПАВ и его адсорбция на поверхности приводят к изменениям в распределении частиц по зарядам (рис. 7, б). При адсорбции ПАВ происходит сразу два процесса: подавление диссоциации поверхностных кислотных групп угля и появление новых центров ионизации – диссоциированных молекул адсорбата [24]. При более низких концентрациях ПАВ (0,9%-ный раствор реагента) оба фактора влияют слабо, а при максимальной концентрации ПАВ (5%-ный раствор реагента) распределение частиц по зарядам уже мало отличается от угля в воде, т.е. факторы компенсировали друг друга. Наиболее интересны результаты, полученные при концентрации реаген-

та 1,7 и 3,3 %. В этих случаях наблюдается сужение распределения частиц по ζ потенциалу и смещение в сторону меньших зарядов, в экспериментах по измерению смачиваемости и погружению частиц эти составы также показали лучшие результаты.

При контакте частиц угля и расплывённых капель раствора ПАВ происходит эффективное смачивание частиц угля, в отличие от капель чистой воды. На рис. 8 представлено графическое объяснение действия добавок анионогенных ПАВ в процессе гидрообеспыливания. Сначала частицы пыли и капли сталкиваются (процессы I и II), эти стадии почти не зависят от свойств раствора. При взаимодействии гидрофобной частицы угольной пыли и чистой воды краевой угол смачивания $\theta > 90^\circ$, что не позволяет каплям захватывать угольную пыль и осаждают её (процесс III). Адсорбция олеата натрия из капель раствора ПАВ делает поверхность угольных частиц более гидрофильной. В этом случае взаимодействие растворённых веществ, твёрдой частицы и воды позволяет воде растекаться по изначально гидрофобной поверхности, краевой угол смачивания $\theta < 90^\circ$ (процесс III). При таком характере взаимодействия жидкость – твёрдое тело агломерация происходит путём поглощения частиц каплями (процесс IV), которые разрастаются [12]. Однако при избыточной адсорбции и, соответственно, слишком большом поверхностном заряде частиц иммерсия частиц может замедляться или останавливаться из-за их электростатического отталкивания. Таким образом, объясняется обнаруженная экстремальная зависимость эффективности смачивания от концентрации ПАВ и обосновывается выбор концентрации реагента, необходимой для высокой эффективности смачивания угольной пыли.

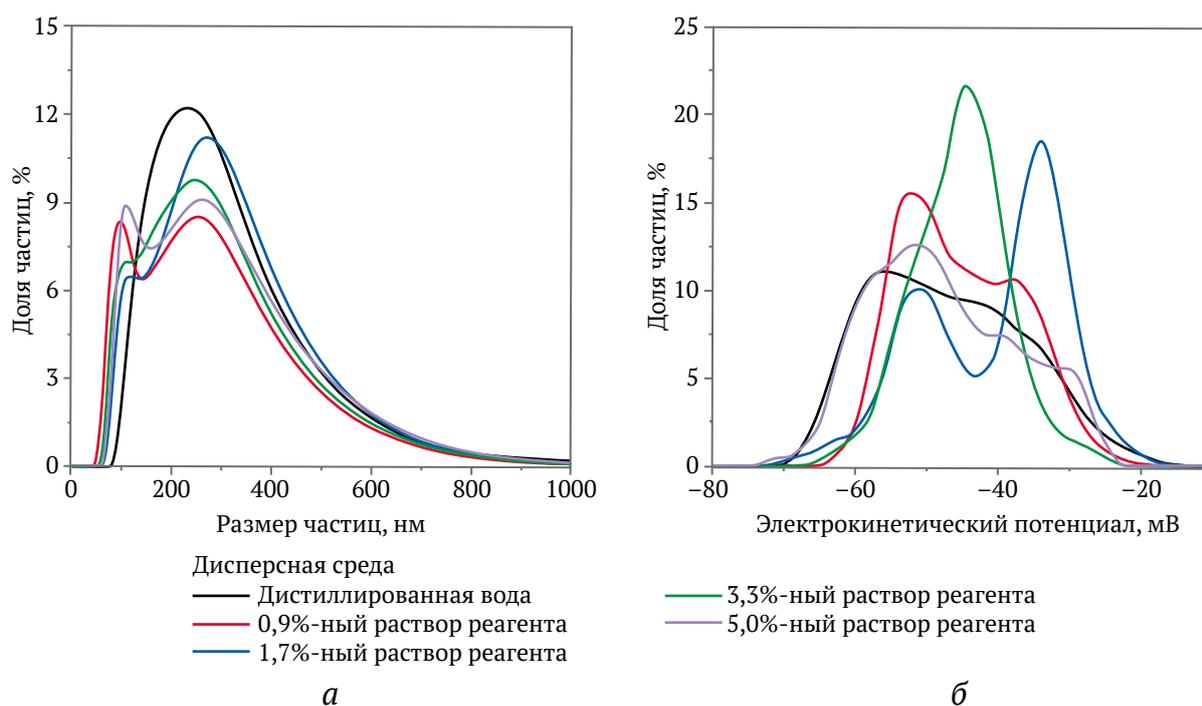


Рис. 7. Распределение коллоидных частиц по размеру – а и электрокинетическому потенциалу с добавками реагента для пылеподавления – б

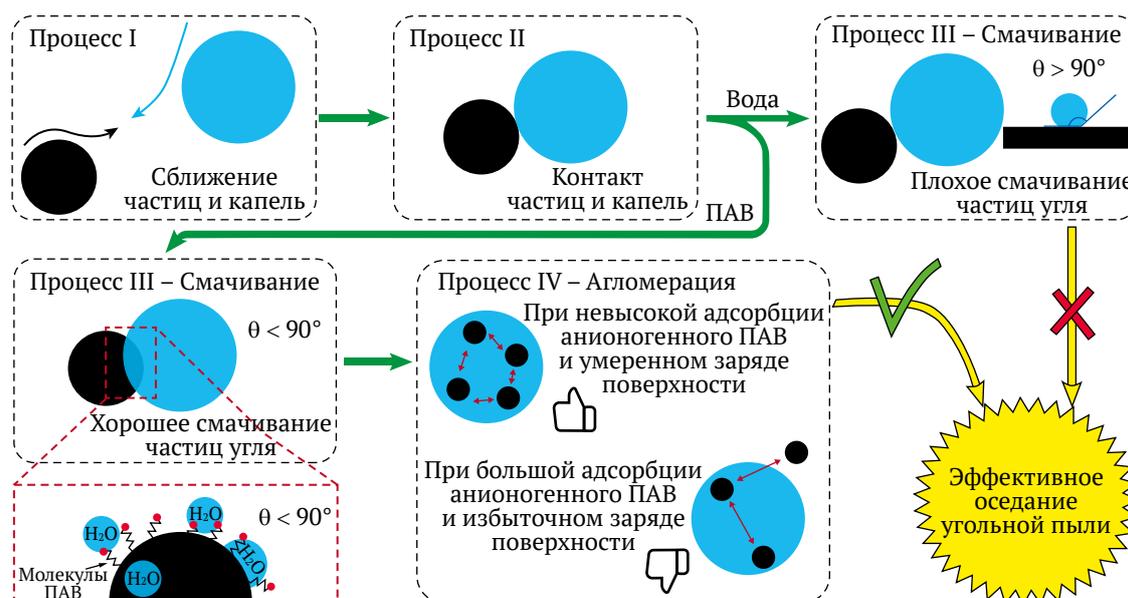


Рис. 8. Схема действия добавок анионогенных ПАВ в процессе гидрообеспыливания

Заключение

Нами предложен состав смачивателя для подавления угольной пыли [17], изучены его свойства и оценена способность улучшать смачиваемость гидрофобной поверхности. С применением физико-химических методов определена наиболее эффективная концентрация состава для гидрообеспыливания – наиболее целесообразно применять 1,7%-ный раствор реагента (140 мг/л олеиновой кислоты, 100 мг/л гидроксида натрия, 70 мг/л льняного масла в воде). Эффективность

в экспериментах по смачиванию угольной пыли составила 187 % по сравнению с чистой водой, что находится на уровне лучших составов для пылеподавления, известных в литературе. В результате показано, что исследуемые компоненты рабочих растворов оказывают положительное влияние на смачиваемость угля и её скорость. Преимуществом предложенного состава является безопасность применяемых ПАВ – олеиновой кислоты и льняного масла, которые получены из возобновляемого растительного сырья.

Список литературы

1. Ayoglu F.N., Acikgoz B., Tutkun E., Gebedek S. Descriptive characteristics of coal workers' pneumoconiosis cases in Turkey. *Iranian Journal of Public Health*. 2014;43(3):389. URL: <https://ijph.tums.ac.ir/index.php/ijph/article/view/4162>
2. Pollock D., Potts J.D., Joy G. Investigation into dust exposures and mining practices in mines in the southern Appalachian Region. *Mining Engineering*. 2010;62:44.
3. Ross M., Murray J. Occupational respiratory disease in mining. *Occupational Medicine*. 2004;54(5):304–310. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqh073>
4. Perret J. L., Plush B., Lachapelle P. et al. Coal mine dust lung disease in the modern era. *Respirology*. 2017;22(4):662–670. <https://doi.org/10.1111/resp.13034>
5. Cao W., Gao W., Peng Y., Liang J., Pan F., Xu S. Experimental and numerical study on flame propagation behaviors in coal dust explosions. *Powder Technology*. 2014;266:456–462. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.063>
6. Баловцев С.В. Аэрологические риски высших рангов в угольных шахтах. *Горные науки и технологии*. 2022;7(4):310–319. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-18>
7. Летуев К., Ковшов С., Гридина Е. Технология гидрообеспыливания автомобильных дорог угольных разрезов с применением очищенных сточных и дренажных вод. *Экология и промышленность России*. 2020;24(1):30–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-1-30-33>
8. Xu G., Chen Y., Eksteen J., Xu J. Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors. *Science of The Total Environment*. 2018;639:1060–1076. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.182>
9. Hartmann I., Greenwald H.P. *Use of wetting agents for allaying coal dust in mines*. US Department of the Interior, Bureau of Mines; 1940.
10. Harrold R. Surfactants vs. dust – do they work? *Coal Age*. 1979;84(6):102–105.
11. Liu H., Sun D., Hao J. *Colloid and interface chemistry*. Chemical Industry Press, Peking, China; 2016.



12. Li S., Zhao B., Lin H. et al. Review and prospects of surfactant-enhanced spray dust suppression: Mechanisms and effectiveness. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;154:410–424. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.037>
13. Глебов А. Ф. *Смачиватель для подавления угольной пыли*. RU2495250C1. Патент. 2013.
14. Ковшов С. В., Ковшов В. П., Ерзин А. Х., Сафина А. М. *Способ пылеподавления на открытых угольных складах*. RU2532939. Патент. 2013.
15. Huang Q., Honaker R. Q., Perry K. A., Lusk B. Surface chemistry modification of rock dust for improved dispersion and coal dust explosion prevention. In: *Proceedings of the 2015 SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference – Mining: Navigating the Global Waters*. 2015. Pp. 245–251.
16. Osman M. A., Suter U. W. Surface treatment of calcite with fatty acids: structure and properties of the organic monolayer. *Chemistry of Materials*. 2002;14(10):4408–4415. <https://doi.org/10.1021/cm021222u>
17. Бортников С. В., Горенкова Г. А. *Смачиватель для подавления угольной пыли*. RU2689469 C1 Патент. 2019.
18. Арбузов С. И., Ершов В. В. *Геохимия редких элементов в углях Сибири*. Томск; Д-Принт; 2007. 468 с.
19. Коузов П. А., Скрыбина Л. Я. *Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей*. Л.: Химия; 1983.
20. Поздняков Г., Третьяков А., Гаравин В., Новосельцев А. Требования к смачивателям для пылеподавления в угольной и горнорудной промышленности. *Безопасность труда в промышленности*. 2013(10):36–39.
21. Walker P., Petersen E., Wright C. Surface active agent phenomena in dust abatement. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1952;44(10):2389–2393. <https://doi.org/10.1021/ie50514a032>
22. Knyazheva O., Baklanova O., Lavrenov A. et al. The effect of ultrasonic exfoliation and the introduction of a surfactant on particle size and aggregative stability water dispersions of carbon black. In: *Oil and Gas Engineering (OGE-2018)*. 26 February – 2 March 2018, Omsk, Russia. 2018;2007(1):020016. <https://doi.org/10.1063/1.5051855>
23. Sis H., Birinci M. Effect of nonionic and ionic surfactants on zeta potential and dispersion properties of carbon black powders. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2009;341(1–3):60–67. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.03.039>
24. Maršálek R. The influence of surfactants on the zeta potential of coals. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2008;31(1):66–75. <https://doi.org/10.1080/15567030701468142>

References

1. Ayoglu F. N., Acikgoz B., Tutkun E., Gebedek S. Descriptive characteristics of coal workers' pneumoconiosis cases in Turkey. *Iranian Journal of Public Health*. 2014;43(3):389. URL: <https://ijph.tums.ac.ir/index.php/ijph/article/view/4162>
2. Pollock D., Potts J. D., Joy G. Investigation into dust exposures and mining practices in mines in the southern Appalachian Region. *Mining Engineering*. 2010;62:44.
3. Ross M., Murray J. Occupational respiratory disease in mining. *Occupational Medicine*. 2004;54(5):304–310. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqh073>
4. Perret J. L., Plush B., Lachapelle P. et al. Coal mine dust lung disease in the modern era. *Respirology*. 2017;22(4):662–670. <https://doi.org/10.1111/resp.13034>
5. Cao W., Gao W., Peng Y., Liang J., Pan F., Xu S. Experimental and numerical study on flame propagation behaviors in coal dust explosions. *Powder Technology*. 2014;266:456–462. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.063>
6. Balovtsev S. Higher rank aerological risks in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(4):310–319. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-18>
7. Letuyev K., Kovshov S., Gridina E. The Technology of Hydrodedusting of coal pits' auto roads using purified wastewater and drainage water. *Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(1):30–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-1-30-33>
8. Xu G., Chen Y., Eksteen J., Xu J. Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors. *Science of The Total Environment*. 2018;639:1060–1076. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.182>
9. Hartmann I., Greenwald H. P. *Use of wetting agents for allaying coal dust in mines*. US Department of the Interior, Bureau of Mines; 1940.
10. Harrold R. Surfactants vs. dust – do they work? *Coal Age*. 1979;84(6):102–105.
11. Liu H., Sun D., Hao J. *Colloid and interface chemistry*. Chemical Industry Press, Peking, China; 2016.
12. Li S., Zhao B., Lin H. et al. Review and prospects of surfactant-enhanced spray dust suppression: Mechanisms and effectiveness. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;154:410–424. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.037>
13. Glebov A. F. *Penetrating agent for coal dust suppression*. RU2495250C1 (Patent). 2013.
14. Kovshov S. V., Kovshov V. P., Erzsin A. Kh., Safina A. M. *Method of dust suppression in opened coal storages*. RU2532939. Patent. 2013.



15. Huang Q., Honaker R.Q., Perry K.A., Lusk B. Surface chemistry modification of rock dust for improved dispersion and coal dust explosion prevention. In: *Proceedings of the 2015 SME Annual Conference and Expo and CMA 117th National Western Mining Conference – Mining: Navigating the Global Waters*. 2015. Pp. 245–251.
16. Osman M.A., Suter U.W. Surface treatment of calcite with fatty acids: structure and properties of the organic monolayer. *Chemistry of Materials*. 2002;14(10):4408–4415. <https://doi.org/10.1021/cm021222u>
17. Bortnikov S.V., Gorenkova G.A. *Wetting agent for the suppression of coal dust*. RU2689469 C1 Patent. 2019.
18. Arbutov S.I., Ershov V.V. *Geochemistry of rare elements in Siberian coals*. Tomsk: D-Print Publ.; 2007, 468 p. (In Russ.)
19. Kouzov P.A., Skryabin L. Ya. *Methods of determination of physical and chemical properties of industrial dusts*. Leningrad: Khimiya Publ.; 1983. (In Russ.)
20. Pozdnyakov G., Tretyakov A., Garavin V., Novoseltsev A. Requirements for wetting agents for dust suppression in coal and mining industries. *Occupational Safety in Industry*. 2013;(10):36–39. (In Russ.)
21. Walker P., Petersen E., Wright C. Surface active agent phenomena in dust abatement. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1952;44(10):2389–2393. <https://doi.org/10.1021/ie50514a032>
22. Knyazheva O., Baklanova O., Lavrenov A. et al. The effect of ultrasonic exfoliation and the introduction of a surfactant on particle size and aggregative stability water dispersions of carbon black. In: *Oil and Gas Engineering (OGE-2018)*. 26 February – 2 March 2018, Omsk, Russia. 2018;2007(1):020016. <https://doi.org/10.1063/1.5051855>
23. Sis H., Birinci M. Effect of nonionic and ionic surfactants on zeta potential and dispersion properties of carbon black powders. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2009;341(1–3):60–67. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.03.039>
24. Maršálek R. The influence of surfactants on the zeta potential of coals. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2008;31(1):66–75. <https://doi.org/10.1080/15567030701468142>

Информация об авторах

Виктор Александрович Голубков – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории каталитических превращений возобновляемых ресурсов, Институт химии и химической технологии СО РАН, г. Красноярск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-1518-790X](https://orcid.org/0000-0002-1518-790X), Scopus ID [57391926200](https://scopus.com/authorid/57391926200); e-mail golubkov.va@icct.krasn.ru

Галина Алексеевна Горенкова – кандидат химических наук, доцент, кафедра химии и геоэкологии, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, г. Абакан, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3412-6384](https://orcid.org/0000-0003-3412-6384); e-mail gorenkovagala@mail.ru

Евгений Павлович Ворожцов – студент кафедры химии и геоэкологии, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, г. Абакан, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8388-1330](https://orcid.org/0000-0001-8388-1330); e-mail vorozhcov2001@mail.ru

Мария Алексеевна Беспалова – студент кафедры химии и геоэкологии, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, г. Абакан, Российская Федерация; ORCID [0009-0001-5377-3715](https://orcid.org/0009-0001-5377-3715); e-mail bespalova.mariya.1307@mail.ru

Сергей Валериевич Бортников – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой химии и геоэкологии, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, г. Абакан, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4583-0118](https://orcid.org/0000-0002-4583-0118); e-mail svb@khsu.ru

Information about the authors

Viktor A. Golubkov – Ph.D.-Student, Junior Researcher, Laboratory of Catalytic Transformations of Renewable Resources, Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-1518-790X](https://orcid.org/0000-0002-1518-790X), Scopus ID [57391926200](https://scopus.com/authorid/57391926200); e-mail golubkov.va@icct.krasn.ru

Galina A. Gorenkova – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of Chemistry and Geoecology, Khakassian State University named after N.F. Katanov, Abakan, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3412-6384](https://orcid.org/0000-0003-3412-6384); e-mail gorenkovagala@mail.ru

Evgeniy P. Vorozhtsov – Student, Department of Chemistry and Geoecology, Khakassian State University named after N.F. Katanov, Abakan, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8388-1330](https://orcid.org/0000-0001-8388-1330); e-mail vorozhcov2001@mail.ru

Mariya A. Bespalova – Student, Department of Chemistry and Geoecology, Khakassian State University named after N.F. Katanov, Abakan, Russian Federation; ORCID [0009-0001-5377-3715](https://orcid.org/0009-0001-5377-3715); e-mail bespalova.mariya.1307@mail.ru

Sergey V. Bortnikov – Cand. Sci. (Chem.), Head of the Department of Chemistry and Geoecology, Khakassian State University named after N.F. Katanov, Abakan, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4583-0118](https://orcid.org/0000-0002-4583-0118); e-mail svb@khsu.ru

Поступила в редакцию 04.02.2023

Поступила после рецензирования 28.06.2023

Принята к публикации 30.06.2023

Received 04.02.2023

Revised 28.06.2023

Accepted 30.06.2023



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-163>

УДК 622.4:622.8



Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах

С. В. Баловцев   

Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

 balovcev@yandex.ru

Аннотация

Оценка и управление аэрологическими рисками аварий в угольных шахтах основываются на создании информационно-аналитической системы данных, включающей в себя проектные значения показателей разных уровней и подсистем угольных шахт, эксплуатационные значения показателей, отслеживаемых системой мониторинга в реальном времени с использованием различных датчиков и устройств. В настоящем исследовании представлена методология мониторинга аэрологических рисков. На основании горно-геологических и горнотехнических условий отработки пластов, статистических данных по элементам вентиляционных и дегазационных систем угольных шахт приведены результаты оценки аэрологических рисков по отдельным уровням функциональной структуры угольных шахт, а также по отдельным факторам риска. По уровням аэрологических рисков выполнено ранжирование восьми угольных шахт. Установлено, что минимальное значение аэрологического риска I ранга составляет 0,0769, максимальное – 0,5698. Наименьшие значения аэрологического риска II ранга (0,1135–0,3873) относятся к шахтам II категории. Минимальное значение аэрологического риска III ранга составляет 0,057, максимальное – 0,595. Ранжирование угольных шахт по уровням аэрологических рисков позволяет выявить шахты с низким уровнем аэрологической безопасности и для каждой шахты определить направления технических, технологических и организационно-технических мероприятий по повышению аэрологической безопасности.

Ключевые слова

угольная шахта, информационно-аналитическая система, аэрологическая безопасность, мониторинг аэрологических рисков, уязвимость схем и способов вентиляции

Для цитирования

Balovtsev S.V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):350–359. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-163>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines

S. V. Balovtsev   

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

 balovcev@yandex.ru

Abstract

The assessment and management of aerological risks in coal mine accidents are based on the development of a data analytics system that hosts design values for various parameters and subsystems related to coal mines, as well as the real-time monitoring of operational parameters through various sensors and devices. This study presents the methodology for monitoring aerological risks. It utilizes mining, geological, and geotechnical conditions for seam extraction, along with statistical data concerning elements of coal mine ventilation and gas drainage systems, to assess aerological risks at individual coal mine functionality levels and individual risk factors. Eight coal mines have been ranked according to their aerological risk level. For rank I, the minimum aerological risk is 0.0769, while the maximum is 0.5698. Rank II is associated with category II mines. Aerological risk for this rank is the lowest and ranges from 0,1135 to 0,3873. In the case of rank III, the minimum aerological risk is 0.057, with a maximum of 0.595. This ranking of coal mines by aerological risk level allows to identify potentially unsafe mines in terms of aerology, and enables us to determine aerological risk mitigation measures (technical, technological, and organizational) for each mine to enhance aerological safety.

**Keywords**

coal mine, data analytics system, aerological system, aerological risk monitoring, vulnerability of ventilation schemes and types

For citation

Balovtsev S.V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):350–359. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-163>

Введение

Тенденции к интенсификации горного производства и увеличению объемов угля подземным способом в усложняющихся горно-геологических и горнотехнических условиях требуют более пристального внимания и системного подхода к вопросам обеспечения промышленной безопасности, одним из основных компонентов которой является аэрологическая безопасность.

Отказы, возникающие при функционировании системы аэрологической безопасности, могут быть вызваны неблагоприятным сочетанием различных факторов: колебанием интенсивности газовыделений из разрабатываемого пласта, выработанного пространства, нестационарностью газодинамических процессов [1, 2]; колебаниями расхода воздуха, непланируемыми изменениями сопротивления выработок, отказами вентиляционных сооружений [3, 4]; колебанием значений параметров горно-геологических и горнотехнических условий, изменением физико-технических свойств разрабатываемых пластов (газоносности, газопроницаемости, газоотдачи, коллекторских, фильтрационных свойств, пылеобразующей способности), геологическими нарушениями и т.д. [5, 6]. Поэтому при исследовании закономерности возникновения отказов системы аэрологической безопасности отдельные вышеуказанные параметры рассматриваются в большей части как непрерывные случайные величины, а не дискретные, которые могут принимать любые неизвестные заранее значения из рассматриваемого диапазона значений.

Нестационарность динамических процессов (газо-пыле-тепловыделений) в шахтах является первопричиной потери работоспособности системы управления аэрологической безопасностью, так как изменения горно-геологических и горнотехнических условий разработки угольных пластов могут привести к опасности возникновения взрывов и вспышек пылегазовых смесей, пожарам, горным ударам, самовозгоранию углей и другим видам аварий [7, 8].

Свойства и состояние угольных пластов и вмещающих пород определяют источники и места проявления газовыделения, пылеобразования, внезапных выбросов угля, пород и газа, самовозгорания угля, горных ударов [9, 10]. Поэтому тщательное изучение закономерностей, происходящих в угленосной толще явлений, составляет основу для принятия технических решений в рамках системы обеспечения аэрологической безопасности. Эффективность технических решений напрямую зависит от достоверности и оперативности информации о состоянии параметров многих технологических процессов [11, 12]. Знание закономерностей позволит установить весомость эффективности направлений мероприятий систе-

мы обеспечения аэрологической безопасности. Например, при отработке высокогазоносных угольных пластов, опасных по взрывам пыли, мероприятия по дегазации (заблаговременной, предварительной, пластовой) выходят на первый план [13, 14]. Также важны вопросы, касающиеся порядка отработки пластов в свите, затем следуют вопросы выбора схем вентиляции, специального проветривания с использованием газоотсасывающих установок и др. [15, 16].

На больших глубинах отработки угольных пластов возрастает интенсивность сближения кровли и почвы и, следовательно, возрастает роль аэродинамического старения выработок и его влияние на эффективность системы обеспечения аэрологической безопасности [17, 18].

Важная роль в системе обеспечения аэрологической безопасности отводится системе управления газовыделением, под которой понимается комплекс мероприятий по перераспределению газовыделения или изменению его величины. Целью управления газовыделением является облегчение вентиляции выработок, повышение эффективности вентиляции выемочных участков, подготовительных выработок и шахты в целом.

Управление газовыделением осуществляется проведением следующих основных мероприятий: изменение схем вентиляции; изменение аэродинамического сопротивления выработок с помощью вентиляционных сооружений и устройств; применение соответствующего порядка отработки пластов в свите и систем разработки; применение специального проветривания выработанного пространства, использование газоотсасывающих установок; применение дегазации выработок и пластов, газодренажных выработок и скважин и др. Для изучения процессов взаимодействия и механизма самовозгорания газа и угля в выработанном пространстве угольных лав могут быть применимы методы численного моделирования риска взрыва газа в выработанном пространстве [19, 20].

Методология мониторинга аэрологических рисков

Оценку эффективности функционирования системы аэрологической безопасности можно осуществить через оценку аэрологических рисков, охватывающих разные уровни и подсистемы угольных шахт, т.е. риски I, II и III рангов, риски загазирования, риски при повторном использовании выработок, риски влияния тяжелых углеводородов, обобщенный и прогнозный показатели риска и др. (табл. 1). Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах на основе имеющейся информации можно реализовать с помощью методов предиктивной аналитики.



На основе собранной, обработанной и структурированной информации можно с помощью методов предиктивной аналитики разработать сценарии о дальнейшем развитии интересующих нас событий. Поэтому первый вопрос, который возникает в этой связи, касается поиска, затем обработки информации и далее – разработки сценариев и интерпретации полученных результатов для выбора управленческих решений в системе обеспечения аэрологической безопасности.

Процесс сбора информации имеет разные уровни сложности сам по себе и зависит от степени вовлеченности в этот процесс человека, ручной труд которого до сих пор имеет низкую надежность и высокий риск ошибок [21, 22]. Для повышения надежности полученных решений используются ансамблевые подходы, характеризующиеся сопоставлением базовых индивидуальных решений [23, 24].

Различают четыре вида аналитики данных:

1. Описательная – сбор информации в течение всего времени наблюдения за объектом. Собранная информация анализируется, она должна помочь ответить на вопрос «Что произошло?». Для угольных шахт методами описательной аналитики можно осуществлять сбор информации по: авариям в угольных шахтах, их причинам, ущербу; горно-геологическим и горнотехническим условиям, при которых произошла авария, расследованию причин аварий и др. [25, 26].

2. Диагностическая – диагноз причин, из-за которых произошло исследуемое событие, с помощью статистических методов анализа. Все собранные данные могут быть разбиты на отдельные группы и подгруппы, производится анализ корреляции данных, выявляются значимые факторы, влияющие на результативное событие. В рамках диагностической аналитики могут быть сформированы группы статистических данных по характеристикам пластов, маркам углей, глубине ведения горных работ, метаноносности пластов, опасности шахт по пыли, нагрузке на очистной забой, абсолютной метанообильности шахт, скорости подвигания очистного забоя, схемам и способам вентиляции шахт и выемочных участков, характеристикам вентиляторов главного и местного проветривания и др.

3. Предиктивная – на основе предварительно обработанной информации, полученной с помощью методов описательной и диагностической аналитики, прогнозируют дальнейшее развитие событий. Так, например, изучив показатели старения выработок, методами предиктивной аналитики можно определить момент времени, когда в выработке должен быть произведен предупредительный ремонт, что снизит аэрологические риски в системе функционирования шахтных вентиляционных систем [4, 27].

4. Аналитика, позволяющая понять и обосновать те меры, которые надо предпринять для недопущения нежелательного события. Назовем ее предпри-

Таблица 1

Эксплуатационные показатели аэрологических рисков

Ранги аэрологических рисков	Эксплуатационные показатели аэрологических рисков	Примечание
I ранг	Аэрологический риск I ранга $R_{аш}$	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, схемы и способа вентиляции шахты, уязвимости вентиляторов главного проветривания
II ранг	Аэрологический риск II ранга $R_{акш}$	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, схемы и способа вентиляции крыла шахты, уязвимости вентиляционных сооружений
III ранг	Аэрологический риск III ранга R_a	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости выемочного участка
	Аэрологический риск аварий $R_{тув}$ на выемочных участках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов	Зависит от содержания тяжелых углеводородов в остаточных газах углей (марки Д, Г, ДГ, ГЖ, Ж, КЖ, К, КС, ОС), метаноносности угольных пластов, удельного пылевыведения, глубины ведения горных работ и уязвимости выемочного участка по технологическим факторам
	Обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска $Q_{пр}$	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости выемочного участка, учитывает склонность пластов к самовозгоранию и горным ударам, применение дегазации, газоотсасывающих установок и газодренажного штрека
	Риск загазирования участка $R_{заг.уч}$	Учитывает среднестатистические данные интенсивности отказов в выработках и схему проветривания выемочного участка
	Риск загазирования участка $R_{заг.уч}$ при повторном использовании выработки, сут ⁻¹	Учитывает среднестатистические данные интенсивности отказов в выработках и схему проветривания выемочного участка, а также повторное использование выработки
	Аэрологический риск аварий в подготовительных выработках R_a	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости подготовительных выработок
	Аэрологический риск аварий $R_{туп}$ в подготовительных выработках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов	Зависит от содержания тяжелых углеводородов в остаточных газах углей (марки Д, Г, ДГ, ГЖ, Ж, КЖ, К, КС, ОС), метаноносности угольных пластов, удельного пылевыведения, глубины ведения горных работ и уязвимости подготовительной выработки по технологическим факторам
Прогнозный показатель аэрологического риска в подготовительных выработках $Q_{пр}$	Зависит от удельного пылевыведения, относительной газообильности, уязвимости подготовительных выработок, учитывает склонность пластов к самовозгоранию и горным ударам, применение дегазации	



сывающей аналитикой. В нашем случае с системой обеспечения аэрологической безопасности в первую очередь – это технические решения, направленные на управление свойствами и состоянием угольных пластов (параметры предварительного увлажнения; заблаговременной, предварительной, пластовой дегазации; технические показатели систем противоаварийной защиты и т.д.), во вторую очередь – это мероприятия технико-технологического характера.

Таким образом, при оценке эффективности системы мониторинга аэрологических рисков необхо-

дим представительный объем статистических данных как по элементам вентиляционной системы (главные вентиляторы, газоотсасывающие установки, вентиляторы местного проветривания, вентиляционные двери и шлюзы, кроссинги, главные воздухоподающие и вентиляционные стволы, лавы, откаточные и вентиляционные штреки, газоотсасывающие трубопроводы, средства автоматики и др.), так и по горнотехническим условиям (производительность лавы, мощность пласта, крепость пород, способ охраны выработок, глубина разработки, система разработки и др.) (табл. 2).

Таблица 2

Факторы аэрологических рисков

Факторы аэрологических рисков	№ угольной шахты							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Категория шахты по газу	Сверх-категорная	Сверх-категорная	II категория	II категория	II категория	Сверх-категорная	Сверх-категорная	Сверх-категорная
Склонность пластов к горным ударам	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Склонность пластов к самовозгоранию	Нет	Нет	Да	Да	Да	Да	Да	Нет
Опасность по пыли	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Марки углей	Г	Г, ГЖ	Д, ДГ	Д	Д, ДГ	Д, ДГ	Д, ДГ	Г
Метаносность угольных пластов, м ³ /т	10–15	13–15 17–20	4–6 4–9		0–5	0–5 0–6	10–15	14–20
Глубина ведения горных работ, м	130–480	420–660	400	400	240–290	540	350–440	540
Депрессия шахты, даПа	292	820	290	220	295	265	306	320
Устойчивость проветривания шахты	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости
Схема проветривания шахты	Комбинированная	Фланговая	Комбинированная	Фланговая	Комбинированная	Комбинированная	Комбинированная	Комбинированная
Способ проветривания шахты	Нагнетательный	Комбинированный	Комбинированный	Комбинированный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Комбинированный
Степень устойчивости совместной работы вентиляторов главного проветривания	Малая степень уязвимости	Большая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Большая степень уязвимости	Большая степень уязвимости
Обеспеченность шахты воздухом	1,33	1,47	1,2	1,17	1,27	1,13	1,05	1,46
Внешние утечки воздуха (расчетные), %	13,14	13,45	14	14	10	10		12,9
Внешние утечки воздуха (фактические), %	16,69	8,43	11	9,8	5	6	5,77	12,9
Устойчивость проветривания крыла шахты	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости	II категория устойчивости
Схема проветривания крыла шахты	Центрально-сдвоенная	Фланговая	Центрально-сдвоенная	Фланговая	Центрально-сдвоенная	Центрально-сдвоенная	Центрально-сдвоенная	Центрально-сдвоенная
Способ проветривания крыла шахты	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный	Нагнетательный
Степень влияния вентиляционных сооружений на устойчивость проветривания	Малая степень уязвимости	Большая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости	Малая степень уязвимости
Нагрузка на очистной забой, т/сут	6300	13500	13300	10900	7500	13400	20900	6600
Абсолютная метанообильность шахты, м ³ /мин	109	239	28,34	32	17	16,6	181	108
Скорость подвигания очистного забоя, м/сут	7	7 9,5	9 9,5	5	7,2	5,2	8,3	5,73
Длина лавы, м	230	365 365	300 300	350	300	410	400	300
Длина выемочного столба, м	1960	2100 2550	2850 2800	2850	2500	2300	3000	2100
Наличие дегазации	Нет	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да	Да
Количество очистных забоев	1	2	2	1	1	1	1	1



Результаты исследований

В табл. 3 представлены результаты расчетов аэрологического риска всех трех рангов (I – для шахты в целом, II – для крыла шахты, III – для выемочных участков и подготовительных выработок). Для выемочных участков дополнительно рассчитаны риск загазирования участка в зависимости от схемы его вентиляции, риск загазирования участка при повторном использовании выработки, риск аварий на выемочных участках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов (в зависимости от марок углей), а также обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска (с учетом применения дегазации пластов). При расчетах принята максимальная глубина ведения горных работ. Необходимо отметить, что при установлении прогнозного значения риска учтена склонность пластов к самовозгоранию и горным ударам; для шахт № 2 и № 8 коэффициент эффективности дегазации составил 0,95 и 0,9 соответственно, для остальных шахт принят средний коэффициент эффективности дегазации 0,6.

Для подготовительных выработок рассчитаны риск аварий, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов, и прогнозный показатель аэрологи-

ческого риска с учетом применения мероприятий по дегазации пласта.

Из восьми анализируемых шахт 3 шахты относятся ко II категории метановой опасности и 5 – к сверхкатегорным. Анализ данных табл. 3 показывает, что наименьшее значение аэрологического риска I ранга составляет 0,0769, максимальное – 0,5698, что в 7,4 раза больше минимального значения риска. Минимальные значения риска относятся к шахтам II категории: шахты № 3, № 4, № 5, что соответствует малой степени риска (нормальному уровню безопасности: значение риска не более 0,15).

Для сверхкатегорных шахт наблюдается большой разброс в степенях риска, и расчеты показывают, что две шахты оцениваются умеренной степенью риска: шахты № 1 и № 6 (пониженный уровень безопасности: значение риска свыше 0,15, но не более 0,3); две шахты оцениваются большой степенью риска: шахты № 7 и № 8 (неудовлетворительный уровень безопасности: значение риска свыше 0,3, но не более 0,5) и на одной шахте (2) значение риска соответствует созданию чрезвычайной ситуации, приводящей к возникновению аварии (значение риска свыше 0,5).

Таблица 3

Результаты расчета аэрологических рисков

Значения аэрологических рисков	№ угольной шахты							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Аэрологический риск I ранга $R_{a\text{ш}}$	0,2074	0,5698	0,0974	0,0769	0,1159	0,2134	0,3831	0,3532
Аэрологический риск II ранга $R_{a\text{кш}}$	0,2457–0,6931	0,2125–0,6166	0,1373–0,3873	0,1135–0,3322	0,1373–0,3873	0,2457 0,6931	0,2457 0,6931	0,2457 0,6931
Аэрологический риск III ранга R_a	0,425	0,272; 0,272	0,3325; 0,3325	0,057	0,3325	0,595	0,595	0,255
Аэрологический риск аварий $R_{тув}$ на выемочных участках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов	0,5464–0,9255	0,5551–0,94; 0,5813–0,9846	0,3026–0,6548	0,2858–0,7317	0,2385–0,5297	0,2628–0,5547	0,5372–0,9256	0,5551–0,94
Обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска $Q_{пр}$	0,4675	0,2346; 0,2346	0,3358; 0,3358	0,0576	0,3857	0,6902	0,6009	0,2231
Риск загазирования участка $R_{заг.уч}$	0,189	0,065 0,065	0,189 0,189	0,097	0,189	0,189	0,189	0,097
Риск загазирования участка $R_{заг.уч}$ при повторном использовании выработки, сут ⁻¹	0,2403	0,1244 0,1244	0,2403 0,2403	0,155	0,2403	0,2403	0,2403	0,1244
Аэрологический риск аварий в подготовительных выработках R_a	0,17–0,85	0,17–0,85	0,095–0,475	0,095–0,475	0,095–0,475	0,17–0,85	0,17–0,85	0,17–0,85
Аэрологический риск аварий $R_{тул}$ в подготовительных выработках, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов	0,0696–0,9846	0,0696–0,9846	0,0454–0,8185	0,0454–0,9692	0,0432–0,7996	0,0476–0,8373	0,0675–0,9692	0,0696–0,9846
Прогнозный показатель аэрологического риска в подготовительных выработках $Q_{пр}$	0,187–0,935	0,1466–0,7331	0,096–0,4798	0,096–0,4798	0,1102–0,551	0,1972–0,986	0,1717–0,8585	0,1488–0,7438



Анализируя горно-геологические и горнотехнические факторы (табл. 2), можно сделать вывод, что на риски I ранга в меньшей степени влияют схема и способ проветривания шахты, обеспеченность шахты воздухом, внешние и внутренние утечки воздуха, а в большей степени – абсолютная метанообильность шахты и депрессия вентиляторов главного проветривания. Для шахты № 8 эти значения составили 239 м³/мин и 820 даПа. Количество вентиляционных сооружений для этой шахты было наибольшим по сравнению с остальными шахтами (190).

В расчетных значениях аэрологического риска II ранга указан диапазон его значений для наилучших условий (малой депрессии откаточного и вентиляционного штреков, устойчивости проветривания крыла шахты, малой степени влияния тепловой депрессии наклонных выработок, малых степеней влияния способа вентиляции на загазирование выработок при аварийной остановке вентилятора главного проветривания, вентиляционных сооружений на устойчивость проветривания) и наихудших, когда перечисленные ранее в скобках факторы имеют большую степень влияния на уязвимость схем, способов, вентиляционных сооружений крыльев шахты. Наименьшие значения аэрологического риска II ранга относятся к шахтам II категории и в 1,78 раз меньше как для лучших условий, так и для худших.

Наименьшее значение аэрологического риска III ранга составляет 0,057, максимальное – 0,595, что в 10,4 раза больше минимального значения риска. Минимальные значения риска относятся к шахте II категории (шахта № 4), что соответствует малой степени риска.

Две шахты оцениваются умеренной степенью риска: шахты № 2 и № 8; две шахты оценивают-

ся большой степенью риска: шахты № 1 и № 5. И на двух шахтах (№ 6 и № 7) значение риска соответствует созданию чрезвычайной ситуации, приводящей к возникновению аварии, так как проветривание выемочных участков на этих шахтах осуществляется по возвратноточной схеме проветривания с частичным разбавлением вредностей по источникам выделения. Схема проветривания шахт № 6 и № 7 осложняется наличием в ней диагонального соединения, в котором при определенных условиях может случиться опрокидывание струи воздуха.

Аэрологические риски аварий на выемочных участках, обусловленные содержанием тяжелых углеводородов в остаточных газах углей, возникают при отработке пластов марок Д, Г, ДГ, ГЖ, Ж, КЖ, К, КС, ОС с большой нагрузкой на очистной забой при высокой скорости подвигания очистного забоя. Наибольшее значение риска аварий, возникающих под влиянием тяжелых углеводородов, получено для шахты № 2, разрабатывающей пласт марки ГЖ [28].

Обобщенный показатель прогнозного значения аэрологического риска учитывает дополнительные виды опасностей, такие как склонность угольных пластов к горным ударам и самовозгоранию, а также мероприятия по управлению газовой выделением, такие как дегазация, использование газодренажных выработок, газоотсасывающих установок. В зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий значение обобщенного показателя риска может увеличиваться или уменьшаться. Для всех шахт значение этого показателя незначительно увеличилось, кроме шахт № 2 и № 8, разрабатывающих пласты, не склонные к самовозгоранию.

По данным табл. 3 построены гистограммы по пяти видам рисков для исследуемых шахт (рис. 1).

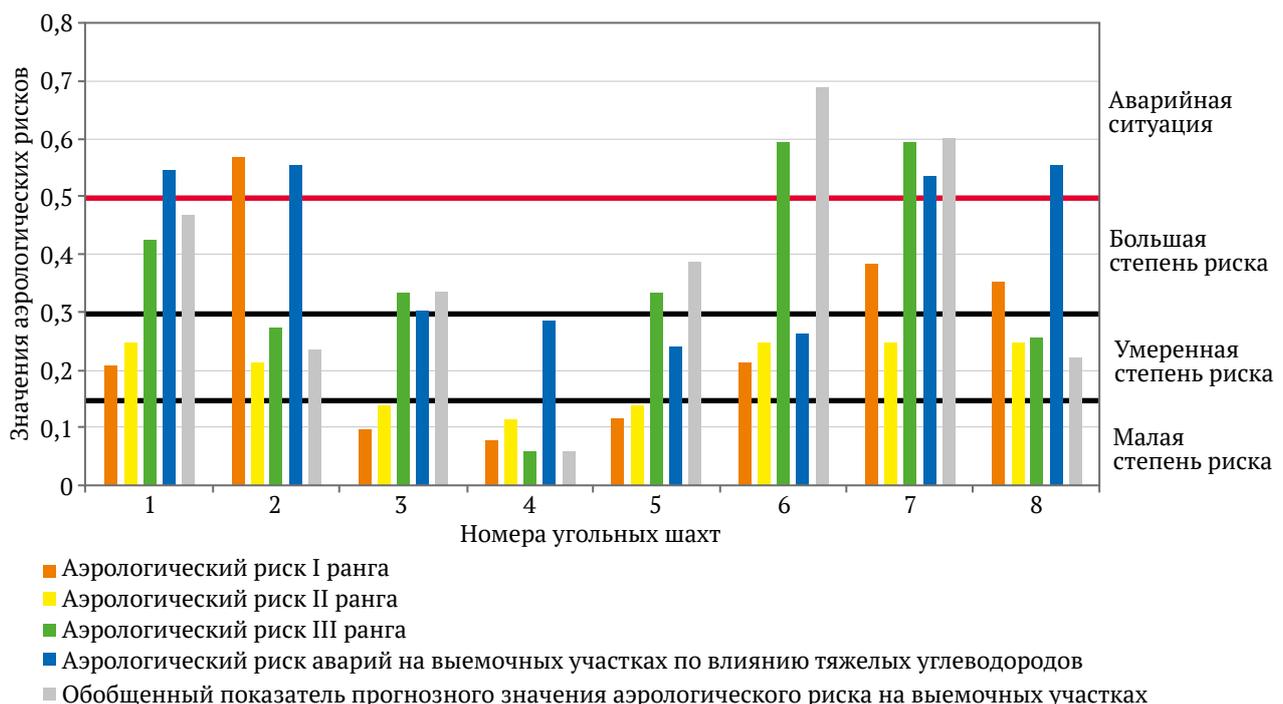


Рис. 1. Сравнительная оценка аэрологических рисков для угольных шахт



Из анализа данных следует, что аэрологические риски трех шахт (№ 3, № 4, № 5) характеризуются малыми значениями и находятся в диапазоне нормального уровня безопасности. Незначительно выходят из этого диапазона риски выемочных участков этих шахт, имеющих возвратноточные схемы проветривания с наличием в них диагональных соединений, но из-за небольшой абсолютной газообильности участков (от 17 до 28, 4 м³/т) эти риски большой опасности не представляют. В целом, для этих трех шахт характерна малая степень аэрологических рисков.

Оставшиеся пять шахт являются сверхкатегорными, и все пять попадают в зону больших рисков в первую очередь как шахты, разрабатывающие пласты, содержащие тяжелые углеводороды в остаточных газах углей, склонных к самовозгоранию и горным ударам. Эти риски накладываются на уязвимость схем вентиляции, не обеспечивающих полное разбавление вредностей по источникам их выделения (шахты № 6, № 7). Для шахты № 2 риски выемочных участков небольшие, но зато риски высшего ранга находятся в области аварийной работы шахты, что требует незамедлительных технических решений в отношении схемы вентиляции шахты. Самый низкий уровень аэрологических рисков (умеренная степень) всех рангов характерен для шахт № 8 и № 1, что соответствует пониженному уровню безопасности, требующему мониторинга горно-геологических и горнотехнических параметров, составляющих систему аэрологической безопасности шахт.

Заключение

Информационно-аналитическая система угольных шахт является основополагающей для оценки аэрологических рисков и архитектуры аэрологической безопасности. В информационную базу должны входить как проектные значения различных показателей подсистем угольных шахт, так и эксплуатационные значения таких показателей, отслеживаемых системой их мониторинга в реальном времени с использованием различных датчиков и устройств [29, 30]. Аналитическим инструментом обеспечения аэрологической безопасности может являться оценка аэрологических рисков по отдельным уровням функциональной структуры угольных шахт, а также по отдельным факторам риска, таким как риск загазирования участка, риск загазирования при повторном использовании выработок, риск влияния тяжелых углеводородов и др.

Завершающим этапом оценки аэрологических рисков является расчет их прогнозных значений с учетом применения технических и технологических мероприятий по устранению выявленных негативных факторов или снижению их воздействий, а также с учетом угрожающих факторов, таких как горные удары, самовозгорание угля и др. Ранжирование угольных шахт по уровням аэрологических рисков позволяет выявить шахты с низким уровнем аэрологической безопасности и для каждой шахты определить направления технических, технологических и организационно-технических мероприятий по повышению аэрологической безопасности.

Список литературы

1. Тарасенко И.А., Куликова А.А., Ковалева А.М. К вопросу оценки автоматизации контроля параметров метановоздушной смеси. *Уголь*. 2022;(11):84–88. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-84-88>
2. Martirosyan A.V., Ilyushin Yu.V. The development of the toxic and flammable gases concentration monitoring system for coalmines. *Energies*. 2022;15(23):8917. <https://doi.org/10.3390/en15238917>
3. Bosikov I.I., Martyushev N.V., Klyuev R.V. et al. Modeling and complex analysis of the topology parameters of ventilation networks when ensuring fire safety while developing coal and gas deposits. *Fire*. 2023;6(3):95. <https://doi.org/10.3390/fire6030095>
4. Скопинцева О.В. Профилактический ремонт горных выработок как метод предупреждения отказов системы управления газовыделением. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2–1):54–63. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-54-63>
5. Kobylkin S.S., Pugach A.S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):126–136. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-126-136>
6. Босиков И.И., Ключев Р.В., Хетагуров В.Н. Анализ и комплексная оценка газодинамических процессов на угольных шахтах с помощью методов теории вероятности и математической статистики. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(3):461–467. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467>
7. Rodionov V., Tumanov M., Skripnik I. et al. Analysis of the fractional composition of coal dust and its effect on the explosion hazard of the air in coal mines. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 981, Information Technologies, Automation Engineering and Digitization of Agriculture*. 2022;981(3):032024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/3/032024>
8. Кобылкин А.С. Исследования пылераспределения в очистном забое у комбайна. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(6–1):65–73. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-65-73>
9. Gao L., Kang X., Tang M. et al. Study on prediction of outburst risk of excavation face by initial gas emission. *Geofluids*. 2022;2022:4866805. <https://doi.org/10.1155/2022/4866805>
10. Корнев А.В., Спицын А.А., Коршунов Г.И., Баженова В.А. Обеспечение пылевзрывобезопасности подземных горных выработок в угольных шахтах: методы и современные тенденции. *Гор-*



ный информационно-аналитический бюллетень. 2023;(3):133–149. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_133

11. Kim M.L., Pevzner L.D., Temkin I.O. Development of automatic system for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) motion control for mine conditions. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):203–210. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-203-210>

12. Zhu Z., Wang H., Zhou J. Monitoring and control model for coal mine gas and coal dust. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020;56:504–515. <https://doi.org/10.1007/s10553-020-01161-3>

13. Tyuleneva T., Kabanov E., Moldazhanov M., Plotnikov E. Improving the professional risk management system for methane and coal dust explosions using a risk-based approach. In: *E3S Web of Conferences. The Second Interregional Conference “Sustainable Development of Eurasian Mining Regions (SDEMR-2021)”*. 2021;278:01027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127801027>

14. Li F., He X., Zhang Yu. et al. Superposition risk assessment of the working position of gas explosions in chinese coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;167:274–283. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.017>

15. Kazanin O., Sidorenko A., Drebenstedt C. Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021;26(1):60–69. <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i1.05>

16. Álvarez-Fernández M.-I., Prendes-Gero M.-B., Peñas-Espinosa J.-C., González-Nicieza C. Innovative techniques in underground mining for the prevention of gas dynamic phenomena. *Energies*. 2021;14(16):5205. <https://doi.org/10.3390/en14165205>

17. Куликова Е.Ю., Конюхов Д.С. Мониторинг риска аварий при освоении подземного пространства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(1):97–103. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_97

18. Mitra S., Kumar D., Chaulya S. K., Kumar Ch. Prediction of strata monitoring system in underground coal mines using IoT. *Journal of the Geological Society of India*. 2022;98:232–236. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-1963-8>

19. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas: A case study of Xutuan Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):875–882. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.007>

20. Feng X., Ai Z., Zhang X. et al. Numerical investigation of the evolution of gas and coal spontaneously burned composite disaster in the goaf of steeply inclined coal seam. *Sustainability*. 2023;15(12):9246. <https://doi.org/10.3390/su15129246>

21. Tang C., Gao E., Li Y. et al. Inspection robot and wall surface detection method for coal mine wind shaft. *Applied Sciences*. 2023;13(9):5662. <https://doi.org/10.3390/app13095662>

22. Niu L., Zhao J., Yang J. Risk assessment of unsafe acts in coal mine gas explosion accidents based on HFACS-GE and Bayesian networks. *Processes*. 2023;11(2):554. <https://doi.org/10.3390/pr11020554>

23. Wang G., Ren H., Zhao G. et al. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022;9:24. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00491-3>

24. Bukhtoyarov V.V., Tynchenko V.S., Nelyub V.A. et al. A study on a probabilistic method for designing artificial neural networks for the formation of intelligent technology assemblies with high variability. *Electronics*. 2023;12(1):215. <https://doi.org/10.3390/electronics12010215>

25. Shareef Sk.Kh., Kumar B.A., Suwarna G., Swathi M. Coal miners safety monitoring system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019;8(12):3202–3204. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3246.1081219>

26. Tripathi A.K., Aruna M., Prasad S. et al. New approach for monitoring the underground coal mines atmosphere using IoT technology. *Instrumentation Measure Métrologie*. 2023;22(1):29–34. <https://doi.org/10.18280/i2m.220104>

27. Diaz J., Agioutantis Z., Hristopulos D. T. et al. Forecasting of methane gas in underground coal mines: univariate versus multivariate time series modeling. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2023;37(12):2099–2115. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02382-8>

28. Ганова С.Д., Скопинцева О.В., Исаев О.Н. К вопросу исследования состава углеводородных газов угольных пластов и пыли с целью возможного прогнозирования их потенциальной опасности. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019;330(6):109–115. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/6/2132>

29. Yang J., Zhao J., Shao L. Risk assessment of coal mine gas explosion based on fault tree analysis and fuzzy polymorphic Bayesian network: a case study of Wangzhuang Coal Mine. *Processes*. 2023;11(9):2619. <https://doi.org/10.3390/pr11092619>

30. Srivalli Dr.G., Ujwala S.V., Sahithi G. et al. Study on coal mine safety monitoring and alerting system using IOT. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS)*. 2023;11(6):3781–3786. <https://doi.org/10.22214/ijras.2023.54194>



References

1. Tarasenko I.A., Kulikova A.A., Kovaleva A.M. On the issue of assessing the automation of control of the parameters of the methane-air mixture. *Ugol'*. 2022;(11):84–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-11-84-88>
2. Martirosyan A.V., Ilyushin Yu.V. The development of the toxic and flammable gases concentration monitoring system for coalmines. *Energies*. 2022;15(23):8917. <https://doi.org/10.3390/en15238917>
3. Bosikov I.I., Martyushev N.V., Klyuev R.V. et al. Modeling and complex analysis of the topology parameters of ventilation networks when ensuring fire safety while developing coal and gas deposits. *Fire*. 2023;6(3):95. <https://doi.org/10.3390/fire6030095>
4. Skopintseva O.V. Preventive repair of mining works as a method for preventing failures in the gas control system. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2–1):54–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-54-63>
5. Kobytkin S.S., Pugach A.S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):126–136. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-126-136>
6. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N. Analysis and comprehensive evaluation of gas-dynamic processes in coal mines using the methods of the theory of probability and math statistics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(3):461–467. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467>
7. Rodionov V., Tumanov M., Skripnik I. et al. Analysis of the fractional composition of coal dust and its effect on the explosion hazard of the air in coal mines. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 981, Information Technologies, Automation Engineering and Digitization of Agriculture*. 2022;981(3):032024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/3/032024>
8. Kobytkin A.S. Dust distribution at a coal shearer in the face area. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(6–1):65–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-65-73>
9. Gao L., Kang X., Tang M. et al. Study on prediction of outburst risk of excavation face by initial gas emission. *Geofluids*. 2022;2022:4866805. <https://doi.org/10.1155/2022/4866805>
10. Kornev A.V., Spitsyn A.A., Korshunov G.I., Bazhenova V.A. Preventing dust explosions in coal mines: Methods and current trends. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(3):133–149. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_3_0_133
11. Kim M.L., Pevzner L.D., Temkin I.O. Development of automatic system for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) motion control for mine conditions. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):203–210. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-203-210>
12. Zhu Z., Wang H., Zhou J. Monitoring and control model for coal mine gas and coal dust. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020;56:504–515. <https://doi.org/10.1007/s10553-020-01161-3>
13. Tyuleneva T., Kabanov E., Moldazhanov M., Plotnikov E. Improving the professional risk management system for methane and coal dust explosions using a risk-based approach. In: *E3S Web of Conferences. The Second Interregional Conference “Sustainable Development of Eurasian Mining Regions (SDEMR-2021)”*. 2021;278:01027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127801027>
14. Li F., He X., Zhang Yu. et al. Superposition risk assessment of the working position of gas explosions in chinese coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;167:274–283. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.017>
15. Kazanin O., Sidorenko A., Drebenstedt C. Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021;26(1):60–69. <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i1.05>
16. Álvarez-Fernández M.-I., Prendes-Gero M.-B., Peñas-Espinosa J.-C., González-Nicieza C. Innovative techniques in underground mining for the prevention of gas dynamic phenomena. *Energies*. 2021;14(16):5205. <https://doi.org/10.3390/en14165205>
17. Kulikova E. Yu., Konyukhov D.S. Accident risk monitoring in underground space development. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(1):97–103. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_97
18. Mitra S., Kumar D., Chaulya S. K., Kumar Ch. Prediction of strata monitoring system in underground coal mines using IoT. *Journal of the Geological Society of India*. 2022;98:232–236. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-1963-8>
19. Li Y., Su H., Ji H., Cheng W. Numerical simulation to determine the gas explosion risk in longwall goaf areas: A case study of Xutuan Colliery. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):875–882. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.007>
20. Feng X., Ai Z., Zhang X. et al. Numerical investigation of the evolution of gas and coal spontaneously burned composite disaster in the goaf of steeply inclined coal seam. *Sustainability*. 2023;15(12):9246. <https://doi.org/10.3390/su15129246>



21. Tang C., Gao E., Li Y. et al. Inspection robot and wall surface detection method for coal mine wind shaft. *Applied Sciences*. 2023;13(9):5662. <https://doi.org/10.3390/app13095662>
22. Niu L., Zhao J., Yang J. Risk assessment of unsafe acts in coal mine gas explosion accidents based on HFACS-GE and Bayesian networks. *Processes*. 2023;11(2):554. <https://doi.org/10.3390/pr11020554>
23. Wang G., Ren H., Zhao G. et al. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022;9:24. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00491-3>
24. Bukhtoyarov V.V., Tynchenko V.S., Nelyub V.A. et al. A study on a probabilistic method for designing artificial neural networks for the formation of intelligent technology assemblies with high variability. *Electronics*. 2023;12(1):215. <https://doi.org/10.3390/electronics12010215>
25. Shareef Sk.Kh., Kumar B.A., Suwarna G., Swathi M. Coal miners safety monitoring system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019;8(12):3202–3204. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3246.1081219>
26. Tripathi A.K., Aruna M., Prasad S. et al. New approach for monitoring the underground coal mines atmosphere using IoT technology. *Instrumentation Mesure Métrologie*. 2023;22(1):29–34. <https://doi.org/10.18280/i2m.220104>
27. Diaz J., Agioutantis Z., Hristopoulos D.T. et al. Forecasting of methane gas in underground coal mines: univariate versus multivariate time series modeling. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2023;37(12):2099–2115. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02382-8>
28. Ganova S.D., Skopintseva O.V., Isaev O.N. On the issue of studying the composition of hydrocarbon gases of coals and dust to predict their potential hazard. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(6):109–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/6/2132>
29. Yang J., Zhao J., Shao L. Risk assessment of coal mine gas explosion based on fault tree analysis and fuzzy polymorphic Bayesian network: a case study of Wangzhuang Coal Mine. *Processes*. 2023;11(9):2619. <https://doi.org/10.3390/pr11092619>
30. Srivalli Dr.G., Ujwala S.V., Sahithi G. et al. Study on coal mine safety monitoring and alerting system using IOT. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS)*. 2023;11(6):3781–3786. <https://doi.org/10.22214/ijras.2023.54194>

Информация об авторе

Сергей Владимирович Баловцев – кандидат технических наук, доцент, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-0961-6050](https://orcid.org/0000-0002-0961-6050), Scopus ID [56780405300](https://scopus.com/authorid/56780405300); e-mail balovcev@yandex.ru

Information about the author

Sergey V. Balovtsev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-0961-6050](https://orcid.org/0000-0002-0961-6050), Scopus ID [56780405300](https://scopus.com/authorid/56780405300); e-mail balovcev@yandex.ru

Поступила в редакцию	09.10.2023	Received	09.10.2023
Поступила после рецензирования	23.10.2023	Revised	23.10.2023
Принята к публикации	25.10.2023	Accepted	25.10.2023



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-67>

УДК 621.23.05

**Обоснование системы воздухораспределения погружного пневмоударника с экономичным рабочим циклом**

П. Н. Тамбовцев , Е. П. Русин

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН (ИГД СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация

tambovskiyp@mail.ru**Аннотация**

Одним из способов экономии энергии в горной промышленности и обеспечения необходимой величины давления сжатого воздуха в воздухопроводных сетях подземных добычных предприятий является уменьшение удельного расхода энергоносителя потребителями, в частности, погружными пневмоударниками. Цель настоящей работы – обоснование системы воздухораспределения пневмоударника, обеспечивающей снижение удельного расхода сжатого воздуха. Предложена система, включающая две камеры с постоянной подачей сжатого воздуха, две управляемые камеры, два упругих клапана на ударнике и клапан для отсечки подачи сжатого воздуха в камеру прямого хода, управляемые от положения ударника. На основе предложенной конфигурации разработаны два варианта конструкции пневмоударника. Рабочий цикл разработанного устройства исследован численно с привлечением программного обеспечения SimulationX и экспериментально на лабораторном стенде. Расчеты показали, что предложенная система воздухораспределения в версии с управляемым впуском в камеру обратного хода обеспечивает достижение поставленной цели. По сравнению с серийным пневмоударником M29T, при практически одинаковых с ним габаритах, ударной мощности, расходе сжатого воздуха на продувку забоя скважины, разработанный пневмоударник имеет удельный расход энергоносителя на 53 % меньше, а потребление электрической мощности на его питание сжатым воздухом в 2 раза ниже. Расчетные данные соответствуют опытным, полученным в эксперименте и из литературных источников, что подтверждает корректность результатов расчета.

Ключевые слова

энергопотребление, погружной пневмоударник, система воздухораспределения, удельный расход, ударная мощность, продувка забоя скважины, численное моделирование, показатели рабочего цикла, стендовые эксперименты

Для цитирования

Tambovtsev P.N., Rusin E.P. Justification of the air distribution system of a down-the-hole hammer with an efficient operating cycle. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):360–376. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-67>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research paper

Justification of the air distribution system of a down-the-hole hammer with an efficient operating cycle

P. N. Tambovtsev , E. P. Rusin

N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russian Federation

tambovskiyp@mail.ru**Abstract**

One method for conserving energy in the mining industry and ensuring the required pressure of compressed air in underground mining networks is to decrease the specific energy carrier consumption, particularly in the case of down-the-hole hammers. The objective of this study is to substantiate the air distribution system of an air hammer, aimed at reducing the specific consumption of compressed air. We propose a system consisting of two chambers with a constant supply of compressed air, two controllable chambers, two elastic valves on the hammer, and a valve for cutting off the supply of compressed air to the forward stroke chamber, which is controlled by the hammer's position. This proposed configuration was employed to create two different designs for the air hammer. The operational cycle of the designed device has been numerically examined using



SimulationX software and validated through experimental testing on a laboratory bench. Our calculations reveal that the suggested air distribution system, featuring controlled inlet to the backward stroke chamber, successfully achieves the stated objective. In comparison to the standard M29T hammer with nearly identical dimensions, striking power, and compressed air consumption for cleaning the borehole, the designed hammer exhibits a 53% reduction in specific energy consumption, and its electrical power usage for compressed air supply is halved. These design specifications align with both experimental results and data derived from the existing literature, confirming the accuracy of our calculation.

Keywords

energy consumption, down-the-hole hammer, air distribution system, specific consumption, percussion power, bottomhole purging, numerical simulation, operating cycle parameters, bench experiments

For citation

Tambovtsev P.N., Rusin E.P. Justification of the air distribution system of a down-the-hole hammer with an efficient operating cycle. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):360–376. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-67>

Введение

Горная промышленность входит в ряд основных потребителей энергоресурсов, поэтому большое значение приобретает экономия энергии, затрачиваемой в различных технологических операциях отрасли. При этом управление энергопотреблением должно быть ориентировано на снижение энергоёмкости [1]. Сказанное в полной мере относится и к одному из основных процессов горного производства – бурению, поэтому назрела необходимость повышения энергоэффективности пневмоударного бурения на отечественных рудниках [2–4].

Важно также, что на большинстве действующих в России подземных рудников и шахт не обеспечивается необходимая величина давления сжатого воздуха в воздухопроводной сети. Одной из причин этого является то, что потребление энергоносителя пневматическим горным оборудованием превышает технические возможности компрессорных станций. В результате давление в пневмосети опускается ниже 0,5 МПа, от чего страдает производительность технологических операций [5], в том числе буровых работ.

Одним из способов решения указанных выше проблем является уменьшение удельного расхода сжатого воздуха погружными пневмоударниками (ППУ). Применительно к ППУ удельным расходом называется количество сжатого воздуха, затрачиваемое на выработку единицы энергии удара. В табл. 1 приведены основные технические сведения отечественных ППУ. Наиболее известные машины, выпускаемые серийно, имеют клапанный или беззолотниковый тип воздухораспределения, их удельный расход составляет $(37,0–49,4) \times 10^{-6}$ м³/Дж. В некоторых образцах пневмоударников беззолотникового типа, например ПВ-170, удается несколько понизить удельный расход при сохранении высокой энергии удара, но при этом существенно падает частота ударов и ударная мощность в целом¹ [6]. Погружные пневмоударники с золотниковой системой воздухораспределения в промышленности не выпускаются. Пневмоударники, имеющие комбинированную воздухораспреде-

лительную систему: П105-1К; П105-2К², П-110-3,5; П110-ЭН³, были созданы в качестве опытных образцов в ИГД СО РАН и показали улучшенные технические характеристики [7, 8].

За рубежом ППУ выпускаются в Швеции (Atlas Copco⁴ [12], Sandvik⁵), США (Rockmore International⁶), Великобритании (Halco Rock Tools⁷), Китае (Change ENYU Engineering Equipment Co. Ltd⁸), Индии (SVE Drilling Tools Pvt. Ltd.⁹) и в других странах. Большинство зарубежных образцов выполнены по беззолотниковой схеме воздухораспределения, имеют удлиненные ударные элементы (поршень, долото) и работают на давлении (1,0–2,5 МПа). В табл. 2 представлены основные технические данные ППУ, выпускаемых за рубежом. Лидирующие позиции занимают пневмоударники Atlas Copco, Sandvik. Они превосходят российские аналоги по ударной мощности, однако работают на высоком (1,0–2,5 МПа) давлении, что неприемлемо в условиях большинства российских горных предприятий.

² Гаун В.А. Пневматический ударный механизм. Патент 998740 (А. с. СССР). Оpubл. в БИ. 1983. № 7.

³ Липин А.А., Белоусов А.В., Заболоцкая Н.Н. Погружной пневмоударник. 2252996 (Патент РФ). Оpubл. в БИ № 15, 2005.

⁴ Secoroc Rock Drilling Tools. Product catalogue – DTH equipment. Atlas Copco. URL: https://atlas-co.ru/files/pdf/core_drilling/9851%206545%2001_L.pdf; Atlas Copco Secoroc. Technical specifications DTH Hammers. URL: <https://disk.yandex.ru/i/DgE7PG25o11AXA/>

⁵ Sandvik RH560 3.5", 4", 5" and 6" DTH Hammers. URL: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/rock-tools/down-the-hole-drilling-tools/down-the-hole-hammers/rh560-down-the-hole-hammers/>

⁶ Погружные пневмоударники. RockMore International. URL: <https://www.rockmore-intl.com/download/61/dth-product-information-downloads/816/dth-hammers-catalog-section-4.pdf>

⁷ Halco Rock Tools. Hammers (Unite Kingdom, Halco Brighthouse Ltd). URL: <https://www.halco.uk/hammers/>

⁸ Changsha ENYU Engineering Equipments Co. Ltd (China). DTH hammer. URL: <http://www.enyudrill.com/pclass/?classa=1&classb=1>

⁹ SVE Drilling Tools Pvt. Ltd. DH 01 Hammers (India). URL: <http://www.svedrillingtools.in/dh01-hammers.php>

¹ Алексеев С.Е. Погружной пневматический ударный механизм. 2090730 (Патент РФ), опубл. в БИ № 26, 1997.



Цель, задачи и методы исследования

Целью работы является обоснование системы воздухораспределения пневмоударника, обеспечивающей снижение удельного расхода сжатого воздуха.

Задачи исследований:

- численное исследование динамики рабочих процессов типовых пневмоударных систем, сравнительный анализ их эффективности для ППУ легкого типа, выявление факторов, снижающих их эффективность;
- выбор системы воздухораспределения и конструктивной схемы, способной обеспечить устранение факторов, ухудшающих расходные характеристики ППУ;

- разработка конструкции пневмоударника с определением основных размеров;
- имитационное моделирование рабочего процесса нового ППУ, выбор наиболее приемлемого сочетания конструктивных параметров, обеспечивающих реализацию рабочего цикла со сниженным удельным расходом;
- оценка расхода сжатого воздуха необходимого для очистки забоя скважины;
- экспериментальная проверка достоверности результатов численного моделирования пневмоударников;
- обобщение и оценка результатов исследований.

Таблица 1

Технические характеристики отечественных пневмоударников

Показатели	Отечественные пневмоударники						
	M29T [9] / (П85-2)	M48 (П105ПМК) ¹ [9]	П155 (M32к) [10]	П105К [11]	П125 [11] / (П130-4м)	П105-1К [7]	П105-2к (M74y) ² [7]
Тип воздухораспределения	Клапанный			Беззолотниковый		Комбинированный	
Давление <i>p</i> , МПа	0,5 / 0,7	0,5	0,5	0,5	0,5 / 0,7	0,5	0,5
Энергия удара <i>A</i> , Дж	54 / 91	93	178	96	150 / 182	194	206
Частота ударов <i>f</i> , Гц	25 / 22	28,3	23	26,7	20,8 / 22	16,3	16,1
Общий расход воздуха <i>Q</i> , м ³ /мин	4,0 / 4,8	7,0	9,7	5,7	7,0 / 8,8	6,4	6,6
Ударная мощность <i>N</i> , кВт	1,35 / 2,0	2,63	4,1	2,56	3,12 / 4,0	3,17	3,32
Масса ударника <i>m</i> , кг	1,75 / –	2,80	5,5	3,0	5,6 / –	4,45	4,45
Масса машины <i>M</i> , кг	10 / 15	16,1	35,5	21,0	31,0 / 33,2	18,2	18,2
Удельная мощность, Вт/кг	135 / 134	160	120	120	101 / 120	174	182
Габариты (без долота): длина, мм диаметр, мм	549 / 622 70 / 80	(470) 92	459 140	615 92	(566) / 657 110 / 116	594 96	594 96
Диаметр долота, мм	85 / 85	105	155	105	125 / 130	105	105
Удельный расход воздуха <i>q</i> , м ³ /Дж* (×10 ⁻⁶)	49,4 / 40	45	39	37	37 / 37	34	33

* Удельный расход пневмоударника указан с учетом отбора сжатого воздуха на продувку скважины.

¹ Зиновьев А.А., Семенов Л.И. Бурильный молоток. Патент 112867 (А. с. СССР). 1958.

² Гаун В.А. Пневматический ударный механизм. Патент 998740 (А. с. СССР). Опубл. в БИ. 1983. № 7.

Таблица 2

Технические характеристики зарубежных пневмоударников

Показатели	Модель					
	США		Швеция			
	(Rockmore International)		Sandvik		Atlas Copco (Secoroc)	
	ROK 2LT	ROK-3	RH560 3,5"	RH560 g4"	COP-34	COP-44
Тип воздухораспределения	–		–		Беззолотниковый	
Давление <i>p</i> , МПа	0,6 / 1,04	0,6 / 2,4	1,0 / 1,8 / 2,4	1,0 / 1,8 / 2,4	1,05 / 2,5	1,05 / 2,5
Энергия удара <i>A</i> , Дж	–	–	–	–	154 / 317	296 / 514
Частота ударов <i>f</i> , Гц	–	–	–	–	26 / 41	23,7 / 35
Расход воздуха <i>Q</i> , м ³ /мин	2,0 / 3,8	3,1 / 14,5	4,5 / 8,3 / 11,1	6,7 / 12,5 / 16,9	4,8 / 15,0	5,46 / 16,9
Мощность <i>N</i> , кВт	–	–	–	–	4,0 / 13,0	7,0 / 18,0
Масса ударника <i>m</i> , кг	–	–	5,3	8,5	4,8	7,1
Диаметр ударника <i>d</i> , мм	–	–	–	–	–	78
Масса машины <i>M</i> , кг (без долота)	(13)	(22)	(29)	(48)	27	38
Удельная мощность, Вт/кг	–	–	–	–	148 / 481	184 / 474
Габариты: длина, мм (без долота) диаметр, мм (без долота)	(840) (62)	(750) (82)	1004 (914) 85	1140 (1016) 105	1025 (83,5)	1034 (98)
Диаметры долота, мм	70, 76	85, 105	85	105	105	110, 125
Удельный расход воздуха <i>q</i> , м ³ /Дж (×10 ⁻⁶)	–	–	–	–	20,0 / 19,2	13,0 / 15,6



Численное (имитационное) моделирование рабочего процесса пневмоударных систем ППУ проводилось с использованием компьютерной программы SimulationX¹⁰. В основу расчетного блока программы положена математическая модель [13, 14], описывающая динамику ударной системы и доказавшая свою адекватность и эффективность в исследованиях широкого ряда пневмоударных устройств [3]. Расчетная схема пневмоударной системы включает в себя: обобщенные схемы пневматических связей и механических связей. Схема пневматических связей отражает структуру пневматической части: число камер, каналы между ними, наличие подвижных элементов, взаимодействующих с камерами. Каналы между камерами характеризуются площадью проходного сечения. Управляемые каналы характеризуются графиком изменения проходной площади. Схема механических связей представляет характер силовых (упругая связь, трение и т.д.) и ударных взаимодействий между подвижными элементами. Ударные взаимодействия принимаются мгновенными и описываются на основе понятия о коэффициенте восстановления скорости. На основе заданных начальных условий программа вычисляет перемещения и скорости подвижных элементов, давление и температуру в камерах, мгновенный массовый расход сжатого воздуха. Результаты представляются в виде диаграмм рабочих циклов: давления в камерах, скорости и перемещения подвижных элементов, расхода сжатого воздуха в каналах. Особенности расчета описаны ниже.

Сравнительный анализ эффективности пневмоударных систем для ППУ легкого типа, имеющих одинаковые габариты и уровень ударной мощности, заключается в выявлении системы с наименьшим удельным расходом сжатого воздуха.

Физические эксперименты выполнены на лабораторном образце пневмоударника с привлечением измерительного оборудования, включающего лабораторный стенд и комплект регистрирующей аппаратуры, указанное оборудование и техника экспериментальных работ более подробно описаны в соответствующем разделе ниже.

Численное исследование динамики рабочего процесса типовых пневмоударных систем для ППУ легкого типа

Цель исследования – оценка эффективности типовых пневмоударных систем по удельному расходу энергоносителя и ударной мощности для ППУ с диаметром корпуса 70 мм, то есть относящихся к категории легких.

Исследование проведено для трех основных типов систем воздухораспределения, используемых в конструкциях пневматических машин ударного действия [9, 10]: клапанной (М29Т), беззолотниковой (П125), золотниковой (ПН-1300). В качестве базы для сравнения взят серийный клапанная ППУ легкого типа М29Т. Две другие системы – беззолотниковая

и золотниковая – представлены в виде пневмоударников с геометрическими и массогабаритными параметрами, приведенными к параметрам базового. Таким образом, для трех выбранных пневмоударных механизмов были заданы одни и те же значения основных параметров: L – длина пневмоударника, D – наружный диаметр корпуса (цилиндра), m_1 – масса ударника, S – эффективная площадь ударника, H_r – габаритный ход ударника, p_m – рабочее давление в магистрале. Значения остальных параметров – объемов рабочих камер, площадей воздухопроходных сечений, координат воздухораспределения – определялись путем варьирования с целью обеспечения подобия диаграмм рабочего цикла типовых пневмоударных механизмов ППУ диаграммам реальных машин. В дальнейшем изложении рабочие камеры именовались следующим образом: камера прямого хода – КПХ, камера обратного хода – КОХ.

Конструкции рассматриваемых моделей погружных пневмоударников с типовыми пневмоударными системами представлены на рис. 1, принцип действия и особенности их рабочих процессов изложены в работах [11, 13, 17]. Подвижные элементы систем изображены на конструктивных схемах (рис. 1, а, б, в) в положении начала отсчета координат (ударник в момент удара). Для этого положения определяются начальные объемы камер, координаты воздухораспределительных окон и ограничений перемещений подвижных элементов.

На рис. 2 представлены обобщенные расчетные схемы типовых систем. Каждой камере и подвижной массе присваивается порядковый номер (камера V_i , масса m_i). Площадь проходного сечения из камеры 1 в камеру 2 условно обозначается J_{12} , эффективная площадь подвижного элемента, например, ударника m_1 со стороны камеры V_2 , обозначается S_{21} . Характер изменения проходных сечений в зависимости от положений ударника 1, распределительных элементов (клапана, золотника) описан аналогично [14]. Пневматические сопротивления каналов учитываются значениями коэффициентов расхода ($k_p = 0,4...0,6$). В расчетную модель введены значения основных конструктивных параметров, начальных давлений в камерах, коэффициентов восстановления скорости. Рабочий процесс оценивался по виду диаграмм рабочего цикла и значениям выходных показателей – энергии и частоты ударов, расхода сжатого воздуха и их производных величин, рабочего хода ударника. Поиск рациональных настроек систем воздухораспределения осуществлялся по критерию удельного расхода сжатого воздуха путем варьирования рабочих объемов камер, площадей воздухопроходных сечений, координат взаимодействия подвижных элементов, масс клапанов.

Расчетные диаграммы типовых пневмоударных систем показаны на рис. 3 (давления, перемещения скорости подвижных элементов, мгновенный массовый расход). Диаграммы соответствуют представленным в табл. 3 значениям конструктивных параметров и начальным условиям расчета. Расчеты показывают, что ударнику сообщается скорость удара в допусти-

¹⁰ ESI Group. System Simulation Software. SimulationX. URL: <https://www.esi-group.com/products/system-simulation>

мых пределах – до 8,43 м/с, обеспечивается необходимый рабочий ход ударника (65–68 мм), достаточно высокая частота ударов (22,2–27,8 Гц). Расчетные выходные показатели типовых пневмоударных систем представлены в табл. 3.

В результате моделирования установлено, что все модели пневмоударников с типовыми системами воздухораспределения работают в стабильном режиме при двух значениях магистрального давления 0,5 / 0,6 МПа. При одинаковых массогабаритных характеристиках клапанная система (М29Т) обеспечивает ударную мощность 1,42 / 1,63 кВт, бесклапанная – 0,96 / 1,19 кВт, золотниковая – 1,13 / 1,48 кВт. При этом максимальную энергию удара обеспечивают клапанная (54,0 / 60,0 Дж) и золотниковая (51,2 / 60,2 Дж) системы, минимальная энергия удара – у бесклапанной системы – 36,4 / 42,8 Дж. По удельному расходу наиболее экономичными являются рабочие циклы пневмо-

ударников с золотниковым и бесклапанным типом воздухораспределения ($29,3 / 32,0 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$). Удельный расход серийного пневмоударника М29Т в 1,4 / 1,7 раза выше, чем у двух других типовых систем.

Проведем анализ рабочих циклов типовых пневмоударных механизмов, используя диаграммы (см. рис. 3) и расчетные выходные показатели (табл. 3).

Клапанный пневмоударник М29Т. При срабатывании перекидного клапана в определенные периоды магистраль соединяется через каналы с атмосферой и возникает прямая утечка сжатого воздуха. В КПХ в момент до начала выхлопа действует повышенное давление (0,37 МПа). Перед ударом в КОХ возникает импульс давления, что снижает энергию удара. Указанные факторы являются причиной высокого удельного расхода сжатого воздуха ($q = 44,7 / 50,6 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$).

Беззолотниковый пневмоударник по схеме П125 обеспечивает выпуск воздуха в рабочие камеры через

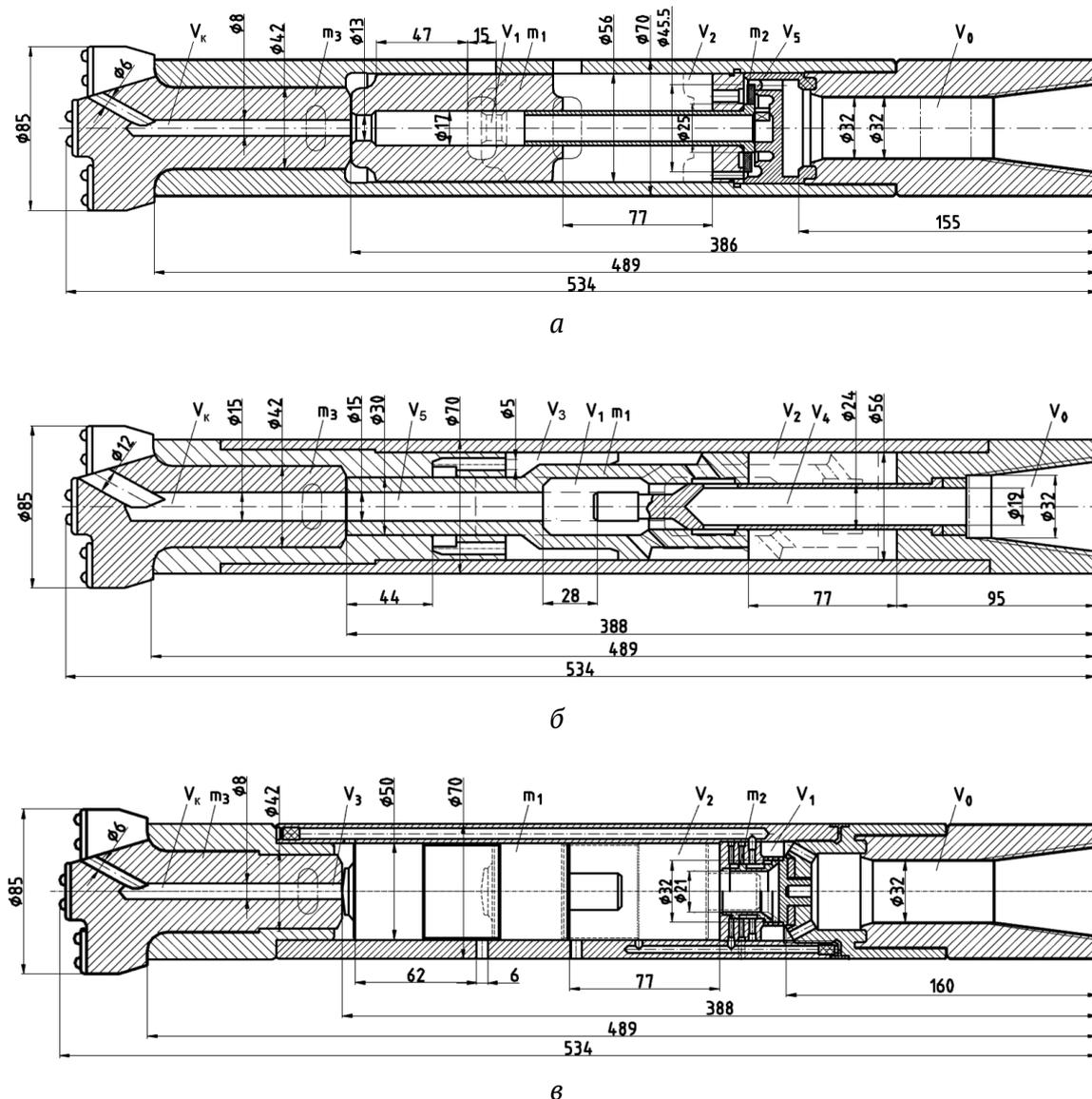


Рис. 1. Компоновка и основные конструктивные размеры пневмоударников с типовыми системами воздухораспределения:

а – клапанная (М29Т [9]), б – беззолотниковая (П125 [11]), в – золотниковая (ПН-1300 [11, 15])

управляемые каналы, открытие / закрытие каналов осуществляется ударником. Из диаграмм (см. рис. 3, б) следует, что ударная мощность устройства снижается, а потребление воздуха повышается вследствие: относительно высокого давления в КПХ в момент перед выхлопом (0,43 МПа); большого начального объема КОХ; значительного импульса давления в КОХ, снижающего кинетическую энергию ударника на прямом ходе. При этом ударная мощность пневмоударника составляет 0,96 / 1,19 кВт, энергия удара 36,4 / 42,8 Дж, удельный расход 32,0 / 31,1 × 10⁻⁶ м³/Дж.

Золотниковый пневмоударник по принципиальной схеме пневмоударной машины ПН-1300 обеспечивает подачу сжатого воздуха в рабочие камеры через каналы в корпусе, их открытие и закрытие осуществляется золотником, перемещение золотника зависит от давлений в рабочих камерах и предзолотниковой камере. Объем КОХ (0,0134 дм³) устройства наименьший (в беззолотниковом 0,0950 дм³, в клапанном 0,0162 дм³). Также наименьшими являются и макси-

мальное давление (0,23 МПа) в КОХ (в беззолотниковом 0,5 МПа, в клапанном 0,31 МПа) и давление перед выхлопом 0,16 МПа (в беззолотниковом 0,43 МПа, в клапанном 0,24 МПа). Это способствует снижению потребления сжатого воздуха золотниковым пневмоударником.

При прямом ходе ударника действует высокое среднее давление (0,52–0,53 МПа) в период до начала выхлопа из КПХ, при этом в КОХ импульс давления понижен (давление в КОХ в момент удара не выше 1,4 МПа). Несмотря на меньшую эффективную площадь ударника это обеспечивает более высокую энергию удара, но при этом высокое давление в КПХ в момент перед выхлопом (0,43 МПа) и большой объем КПХ приводят к потерям внутренней энергии сжатого воздуха. Для данного пневмоударного механизма из трех рассмотренных удельный расход самый низкий ($q = 31,7 / 29,3 \times 10^{-6}$ м³/Дж), вместе с тем вышеизложенное указывает на существенный резерв для его снижения.

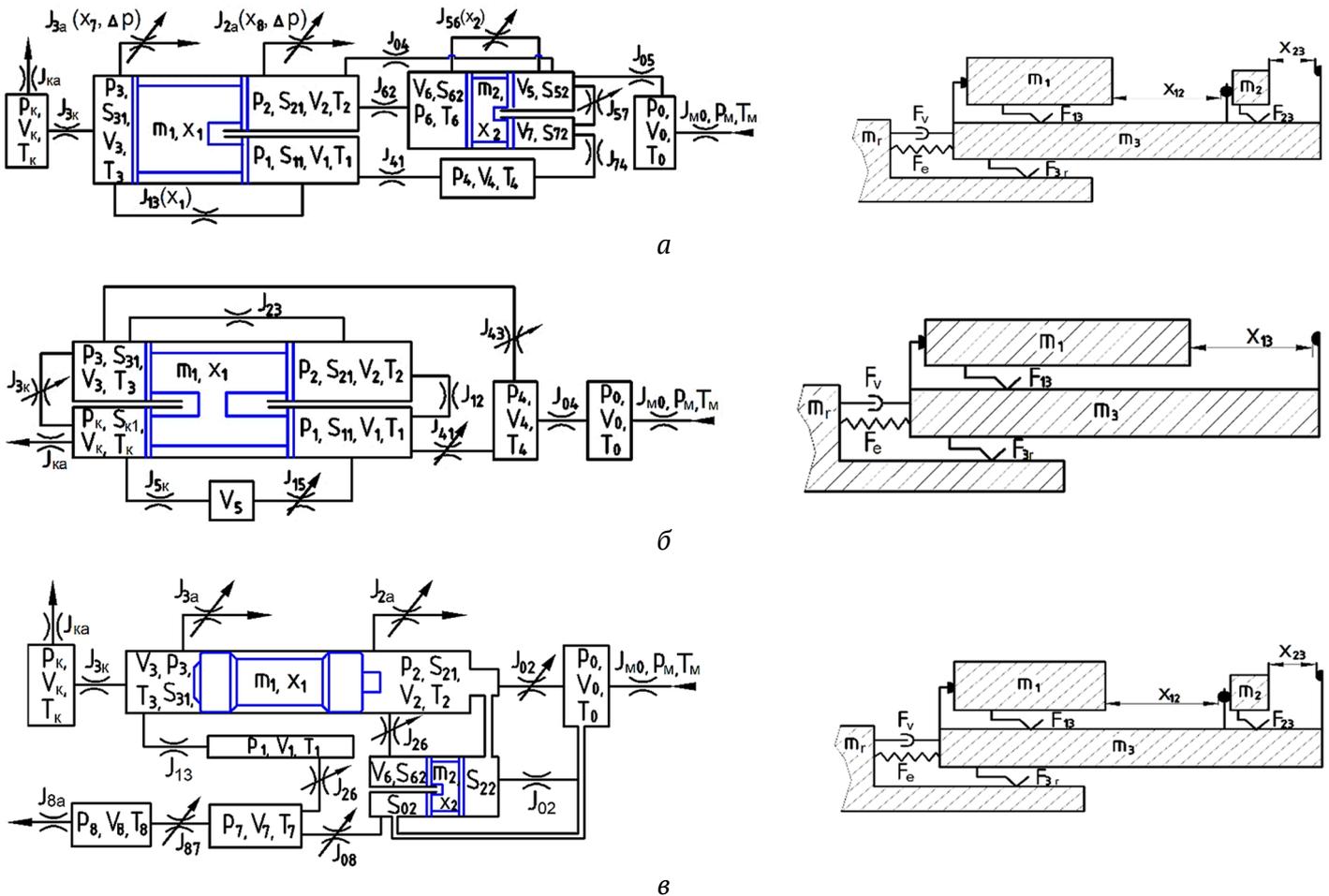


Рис. 2. Обобщенные расчетные схемы (пневматическая, механическая) типовых пневмоударных систем: а – клапанная (прототип М29Т); б – беззолотниковая (П125); в – золотниковая (ПН-1300):

V_i – объемы камер; J_{m0} – площадь воздухопроходного сечения магистрали; J_{ij}, J_{ia} – площади воздухопроходных сечений между i -й и j -й камерами, между i -й камерой и атмосферой; m_i, x_i – массы и координаты подвижных элементов (ударника, клапанов, m_r – породы); S_{ij} – эффективные площади элементов m_i со стороны j -й камеры; T_i, T_m – абсолютная температура сжатого воздуха в i -й камере и в магистрали; p_m, p_i, p_a – абсолютное давление сжатого воздуха в магистрали, i -й камере и в атмосфере; F_e, F_v – силы упруго-демпфирующей связи пневмоударника с горной породой; F_{13}, F_{3r}, F_{23} – силы трения: ударник – корпус, корпус – порода, клапан – корпус

Выбор систем воздухораспределения и конструктивных схем ППУ

Выявленные при численном моделировании основные преимущества и недостатки типовых пневмоударных механизмов, факторы, увеличивающие удельный расход, и пути его снижения сведены в табл. 4.

Анализ рабочих циклов типовых пневмоударных систем позволил установить ряд условий, выполнение которых должна обеспечивать эффективная пневмоударная система:

1. Исключение постоянной подачи сжатого воздуха в рабочие камеры, управляемые впуск в них и выхлоп из них сжатого воздуха.

2. Значение соотношения эффективных площадей ударника со стороны КПХ относительно площади поперечного сечения пневмоударника не менее 0,6.

3. Исключение или сведение к минимуму сопротивления перемещению ударника от давления воздуха со стороны соответствующих рабочих камер.

4. Отсечка подачи сжатого воздуха в рабочие камеры до выхлопа и обеспечение повышенной степени расширения сжатого воздуха.

5. Относительно небольшой начальный объем КОХ.
6. Конструктивная простота.

Из вышеизложенного следует, что снижение удельного расхода сжатого воздуха пневмоударником возможно за счет исключения сопротивлений прямому и обратному ходу ударника от сжатия воздуха в управляемых рабочих камерах, а также за счет более высокой степени его расширения. Одними из наиболее эффективных и конструктивно простых воздухораспределительных элементов, позволяющих реализовать эти требования, являются упругие клапаны¹¹ [7, 16], впервые предложенные в ИГД СО АН СССР В. А. Гауном. Применение упругих клапанов позволило при том же диаметре машины и расходе сжатого воздуха в 2 раза повысить энергию удара и на 30 % ударную мощность. Достоинства упругого клапана заключаются в простоте его встраивания в конструкцию машины и способности обеспечивать большое воздухопроходное сечение. Такой клапан

¹¹ Гаун В. А. Пневматический ударный механизм. Патент 998740 (А. с. СССР). Оpubл. в БИ. 1983. № 7.

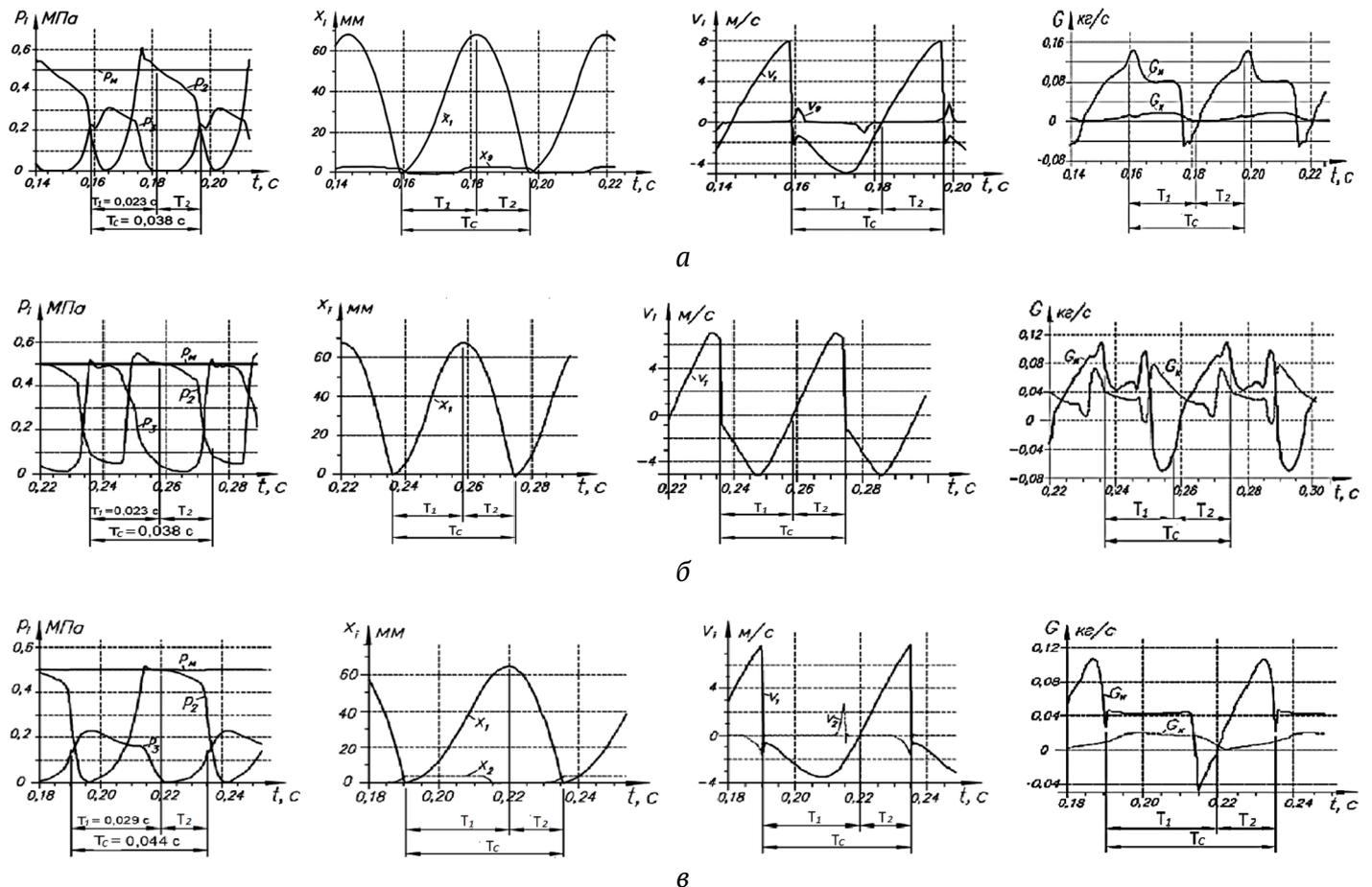


Рис. 3. Расчетные диаграммы рабочих циклов (изменения давления p_i сжатого воздуха во времени t в i -х камерах; перемещения ударника x_1 , клапана / золотника x_2 ; скорости ударника v_1 , клапана / золотника v_2 ; массового расхода G сжатого воздуха) моделей пневмоударников с типовыми системами воздухораспределения, магистральное избыточное давление 0,5 МПа: а – клапанная (М29Т), б – беззолотниковая (П125), в – золотниковая (ПН-1300): v_1, v_2 – скорость ударника, клапана / золотника соответственно, м/с; x_1, x_2 – перемещение ударника, клапана / золотника соответственно, м/с; G_M – расход через магистральный канал j_{M0} ; G_K – расход через канал $j_{ка}$ в коронке; t – время, с; T_c – период цикла; T_1, T_2 – периоды обратного и прямого хода



Таблица 3

Расчетные показатели типовых пневмоударных систем для ППУ легкого типа

Машина-прототип	M29T					
	M29T		П125		ПН-1300	
Схема пневмоударной системы	Клапанное		Беззолотниковое		Золотниковое	
Тип воздухораспределения	Клапанное		Беззолотниковое		Золотниковое	
Заданные параметры						
Давление избыточное p , МПа	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6
Диаметр коронки, мм	85		85		85	
Наружный диаметр корпуса (цилиндра), мм	70		70		70	
Общая длина пневмоударника с коронкой L , мм	534		534		534	
Внутренний диаметр цилиндра, мм	56		56		50	
Масса ударника m , кг	1,75		1,75		1,75	
Масса клапана m_2 (золотника m_2), кг	0,035		–		(0,036)	
Эффективная площадь ударника (КОХ/КПХ) S_{ij} , см ²	22,3 / 22,3		17,5 / 22,8		19,6 / 19,6	
Отношение эффективной площади ударника к площади поперечного сечения корпуса диаметром 70 мм	0,58		0,59		0,51	
Габаритный ход H_r , мм	77		77		77	
Коэффициент расхода k_p	0,5–0,6		0,5–0,6		0,5–0,6	
Коэффициент восстановления скорости k_b	0,10–0,15		0,10–0,15		0,10–0,15	
Ход до выхлопа из КОХ, мм	47		38		62	
Начальные объемы камер: V_1 , дм ³ ; V_2 , дм ³ ; V_3 , дм ³ ; V_4 , дм ³	0,0204; 0,1810; 0,0162; 0,0196		0,0280; 0,1600; 0,0950; 0,0410		0,0270; 0,1570; 0,0134; 0,0267	
Площадь магистрального канала J_{MO} , см ²	8,04		8,04		8,04	
Площадь зазора ударник / цилиндр, см ²	0,04		0,04		0,04	
Площадь канала в коронке $J_{ка}$, см ²	0,502		2,010		0,502	
Выходные показатели						
Скорость удара v , м/с	7,86	8,28	6,45	7,00	7,65	8,43
Рабочий ход H_p , мм	67	68	67	68	65	66
Энергия удара A , Дж	54,0	60,0	36,4	42,8	51,2	62,2
Частота ударов f , Гц	26,3	27,1	26,3	27,8	22,2	23,8
Период цикла T_c , с	0,038	0,037	0,038	0,036	0,044	0,042
Ударная мощность N , кВт	1,42	1,626	0,96	1,19	1,13	1,48
Общий расход воздуха Q , м ³ /мин	3,81	4,94	1,84	2,22	2,16	2,60
Расход воздуха через канал коронки $Q_{к}$, м ³ /мин	0,69	0,78	1,84	2,22	0,62	0,69
Удельный расход воздуха q , м ³ /Дж ($\times 10^{-6}$)	44,7	50,6	32,0	31,1	31,7	29,3

Таблица 4

Сравнительный анализ типовых пневмоударных механизмов

Система воздухораспределения	Удельный расход ($\times 10^{-6}$) м ³ /Дж	Преимущества	Недостатки	Основные факторы, повышающие удельный расход	Пути снижения удельного расхода и совершенствования конструкции
Клапанная (M29T)	44,7	Высокая удельная ударная мощность (Вт/кг), высокая частота ударов; простота конструкции	Высокий удельный расход	Неизбежные прямые перетечки сжатого воздуха из магистрали в атмосферу для срабатывания перекидного клапана	Отсечка подачи сжатого воздуха в рабочие камеры до начала выхлопа; повышение степени расширения сжатого воздуха в камерах
Беззолотниковая (П125)	32,0	Высокая частота ударов, простота конструкции	Высокий удельный расход, низкая энергия удара; конструктивная сложность, низкие долговечность и прочность ударника	Большой начальный объем КОХ, потери внутренней энергии при выхлопе, наличие сопротивлений движению ударника от сжатия воздуха в КОХ, сопротивление в КПХ	Исключение постоянной подачи сжатого воздуха в КПХ; повышение степени расширения сжатого воздуха в КОХ; исключение концентраторов напряжений в ударнике
Золотниковая (ПН-1300)	31,7	Высокая энергия удара, цельный ударник, надежность работы; отсутствие неуправляемых рабочих камер, снижение сопротивления ходу ударника	Высокий удельный расход; сложность изготовления корпуса (цилиндра с каналами)	Наличие сопротивлений движению ударника от сжатия воздуха в КПХ и КОХ, низкая степень расширения сжатого воздуха в рабочих камерах и потери внутренней энергии при выхлопе; малая рабочая площадь ударника	Исключение потерь внутренней энергии сжатого воздуха при выхлопе; упрощение конструкции корпуса, исключение сопротивления ходу ударника от сжатия воздуха в КОХ в конце прямого хода ударника

представляет собой кольцо из упругого материала – резины или пластика. Будучи размещенным в проточке ударника или корпуса пневмоударного механизма, кольцо перекрывает или открывает зазор, расположенный соответственно по внешнему или внутреннему диаметру кольца, в зависимости от давления в камерах, сообщающихся через этот зазор. Тем самым обеспечивается герметизация рабочей камеры или ее связь с атмосферой.

Для своевременного впуска и отсечки подачи сжатого воздуха в КПХ может быть использован кольцевой ступенчатый неупругий клапан, смещаемый ударником. Такой клапан обеспечивает практически мгновенное полное открытие сечения впуска в камеру непосредственно перед сменой направления движения ударника. Работоспособность и эффективность этого решения проверены и доказаны экспериментальными исследованиями [17].

Управление подачей сжатого воздуха в КОХ проще реализовать с использованием канала в ударнике, управляемого от его положения. Альтернативным и более простым вариантом является постоянный выпуск воздуха в КОХ через дроссельное отверстие в ударнике.

Типовые пневмоударные системы не обеспечивают реализацию предлагаемых путей снижения удельного расхода (см. табл. 4) в полном объеме, поэтому используем комбинированные схемы пневмоударников с применением упругих кольцевых клапанов (рис. 4). Из известных схем за основу взята схема двухклапанного пневмоударника П105-2К¹² [7] (рис. 4, а), который по сравнению с аналогами при том же расходе сжатого воздуха имеет увеличенную в два раза энергию удара. Особенность данной схемы состоит в том, что в период обратного хода упругие клапаны m_4 и m_5 обеспечивают связь КОХ с атмосферой, чем исключается сопротивление ходу ударника¹⁵.

На рис. 4, б, в представлены новые схемы, позволяющие реализовать предложенные пути снижения удельного расхода (см. табл. 4). В них, в отличие от схемы П105-2К (см. рис. 4, а), посредством использования двух упругих клапанов (m_4, m_5) на ударнике (m_1) обеспечивается исключение пневматического сопротивления движению ударника в периоды не только обратного, но и прямого хода.

¹² Гаун В. А. Пневматический ударный механизм. Патент 998740 (А. с. СССР). Оpubл. в БИ. 1983. № 7.

¹⁵ Там же.

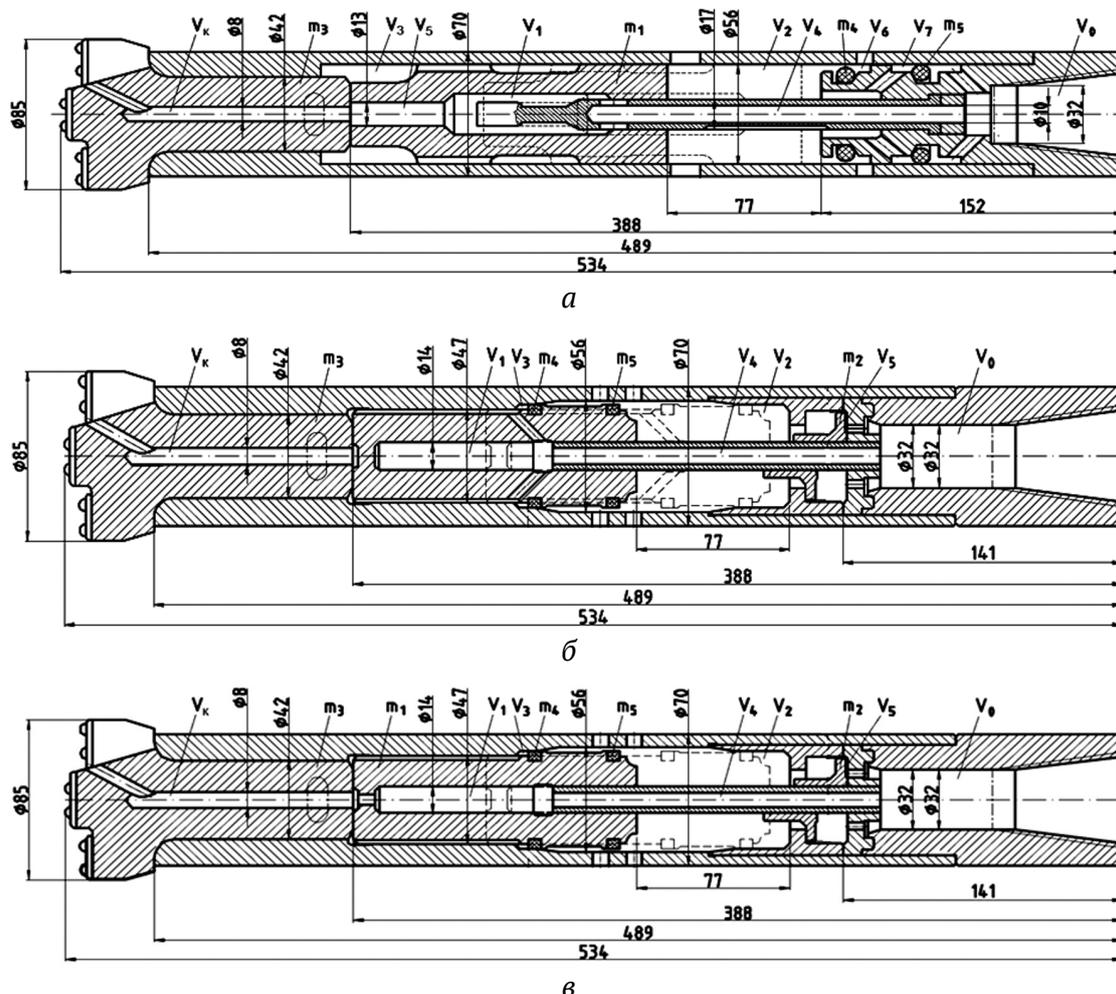


Рис. 4. Схемы и основные конструктивные размеры пневмоударников, обозначения элементов: а – пневмоударник по схеме П105-2К; б – пневмоударник К1 с управляемым впуском в КОХ (V_3); в – пневмоударник К2 с постоянным дросселируемым впуском в КОХ: V_i – объемы камер; m_i – массы подвижных элементов (ударника, клапанов)



Пневмоударник на рис. 4, б имеет воздухораспределительную систему К1 (клапанно-беззолотниковая) с управляемым каналом в ударнике, на рис. 4, в – систему К2 (клапанно-дроссельная) с дрессельным каналом в ударнике. Впуск воздуха в камеру V_2 из магистрали V_0 осуществляется в конце обратного хода ударника t_1 при срабатывании клапана t_2 от его смещения ударником. Выхлоп из камеры V_2 происходит в конце прямого хода через выхлопные окна в цилиндре. Впуск сжатого воздуха в камеру V_3 осуществляется через канал V_4 в патрубке, камеру V_1 , канал в ударнике, выхлоп происходит через боковые окна в цилиндре и канал V_k в коронке. Клапан t_4 герметизирует рабочую камеру V_3 при обратном ходе ударника, клапан t_5 – камеру V_2 при прямом ходе ударника. Клапан t_2 повышает надежность работы пневмоударного механизма, обеспечивая стабильный впуск воздуха в управляемую камеру V_2 прямого хода в конце обратного хода ударника и тем самым стабильную смену обратного хода на прямой.

Чтобы количественно оценить возможности пневмоударников с комбинированными системами воздухораспределения (см. рис. 4), было выполнено численное исследование их рабочих циклов. По аналогии с представленным выше исследованием типовых схем воздухораспределения конструктивные размеры всех трех пневмоударников были приведены к одному типоразмеру ППУ с наружным диаметром корпуса 70 мм.

Результаты имитационного моделирования рабочего цикла конструкций ППУ с комбинированными системами воздухораспределения

Численное исследование и поиск рациональных настроек параметров ППУ проводились по методике, описанной выше. Механическая схема кольцевого упругого клапана, встроенная в общую расчетную модель пневмоударной машины, подробно рассмотрена в работе [18]. В табл. 5 представлены начальные

Таблица 5

Расчетные показатели комбинированных пневмоударных систем для ППУ легкого типа

Машина-прототип	M29T					
	П105-2К		К1		К2	
Схема пневмоударной системы	Клапанно-беззолотниковый		Клапанно-беззолотниковый		Клапанно-дрессельный	
Тип воздухораспределения	Клапанно-беззолотниковый		Клапанно-беззолотниковый		Клапанно-дрессельный	
Заданные параметры						
Давление избыточное в магистрали p_m , МПа	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6
Диаметр коронки, мм	85		85		85	
Наружный диаметр корпуса (цилиндра), мм	70		70		70	
Внутренний диаметр корпуса (max / min), мм	56 / 56		56 / 47		56 / 47	
Общая длина пневмоударника с коронкой L , мм	534		534		534	
Масса ударника m_1 , кг	1,75		1,75		1,75	
Эффективная площадь ударника (КОХ/КПХ) S_{ij} , см ²	23,3 / 23,3		24,1 / 23,3		24,1 / 23,3	
Отношение эффективной площади (КПХ) ударника к площади поперечного сечения корпуса диаметром 70 мм	0,61		0,61		0,61	
Габаритный ход H_p , мм	77		77		77	
Коэффициент расхода k_p	0,5–0,6		0,5–0,6		0,5–0,6	
Коэффициент восстановления скорости k_v	0,10–0,15		0,10–0,15		0,10–0,15	
Ход до выхлопа из КОХ, мм	46		32		32	
Начальные объемы камер: V_1 , дм ³ ; V_2 , дм ³ ; V_3 , дм ³ ; V_4 , дм ³	0,0380; 0,1750; 0,1100; 0,0220		0,0146; 0,1620; 0,0230; 0,0080		0,0146; 0,1620; 0,0230; 0,0080	
Площадь магистрального канала J_{m0} , см ²	8,04		8,04		8,04	
Площадь дрессельного канала в ударнике J_{13} , см ²	–		–		0,25	
Площадь зазора ударник/цилиндр, см ²	0,04		0,04		0,04	
Площадь канала в коронке $J_{ка}$, см ²	0,502		0,502		0,502	
Выходные показатели						
Скорость удара v , м/с	8,26	9,03	7,58	8,16	7,40	8,06
Рабочий ход H_p , мм	67	66	69	69	69	69
Энергия удара A , Дж	59,7	70,9	50,3	58,3	47,9	56,8
Частота ударов f , Гц	25,64	27,77	23,8	25,6	22,7	24,4
Период цикла T_c , с	0,039	0,036	0,042	0,039	0,044	0,041
Ударная мощность N , кВт	1,530	1,968	1,196	1,494	1,087	1,386
Общий расход воздуха Q , м ³ /мин	3,14	3,72	1,35	1,47	2,51	3,08
Расход воздуха через канал коронки Q_k , м ³ /мин	0,52	0,53	0,24	0,28	0,37	0,42
Удельный расход воздуха q , м ³ /Дж, ($\times 10^{-6}$)	34,2	31,5	18,8	16,4	38,5	37,0

условия расчета, значения конструктивных параметров и выходные расчетные показатели пневмоударников. Диаграммы рабочего цикла показаны на рис. 5.

Результаты моделирования пневмоударников с упругими клапанами (схемы П105-2К, К1, К2) показали устойчивую работу устройств; используемые в системе клапаны выполняют свои функции. Предударный импульс давления, оказывающий сопротивление движению ударника, для всех систем воздухораспределения с упругими клапанами заметно меньше (рис. 5), чем для системы М29Т (см. рис. 3, а) с перекидным клапаном. Это снижает потери кинетической энергии ударника перед ударом и, соответственно, повышает КПД машин.

Преимуществом пневмоударника по схеме П105-2К являются повышенные энергия (59,7 Дж при $p_m = 0,5$ МПа) и частота (25,64 Гц) ударов. Пневмоударник имеет повышенное среднее давление в КПХ (0,46 МПа, рис. 5, а), давление перед выхлопом составляет 0,43 МПа, т.е. в КПХ наблюдается низкая степень расширения сжатого воздуха и существен-

ные потери его энергии при выхлопе. В связи с этим пневмоударник имеет повышенный расход (удельный расход $34,2 \times 10^{-6}$ м³/Дж, абсолютный расход 3,14 м³/мин, табл. 3).

Из диаграмм для схемы К1 (рис. 5, б) следует, что рабочий процесс протекает в режиме, близком к оптимальному, т.е. ударнику сообщается заданная кинетическая энергия (энергия удара 50,3 Дж, скорость удара 7,58 м/с), частота ударов составляет 23,8 Гц, обеспечиваются необходимый рабочий ход ударника (69 мм), снижение сопротивления движению ударника от сжатия воздуха и более высокая степень его расширения.

Снижение ударной мощности на 21,8 % в сравнении со схемой П105-2К обусловлено уменьшением среднего давления в КПХ в период рабочего хода, при этом пневмоударник схемы К1 имеет удельный расход ($18,8 \times 10^{-6}$ м³/Дж) на 45 % ниже. При сравнении с выходными показателями пневмоударника М29Т модель пневмоударника схемы К1 имеет ударную мощность меньше на 8 % за счет снижения частоты ударов (23,8 Гц), при этом удельный расход К1 на 65 % ниже.

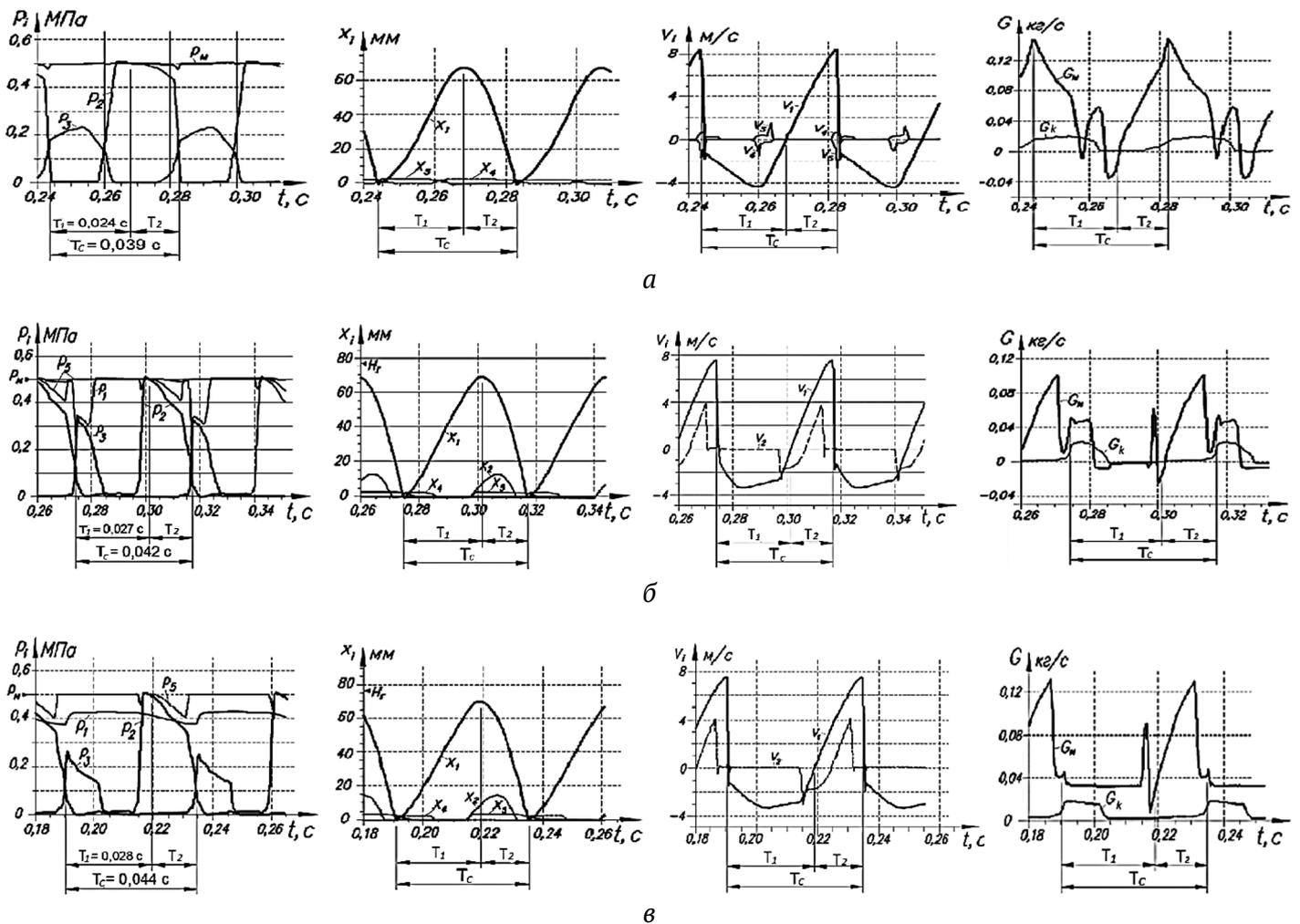


Рис. 5. Расчетные диаграммы рабочих циклов моделей пневмоударников с комбинированными системами воздухораспределения (изменения давления p_i сжатого воздуха во времени t в i -х камерах; перемещения ударника x_1 и упругих клапанов x_4, x_5 ; скорости ударника v_1 и клапанов v_4, v_5 ; мгновенного массового расхода G : G_m – расход через магистральный канал $j_{м0}$, G_k – расход через канал $j_{ка}$ в коронке), магистральное избыточное давление 0,5 МПа:
 а – пневмоударник по схеме П105-2К; б – по схеме К1; в – по схеме К2: t – время, с; T_c – период цикла; T_1, T_2 – периоды обратного и прямого хода

Таким образом, моделированием установлена работоспособность и наименьший среди рассмотренных устройств удельный расход воздуха ППУ по схеме К1 (см. табл. 5).

Результаты моделирования пневмоударника по схеме К2 (рис. 5, в) показали, что модель пневмоударника работоспособна при площади поперечного сечения дроссельного канала $J_{13} \approx 0,25 \text{ см}^2$, при меньшей площади ($J_{13} \leq 0,15 \text{ см}^2$) необходимая величина обратного хода ударника не обеспечивается. Значения характеристик рабочего цикла приведены в табл. 5. В сравнении со схемой К1 заметно отличаются только диаграммы мгновенного расхода (см. рис. 5, б, в). Общий абсолютный и удельный расход у пневмоударника по схеме К2 выше, чем у устройства по схеме К1 (см. табл. 5). Таким образом, при одинаковой ударной мощности управляемость канала J_{13} в ударнике по схеме К1 обеспечивает снижение расхода воздуха в 2,04 раза по сравнению с пневмоударником схемы К2. Поэтому более целесообразна разработка пневмоударников по схеме К1.

На практике ударную систему К1 лучше использовать при магистральном давлении $p_m = 0,6 \text{ МПа}$, т.к. в этом случае ее ударная мощность превышает на 14,9 % расчетную ударную мощность пневмоударника М29Т, а при $p_m = 0,5 \text{ МПа}$ ударная мощность К1 ниже на 8 %.

Диаграммы рабочего цикла модели К1 при $p_m = 0,6 \text{ МПа}$ представлены на рис. 6. На рис. 6, а показаны характерные участки диаграмм давления $p_i(t)$ в камерах прямого и обратного хода: 1–2 – участок

вытеснения воздуха из КПХ ударником при его обратном ходе, 2–3 – период впуска сжатого воздуха в КПХ, 3–4 – работа воздуха в КПХ на расширение до начала выхлопа (т. 4), 5–6 – период впуска сжатого воздуха в КОХ, 6–7 – работа воздуха в КОХ на расширение до начала выхлопа (т. 7).

Оценка минимального расхода сжатого воздуха, необходимого для очистки забоя скважины

Определим необходимый для выноса шлама расход сжатого воздуха, $\text{м}^3/\text{мин}$, подаваемый на забой скважины через канал коронки [21]:

$$Q_k = \frac{0,785 \gamma_{\text{п}} d^2 v_6}{\gamma_{\text{в}} \mu}, \quad (1)$$

где $\gamma_{\text{п}}$ – плотность буримой породы, $\text{кг}/\text{м}^3$; d – диаметр скважины (коронки), м; v_6 – механическая скорость бурения, м/мин; $\gamma_{\text{в}}$ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$ ($1,2041 \text{ кг}/\text{м}^3$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$); μ – весовая концентрация смеси продуктов разрушения и воздуха ($\mu = 6$ [19]).

Механическую скорость бурения, м/мин, можно определить по формуле [10]:

$$v_6 = \frac{80 A n}{d^2 f} \cdot \frac{60}{10^6 \cdot 10^3} = 4,8 \cdot 10^{-6} \frac{A n}{d^2 f}, \quad (2)$$

где A – энергия удара, Дж; n – частота ударов, Гц; f – коэффициент крепости породы; d – диаметр скважины (коронки), м; $4,8 \cdot 10^{-6}$ – размерный коэффициент.

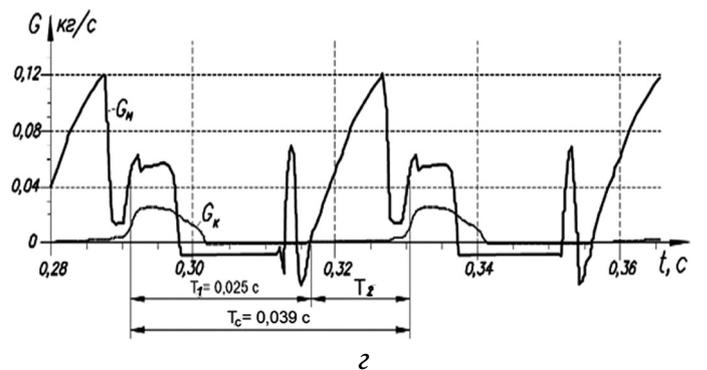
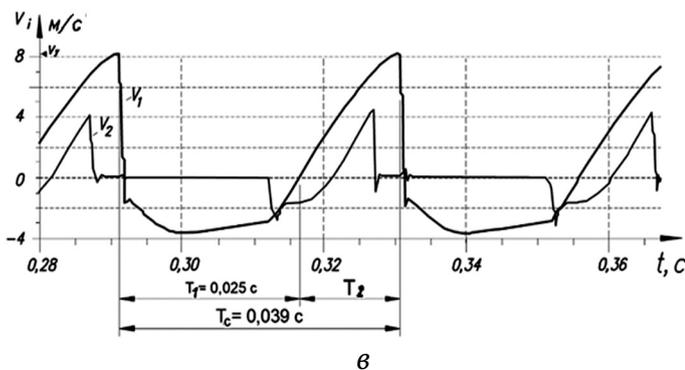
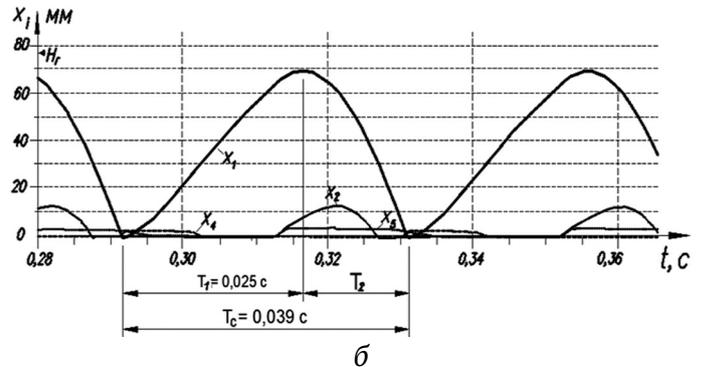
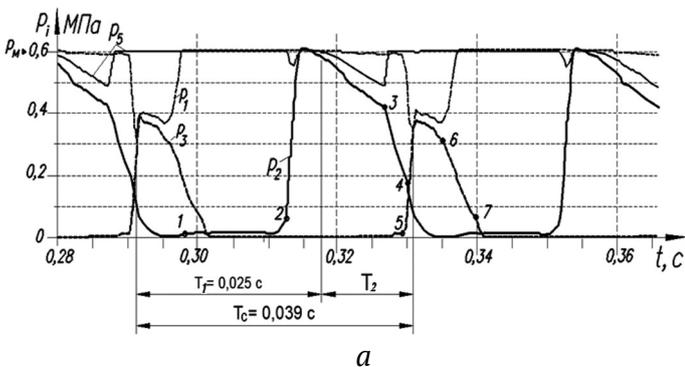


Рис. 6. Расчетные диаграммы рабочих циклов модели пневмоударника К1 при магистральном давлении 0,6 МПа: а – изменения давления сжатого воздуха во времени $p_i(t)$ в i -х камерах (т. 1–7 характерные участки диаграммы); б – перемещения ударника $x_1(t)$ и клапанов $x_2(t)$, $x_4(t)$, $x_5(t)$; в – изменения скорости ударника $v_1(t)$ и клапана $v_2(t)$; з – мгновенный массовый расход сжатого воздуха $G(t)$: t – время, с; T_c – период цикла; T_1 , T_2 – периоды обратного и прямого хода; G_m – расход через магистральный канал $j_{\text{м0}}$; G_k – расход через канал $j_{\text{ка}}$ в коронке



При подстановке (2) в (1) получим, м³/мин:

$$Q_k = 3,768 \cdot 10^{-6} \frac{\gamma_n An}{\gamma_b \mu f}. \quad (3)$$

Из (3) получим коэффициент расхода сжатого воздуха, м³/мин/Вт, необходимого для продувки забоя:

$$\psi_k = \frac{Q_k}{An} = 3,768 \cdot 10^{-6} \frac{\gamma_n}{\gamma_b \mu f}. \quad (4)$$

Значения коэффициента ψ_k , рассчитанные по формуле (4), составляют: для базальта ($f = 20, \gamma_n = 2600 \text{ кг/м}^3$) $\psi_k = 63 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{мин}/\text{Вт}$; для гранита, мрамора ($f = 10, \gamma_n = 2600 \text{ кг/м}^3$) $\psi_k = 125 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{мин}/\text{Вт}$; железной руды ($f = 6, \gamma_n = 3440 \text{ кг/м}^3$) $\psi_k = 276 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{мин}/\text{Вт}$.

Пневмоударник (К1) с ударной мощностью 1,494 кВт при бурении породы средней крепости ($f = 6, \gamma_n = 3440 \text{ кг/м}^3$) должен обеспечить минимальный расход через канал в коронке $Q_k = 0,41 \text{ м}^3/\text{мин}$, в более крепких породах ($f = 10, \gamma_n = 2600 \text{ кг/м}^3$) минимальный расход $Q_k = 0,19 \text{ м}^3/\text{мин}$ и при $f = 20, \gamma_n = 2600 \text{ кг/м}^3$ минимальный расход через канал коронки составляет $Q_k = 0,09 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Результаты расчета показывают, что пневмоударник К1 при $p_m = 0,6 \text{ МПа}$ и коэффициенте крепости пород $f = 10\text{--}20$ обеспечивает расход сжатого воздуха через канал коронки $Q_k = 0,28 \text{ м}^3/\text{мин}$, достаточный для очистки забоя скважины. Для пород с $f = 6$ отбор сжатого воздуха на продувку скважины через канал коронки должен быть увеличен на $0,13 \text{ м}^3/\text{мин}$. Для надежной продувки забоя целесообразно в пневмоударнике К1 предусмотреть расход через коронку $Q_k = 0,69 \text{ м}^3/\text{мин}$ по аналогии с серийной машиной М29Т. В этом случае общий расход Q для К1 составит $1,88 \text{ м}^3/\text{мин}$, а общий удельный расход $q = 21,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$, что на 51 и 57 % соответственно ниже, чем у воздухораспределительной системы М29Т.

Оценка энергоэффективности применения нового пневмоударника

Для сравнительной оценки энергоэффективности применения серийного М29Т и нового К1 пневмоударников определим необходимую электрическую мощность, потребляемую компрессором при их использовании:

$$N_c = nQ, \quad (5)$$

где n – удельная мощность компрессора, кВт/(м³/мин); Q – расход сжатого воздуха пневмоударника, м³/мин.

Учитывая, что среднее значение $n \approx 5,48 \text{ кВт}/(\text{м}^3/\text{мин})^{14}$, из (5) получим следующие значения необходимой электрической мощности:

- для пневмоударника М29Т: $N_c = 20,9 \text{ кВт}$;
- для пневмоударника К1: $N_c = 10,3 \text{ кВт}$.

Таким образом, при работе нового пневмоударника К1 расходуется электроэнергия в 2,03 раза меньше, чем при работе серийного М29Т.

Экспериментальные исследования пневмоударного механизма. Оценка адекватности расчетных моделей

Цель экспериментов – получение опытных данных для оценки адекватности расчетных моделей путем сравнения показателей рабочего цикла пневмоударного механизма, полученных физическим и численным моделированием. Задачи экспериментов – запись диаграмм давлений в камерах устройства и измерение расхода сжатого воздуха. Экспериментальные исследования проведены на лабораторном стенде, схема и внешний вид которого показаны на рис. 7, а, б. В качестве объекта исследований был взят имеющийся в наличии экспериментальный образец пневмоударного механизма модели ПМ-К2, выполненный по схеме К2 (см. рис. 4, в).

Ударное устройство устанавливалось между работопоглотителем и силовым подающим механизмом, уравновешивающим отдачу корпуса пневмоударного механизма при его работе. Для регистрации давления в камерах и в магистрали применяли пьезодатчики, перед каждой серией опытов выполняли их тарировку. Давление контролировали манометром, мгновенный расход G сжатого воздуха в течение циклов регистрировался датчиком расхода, по его показаниям установлено среднее значение расхода устройства.

При обработке результатов эксперимента энергия удара $A, \text{ Дж}$, определялась по методике [20]. Удельный расход сжатого воздуха $q, \text{ м}^3/\text{Дж}$, рассчитывался по формуле

$$q = \frac{Q}{60fA}, \quad (6)$$

где Q – расход сжатого воздуха, м³/мин; f – частота ударов, Гц; A – энергия удара, Дж.

Эксперименты показали стабильную работу лабораторного образца ПМ-К2, экспериментальные диаграммы давлений представлены на рис. 7, в. Эксперимент. Установлены следующие параметры рабочего цикла: энергия удара – 630 Дж, частота ударов – 8,6 Гц, расход воздуха – 7,57 м³/мин, ударная мощность $N = 5418 \text{ Вт}$, удельный расход $23,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Дж}$.

При одинаковых условиях с экспериментом рабочий цикл ПМ-К2 исследовался и на имитационной модели. Сравнение экспериментальных (см. рис. 7, в, Эксперимент) и компьютерных (рис. 7, в, Расчет) диаграмм показывает, что они идентичны, имеют общий характер, одинаково качественно и количественно описывают рабочий процесс устройства. Диаграммы давлений p_2, p_3 (см. рис. 7, в) показывают достаточную степень расширения воздуха в рабочих камерах: давления перед выхлопом в эксперименте $p_2 = 0,35\text{--}0,41 \text{ МПа}$, $p_3 = 0,2 \text{ МПа}$, в расчете $p_2 = 0,25\text{--}0,30 \text{ МПа}$, $p_3 = 0,15 \text{ МПа}$. Характер кривых давления p_0, p_5 указывает на то, что клапан отсечки срабатывает до выхлопа, исключая перетечку воздуха из магистрали в атмосферу.

Для подтверждения адекватности расчетных моделей также использовались взятые из публикаций [10, 11] опытные данные пневмоударника М29Т. Технические параметры пневмоударных механизмов М29Т и ПМ-К2 сведены в табл. 6.

¹⁴ Винтовые компрессоры Atlas Copco серии GA/GA+ (160–315 кВт). URL: https://aerocompressors.ru/katalog_produkcii/kompressori/vintovye_elektricheskie_kompressory/kompressory_atlas_copco/kompressor_atlas_copco_ga_160-315_kvт/

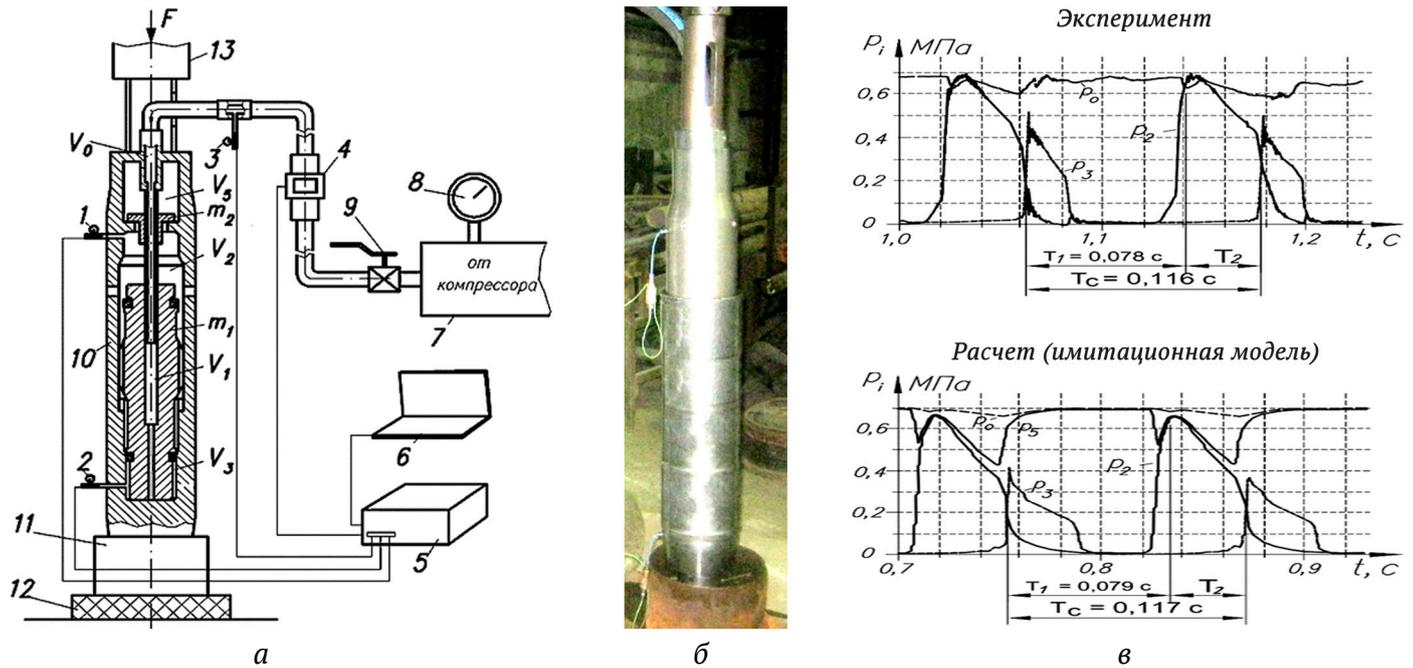


Рис. 7. Измерение давления в рабочих камерах пневмоударного механизма ПМ-К2 с двумя упругими клапанами на ударнике и клапаном отсечки подачи сжатого воздуха в управляемую КПХ: *а* – схема установки датчиков давления, расхода и измерительной аппаратуры; *б* – внешний вид лабораторного образца с установкой датчиков давления, *в* – диаграммы давления (Эксперимент, Расчет) в камерах лабораторного образца при давлении в магистрали 0,7 МПа: 1, 2 – датчики давления (пьезодатчик фирмы Kistler instrumente AG типа 701A) в камере рабочего и обратного хода; 3 – датчик давления в магистрали; 4 – расходомер (Digital flow switch PF2A706H); 5 – АЦП (аналого-цифровой преобразователь); 6 – ПК (персональный компьютер); 7 – ресивер; 8 – манометр; 9 – магистральный кран; 10 – ударный узел; 11 – адаптер; 12 – работопоглотитель; 13 – подающий силовой механизм; *F* – усилие подачи; *V_i* – рабочие камеры; *m_i* – подвижные элементы (ударник, клапан отсечки); *p₂* – давление в управляемой КПХ; *p₃* – давление в КОХ; *p₀* – давление в магистральной КПХ; *p₅* – давление в камере *V₅*

Таблица 6

Сравнение экспериментальных и расчетных технических показателей пневмоударных машин

Показатель	М29Т				ПМ-К2		
	Расч.	Эксп.		Откл. (от данных [11]) %	Расч.	Эксп.	Откл. %
		[11]	[10]				
Магистральное давление (изб) p_m , МПа	0,5	0,5	0,5	–	0,7	0,7	–
Масса ударника m_1 , кг	1,75	1,75	1,60	–	34,5	34,5	–
Канал коронки $J_{ка}$, см ²		0,502		–	0	–	–
Площадь канала J_{13} , см ²	–	–	–	–	–	0,453	–
Период цикла T_c , с	0,038	0,040	0,035	–5,0	0,117	0,116	+0,9
Период обратного хода T_1 , с	0,023	–	–	–	0,079	–	–
Период прямого хода T_2 , с	0,015	–	–	–	0,039	–	–
Рабочий ход ударника H_p , мм	67	–	–	–	134	–	–
Скорость удара v , м/с	7,86	7,86	7,83	0,0	6,02	6,05	–0,5
Энергия удара A , Дж	54,0	54,0	49,0	0,0	625	630	–0,8
Частота ударов n , Гц	26,3	25,0	28,3	+5,2	8,55	8,6	–0,6
Ударная мощность N , кВт	1,42	1,35	1,39	+5,2	5,34	5,42	–1,4
Расход через коронку $Q_{к}$, м ³ /мин	0,69	–	–	–	0	0	–
Общий расход Q , м ³ /мин	3,81	4,00	4,50	–4,8	7,85	7,57	+3,7
Удельный расход q , м ³ /Дж ($\times 10^{-6}$)	44,7	44,4	53,9	+0,7	24,5	23,3	–7,5



Из представленных в табл. 6 данных видно, что отклонения величин расчетных показателей от опытных не превышают 6 % по частоте ударов и 1 % по энергии удара, 5 % по общему и 8 % по удельному расходу сжатого воздуха. Результаты сравнения подтверждают соответствие расчетных и экспериментальных рабочих циклов рассмотренных пневмоударных устройств. Таким образом, установлена адекватность расчетных моделей, использованных в настоящей работе.

Выводы

1. Одним из способов экономии энергии в горной промышленности и обеспечения необходимой величины давления сжатого воздуха в воздухопроводных сетях подземных добычных предприятий является уменьшение удельного расхода воздуха погружными пневмоударниками.

2. Анализ рабочих циклов типовых систем воздухораспределения пневмоударников – клапанной, беззолотниковой, золотниковой – позволил установить ряд условий, выполнение которых должно обеспечивать экономичность пневмоударной системы. В частности, следует исключить пневматические сопротивления ходу ударника, а также повысить степень расширения воздуха в рабочих камерах.

3. Предложена система воздухораспределения, обеспечивающая выполнение указанных выше тре-

бований. Система включает два упругих клапана на ударнике, клапан отсечки подачи сжатого воздуха в управляемую камеру прямого хода, а также реализует управляемый впуск в камеру обратного хода.

4. На основе предложенной системы воздухораспределения в типоразмере серийной машины M29T разработан пневмоударник. Численным моделированием определены его рациональные по критерию удельного расхода конструктивные параметры. Расчеты показали, что при практически одинаковых с M29T габаритах, ударной мощности, расходе сжатого воздуха на продувку забоя скважины разработанный пневмоударник имеет удельный расход энергоносителя на 53 % меньше, а потребление электрической мощности на его питание сжатым воздухом в 2 раза ниже.

5. Проведено сравнение собственных расчетных данных и опытных, полученных в эксперименте и взятых из литературных источников. Установлено, что экспериментальные и расчетные диаграммы рабочего цикла качественно и количественно схожи. Отклонения расчетных показателей от опытных данных не превышают 6 % по частоте ударов, 1 % по энергии ударов, 5 % по абсолютному и 8 % по удельному расходу сжатого воздуха. Тем самым подтверждаются адекватность расчетных моделей и корректность результатов расчета.

Список литературы

1. Минеева А. С. Энергоэффективность как фактор устойчивого развития горнодобывающего предприятия. *Экономика и предпринимательство*. 2016;(11–2):565–570.
2. Люханов В. В., Алферов С. Б., Трофимов В. Ф., Роженцов В. Ф. Пневмоударный буровой инструмент, работающий при высоком давлении сжатого воздуха. *Горная промышленность*. 2012;(5):28–30.
3. Смолянички Б. Н., Репин А. А., Данилов Б. Б. и др. *Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах*. Монография. Новосибирск: Изд. СО РАН; 2013. 204 с.
4. Карпов В. Н., Немова Н. А., Резник А. В. О повышении эффективности бурения взрывных скважин при освоении твердых полезных ископаемых. В: *Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: сборник тезисов 8-й Международной научно-практической конференции*. Санкт-Петербург: СПГУ; 2021. С. 341–345.
5. Кумыкова Т. М., Кумыков В. Х. Исследование динамических характеристик шахтного гидропневмоаккумулятора сжатого воздуха. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013;(5):99–109. (Перев. вер.: Kumukova T.M., Kumukov V.K. Dynamics of mine hydro-pneumatic accumulator. *Journal of Mining Science*. 2013;49(5):763–771. <https://doi.org/10.1134/S1062739149050109>)
6. Алексеев С. Е., Кокоулин Д. И. Использование погружных пневмоударников для прямолинейного направленного бурения. В: *Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых: сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием*. КузГТУ; 2015.
7. Гаун В. А. Разработка и исследование погружных пневмоударников с повышенной энергией удара. *Повышение эффективности пневмоударных буровых машин: сб. науч. трудов*. Новосибирск: ИГД СО РАН; 1987. С. 3–10.
8. Липин А. А. Перспективные пневмоударники для бурения скважин. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2005;(2):74–78. (Перев. вер.: Lipin A.A. Promising pneumatic punchers for borehole drilling. *Journal of Mining Science*. 2005;41(2):157–161. <https://doi.org/10.1007/s10913-005-0078-0>)
9. Емельянов П. М., Есин Н. Н., Зиновьев А. А. и др. *Машины для бурения скважин погружными молотками в подземных условиях*. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР; 1965. 161 с.
10. Иванов К. И., Латышев В. А., Андреев В. Д. *Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых*. М.: Недра; 1987. 272 с.
11. Суднишников Б. В., Есин Н. Н., Тупицын К. К. *Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия*. Новосибирск: Наука, СО АН СССР; 1985. 134 с.



12. Wijk G. (Ed.) *Hammer theory and practice*. 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/271527406_Hammer_Theory_and_Practice
13. Герц Е.В. *Пневматические приводы. Теория и расчет*. М.: Изд-во «Машиностроение»; 1969. 359 с.
14. Мюнцер Е.Г. Построение математической модели пневмоударных механизмов на ЭВМ. В: *Пневматические буровые машины: сб. науч. тр.* Новосибирск: ИГД СО АН СССР; 1984. С. 49–55.
15. Федулов А.И., Архипенко А.П., Маттис А.Р. *Выбор зазоров в трущихся парах пневмомолотов*. Новосибирск: Наука, Сибирское отд.; 1980. 128 с.
16. Петреев А.М., Примычкин А.Ю. Работа кольцевого упругого клапана в пневмоударном приводе. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(1):132–143. (Перев. вер.: Petreev A. M., Primychkin A. Y. Ring-type elastic valve operation in air hammer drive. *Journal of Mining Science*. 2016;52(1):135–145. <https://doi.org/10.1134/S1062739116010224>)
17. Тамбовцев П.Н. Экспериментальные исследования пневмоударного устройства с пониженным удельным расходом сжатого воздуха. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2020;7(2):47–52. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2020070208>
18. Петреев А.М., Воронцов Д.С., Примычкин А.Ю. Кольцевой упругий клапан в пневмоударных машинах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2010;(4):56–65. (Перев. вер.: Petreev A. M., Primychkin A. Y., Vorontsov D. S. Ring-shape elastic valve in the air percussion machines. *Journal of Mining Science*. 2010;46(4):416–424. <https://doi.org/10.1007/s10913-010-0052-3>)
19. Тымчур А.Д. К вопросу улучшения пневмотранспорта выбуренных частиц при бурении скважин на карьерах. *Известия УГТУ*. 2000;(11):277–279.
20. Есин Н.Н. *Методика исследования и доводки пневматических молотков*. Новосибирск: ИГД СО АН СССР; 1965. С. 25–26.

References

1. Mineeva A.S. Energy efficiency as a factor of sustainable development for a mining company. *Journal of Economy and Entrepreneurship*. 2016;(11–2):565–570. (In Russ.)
2. Lyukhanov V.V., Alferov S.B., Trofimov S.N., Rozhentsov V.F. Pneumatic high-pressure rock drill by Nipigormash OAO and Mashinostroitelny Holding ZAO. *Russian Mining Industry*. 2012;(5): 28–30. (In Russ.)
3. Smolyanitsky B.N., Repin A.A., Danilov B.B. et al. *Improving the efficiency and durability of impulse machines for the construction of long wells in rock masses. Monograph*. Novosibirsk: SB RAS Publ.; 2013. 204 p. (In Russ.)
4. Karpov V.N., Nemova N.A., Reznik A.V. On improving the efficiency of drilling blast wells in the development of solid minerals. In: *Innovations and prospects for the development of mining engineering and electromechanics: a Collection of Abstracts of the 8th International Scientific and Practical Conference*. St. Petersburg: SPGU; 2021. Pp. 341–345. (In Russ.)
5. Kumykova T.M., Kumykov V.K. Dynamics of mine hydro-pneumatic accumulator. *Journal of Mining Science*. 2013;49(5):763–771. <https://doi.org/10.1134/S1062739149050109> (Orig. ver.: Kumykova T.M., Kumykov V.K. Dynamics of mine hydro-pneumatic accumulator. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2013;(5):99–109. (In Russ.))
6. Alekseev S.E., Kokoulin D.I. The use of down-the-hole hammers for straight directional drilling. In: *Modern problems in mining and methods of modeling mining and geological conditions in the development of mineral deposits: proceedings of the All-Russian scientific and tech. conf. with international participation. Kemerovo RF, 2015*. Kemerovo: TF Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2015 (In Russ.)
7. Gaun V.A. Development and research of down-the-hole hammers with increased impact energy. In: *Improving the efficiency of pneumatic percussion drilling machines: a collection of scientific papers*. Novosibirsk: Institute of Mining SB USSR AS; 1987. Pp. 3–10. (In Russ.)
8. Lipin A.A. Promising pneumatic punchers for borehole drilling. *Journal of Mining Science*. 2005;41(2):157–161. <https://doi.org/10.1007/s10913-005-0078-0> (Orig. ver.: Lipin A.A. Promising pneumatic punchers for borehole drilling. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2005;(2):74–78. (In Russ.))
9. Emelyanov P.M., Esin N.N., Zinoviev A.A. et al. *Machines for drilling boreholes with down-the-hole hammers in underground conditions*. Novosibirsk: SB USSR AS; 1965. (In Russ.)
10. Ivanov K.I., Latyshev V.A., Andreev V.D. *Drilling technique in the mineral deposit mining*. Moscow: Nedra Publ.; 1987. 272 p. (In Russ.)
11. Sudnishnikov B.V., Esin N.N., Tupitsyn K.K. *Study and designing of pneumatic impact machines*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1985. 134 p. (In Russ.)
12. Wijk G. (Ed.) *Hammer theory and practice*. 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/271527406_Hammer_Theory_and_Practice
13. Gerts E.V. *Pneumatic drives. Theory and calculation*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1969. 359 p. (In Russ.)



14. Myuntser E.G. Construction of a mathematical model of pneumatic impact mechanisms on a computer. In: *Pneumatic drilling machines: collection of scientific papers*. Novosibirsk: Institute of Mining SB USSR AS; 1984. p.49-55. (In Russ.)
15. Fedulov A.I., Arkhipenko A.P., Mattis A.R. *Selection of gaps in the rubbing pairs of a pneumatic hammer*. Novosibirsk: Siberian dept. of Nauka publ; 1980. 128 p. (In Russ.)
16. Petreev A.M., Primychkin A.Y. Ring-type elastic valve operation in air hammer drive. *Journal of Mining Science*. 2016;52(1):135–145. <https://doi.org/10.1134/S1062739116010224> (Orig. ver.: Petreev A.M., Primychkin A.Y. Ring-type elastic valve operation in air hammer drive. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2016;(1):132–143. (In Russ.))
17. Tambovtsev P.N. Experimental studies of pneumatic impact device with a reduced specific consumption of compressed air. *Fundamental and Applied Issues of Mining*. 2020;7(2):47–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FPVGN2020070208>
18. Petreev A.M., Primychkin A.Y., Vorontsov D.S. Ring-shape elastic valve in the air percussion machines. *Journal of Mining Science*. 2010;46(4):416–424. <https://doi.org/10.1007/s10913-010-0052-3> (Orig. ver.: Petreev A.M., Primychkin A.Y., Vorontsov D.S. Ring-shape elastic valve in the air percussion machines. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopayemykh*. 2010;(4):56–65. (In Russ.))
19. Tymchur A.D. On the issue of improving the pneumatic transport of drill chips when drilling holes in open pits. *Proceedings of USGU*. 2000;(11):277–279. (In Russ.)
20. Esin N.N. *Methods of research and fine-tuning of pneumatic hammers*. Novosibirsk: Institute of Mining SB USSR AS; 1965. 76 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Павел Николаевич Тамбовцев – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Лаборатории моделирования импульсных систем, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1058-2764](https://orcid.org/0000-0003-1058-2764), Scopus ID [7004038110](https://scopus.com/authorid/7004038110); e-mail tambovskiyp@mail.ru

Евгений Павлович Русин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Отдела горной и строительной геотехники, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7220-8589](https://orcid.org/0000-0001-7220-8589), Scopus ID [20434728100](https://scopus.com/authorid/20434728100); e-mail gmmlab@misd.ru

Information about the authors

Pavel N. Tambovtsev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Impulse Systems Modeling Laboratory, N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1058-2764](https://orcid.org/0000-0003-1058-2764), Scopus ID [7004038110](https://scopus.com/authorid/7004038110); e-mail tambovskiyp@mail.ru

Evgeny P. Rusin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Mining and Construction Geotechnics, N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7220-8589](https://orcid.org/0000-0001-7220-8589), Scopus ID [20434728100](https://scopus.com/authorid/20434728100); e-mail gmmlab@misd.ru

Поступила в редакцию	14.12.2022	Received	14.12.2022
Поступила после рецензирования	31.07.2023	Revised	31.07.2023
Принята к публикации	25.09.2023	Accepted	25.09.2023