

Mining Science and Technology

Горные науки
и технологии

Vol. 8 № 2
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

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 Фрайбергская 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

Тибилов 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

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

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., Wrocław University of Technology, Wrocław, 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



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

Обзор современного состояния горнодобывающей промышленности Китая 115
А. К. Курсанов

Обзор циркониевой отрасли России: состояние, проблемы обеспечения сырьем 128
В. Ю. Хатьков, Г. Ю. Боярко, Л. М. Болсуновская, А. М. Дибров, Ю. А. Диброва

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Оценка параметров многостадийного гидравлического разрыва пласта
с помощью 4D моделирования 141
И. И. Босиков, Р. В. Ключев, И. В. Силаев, Д. Э. Пилиева

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Параметризация модели вентиляционной сети при анализе аварийных режимов
проветривания систем горных выработок 150
М. О. Пересторонин, О. С. Паршаков, М. Д. Попов

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Разработка и обоснование усовершенствованного варианта классической схемы
главного водоотлива кимберлитового рудника с этажным обрушением руды 162
Н. П. Овчинников

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Выявление нарушений границ разработки месторождений полезных ископаемых
открытым способом с использованием данных Sentinel-2 MSI
на примере провинций Северного Вьетнама Лао Кай и Йень Бай 173
С. Б. Чан, Л. Х. Чинь, К. Л. Нгуен, Ю. М. Левкин, И. В. Зеньков, Т. Х. Тонг

ПОДГОТОВКА ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КАДРОВ. ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Прикладная геология – базовое направление подготовки кадров
горно-геологической отрасли 183
А. А. Верчеба, В. А. Макаров



CONTENTS

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Chinese mining industry: state of the art review..... 115

A. K. Kirsanov

Russian zirconium industry: current issues in raw material supply 128

V. Yu. Khatkov, G. Yu. Boyarko, L. M. Bolsunovskaya, A. M. Dibrov, Yu. A. Dibrova

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Estimation of multistage hydraulic fracturing parameters using 4D simulation..... 141

I. I. Bosikov, R. V. Klyuev, I. V. Silaev, D. E. Pileva

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Parameterization of a ventilation network model for the analysis of mine working emergency ventilation modes..... 150

M. O. Perestoronin, O. S. Parshakov, M. D. Popov

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Development and substantiation of an improved version of a main drainage facility classical scheme at a kimberlite mine developed by block caving method 162

N. P. Ovchinnikov

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Detection of violations of open-pit mining lease boundaries using Sentinel-2 MSI data in the case of Lao Cai and Yen Bai provinces of North Vietnam 173

X. B. Tran, L. H. Trinh, Q. L. Nguyen, Yu. M. Levkin, I. V. Zenkov, T. H. Tong

PROFESSIONAL PERSONNEL TRAINING

Applied geology – basic training program for mining and geological industry personnel 183

A. A. Vercheba, V. A. Makarov



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обзорная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-35>

УДК 662.3(510)



Обзор современного состояния горнодобывающей промышленности Китая

А. К. Кирсанов   

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

 AKirsanov@sfu-kras.ru

Аннотация

Территория современной Китайской Народной Республики обладает значительными запасами минеральных и энергетических ресурсов, что стимулирует рост добывающей отрасли. На текущий момент Китай является мировым лидером по добыче и производству 31 вида минерально-сырьевых продуктов: молибден, вольфрам, железо, алюминий, свинец, цинк, золото, уголь, гипс, бентонит и многие другие. Данный факт обуславливает развитие соответствующей инфраструктуры и подготовку специалистов в горнодобывающей отрасли, развитие международных связей для инвестиций и обмена передовым производственным опытом. Целью настоящей работы являлись изучение динамики разведки и добычи природных ресурсов, определение внутригосударственной стратегии развития горно-металлургического сектора, анализ передовых китайских горно-металлургических компаний. В представленной работе рассмотрены ключевые внутренние процессы в Китае, которые будут влиять на внутреннюю и мировую горно-металлургическую промышленность. Проведена оценка месторождений природных ресурсов на всей территории государства – дана их краткая характеристика, выделены наиболее перспективные участки и показаны запасы сырья. Показаны основные задачи для горно-металлургической промышленности, которые должны быть решены в 14-м пятилетнем плане. Развитие отрасли до 2025 г. предполагает наращивание добывающих мощностей с совокупным снижением зависимости от импорта, развитие программы геологоразведки, сокращение вредных выбросов от действующих предприятий и т.д. Отдельное внимание уделено публичным горно-металлургическим компаниям Китая – представлены лидеры в каждом секторе, даны краткие экономические показатели.

Ключевые слова

Китай, минеральные ресурсы, полезные ископаемые, провинции, обзор, добыча, потребление, анализ, данные по годам, экономика, промышленность

Для цитирования

Kirsanov A.K. Chinese mining industry: state of the art review. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):115–127. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-35>

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Review paper

Chinese mining industry: state of the art review

А. К. Кирсанов   

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

 AKirsanov@sfu-kras.ru

Abstract

The territory of the present-day People's Republic of China is rich in mineral and energy resources which stimulate the growth of the extractive industry in the country. China is currently the world leader in the production of 31 commodities (mineral products): molybdenum, tungsten, iron, aluminum, lead, zinc, gold, coal, gypsum, bentonite, and many others. This stimulates the development of the appropriate infrastructure and training of specialists in the mining industry, the development of international links for investment and the exchange of best production practices. The purpose of this work was to study the history of exploration and extraction of natural resources, establish a domestic strategy for the development of the mining and metallurgical sector, and review leading Chinese mining and metallurgical companies. The paper reviewed key domestic processes in China which would affect the domestic and global mining and metallurgical industry. An assessment of natural resource deposits throughout the whole territory of the country was carried out with their brief description, highlighting the prime prospects, and presenting commodity reserves. The paper presents the main challenges for the mining and metallurgical industry to be met in the 14th Five-Year Plan. The development of the industry up to 2025 implies the expansion of extractive capacities with an overall reduction in dependence on imports, enhancing exploration programs, and the reduction of harmful emissions from operating enterprises, etc. Special attention is paid to publicly traded mining and metallurgical companies in China. The leaders in each sector are presented, and their brief economic indicators are given.

**Keywords**

China, mineral resources, mineral products, provinces, review, extraction, consumption, analysis, yearly data, economy, industry

For citation

Kirsanov A.K. Chinese mining industry: state of the art review. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):115–127. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-35>

Введение

За последние полвека Китай совершил качественный скачок во многих отраслях экономики. Исключением не стала и горнодобывающая промышленность. Если раньше страна вынуждена была импортировать ресурсы и технологии для добычи полезных ископаемых, то сегодня она сама занимается экспортом, а по некоторым позициям даже получила эффективные рычаги влияния на мировой рынок.

В 1949 г., когда окончательно была закончена 22-летняя гражданская война, новообразованная Китайская Народная Республика находилась в крайнем упадке [1]. Последствия полуколониальности, гражданская война и оккупация Японией части территорий во время Второй мировой войны нанесли огромный экономический ущерб стране. Однако на стороне Китая оказалось два немаловажных фактора, которые помогли преодолеть кризис и развиваться в экономическую сверхдержаву.

Во-первых, это удачное месторасположение страны, охватывающее разные типы ландшафтов с разнообразными залежами полезных ископаемых. А во-вторых, противостояние СССР и США, каждая из которых в разное время пыталась перетянуть Китай на свою сторону, помогая ей получать технологии и знания с обеих сторон от «железного занавеса».

История горнодобывающей промышленности очень хорошо иллюстрирует исторический процесс использования этих двух факторов. Вначале советское правительство активно помогало в геологоразведке новых месторождений полезных ископаемых [2]. Затем США активно помогали своему бизнесу создавать американо-китайские компании, передавая новые технологии и знания по извлечению ресурсов [3]. И, наконец, сам Китай, обеспечив свою экономическую независимость, перешёл в наступление, начав международную экспансию по добыче ресурсов.

Горнодобывающая отрасль является важным источником занятости и доходов для страны, а также вносит существенный вклад в экономику Китая. В этой статье представлен обзор горнодобывающей промышленности Китая, включая её краткую историю, текущую ситуацию и перспективы будущего развития.

Оценка месторождений природных ресурсов на территории государства

Одним из первых актов сотрудничества СССР и Китая в добывающей промышленности можно назвать проект по поиску, добыче и переработке нефти в 1935–1955 гг. Поиски велись в основном на территории Синьцзян-Уйгурского автономного района. Помощь оказывалась для разведки и других полезных ископаемых [4].

На сегодняшний день Китай можно назвать одной из ведущих стран в мировой горнодобывающей промышленности. Страна располагает крупнейшими в мире запасами угля, железной руды, меди, олова, свинца, цинка, вольфрама, золота, молибдена, редкоземельных минералов и т.д.

По данным геологической службы США (USGS) в 2019 г. Китай инвестировал около 14,4 млрд долл. в геологоразведку и 173 млрд долл. в горнодобывающую промышленность, что на 23 и 24 % больше по сравнению с 2018 г. соответственно. В 2019 г. Китай занял первое место в мире по добыче угля, пятое место по добыче природного газа и седьмое место по производству сырой нефти. Китай был ведущим производителем и потребителем первичной энергии в мире.

В табл. 1 представлены запасы основных полезных ископаемых, добыча которых осуществляется на территории Китайской Народной Республики. Данные приведены на 2020 г.

Таблица 1

Запасы основных полезных ископаемых, а также показатели их добычи в КНР по данным USGS и World Mining Data на 2020 г.

Полезное ископаемое	Запасы		Объёмы добычи	
	млн т	доля от мирового значения, %	тыс. т	доля от мирового значения, %
Вольфрам	1,9	51,4	71,4	81,7
Железная руда	20000	11,1	225,4*	14,8
Золото	2,0	3,7	365,3	11,4
Кобальт	80,0	1,0	2,2	1,7
Литий	1,5	6,8	28,8	15,5
Медь	26,0	2,9	1,72*	8,3
Молибден	8,3	51,8	95,9	33,4
Никель	2,8	2,9	105,0	4,2
Олово	1100	22,4	94,5	34,1
Плавленый шпат	42,0	13,1	4,3*	56,7
Природный газ	5,4	н/д	192,5**	4,8
Редкоземельные элементы	44,0	36,6	140,0	62,1
Свинец	18,0	20,0	1,97	41,5
Тальк	82,0	н/д	2,0*	26,2
Уран	0,25	4,0	2,2	3,9
Цинк	44,0	17,6	4,0*	32,2
Циркон	н/д	н/д	140,0	11,3

* – данные указаны в млн т; ** – данные указаны в млрд м³; н/д – нет данных.

Поскольку страна обладает огромными запасами природных ресурсов, актуальным является также вопрос подготовки кадров для соответствующих отраслей.

Согласно данным Национального бюро статистики Китая в 2020 г. в Китае в горнодобывающем секторе было занято около 5,3 млн чел. Сюда входят работники, занятые добычей угля, сырой нефти, природного газа и других полезных ископаемых.

Что касается обучения, то многие работники горнодобывающей промышленности в Китае проходят обучение на рабочем месте в рамках стажировок и других программ, предлагаемых работодателями. В стране также существует ряд горных школ и институтов, которые предлагают специализированную подготовку в области горного дела и в смежных областях.

К числу основных институтов горного дела в Китае относятся: Китайский университет горного дела и технологий (Сюйчжоу, провинция Цзянсу) – один из старейших и наиболее престижных горных университетов в Китае; Северо-восточный университет: (Шэньян, провинция Ляонин); Центральный Южный университет (Чанша, провинция Хунань); Китайский университет геонаук (кампусы расположены в Пекине, Ухане и других городах); Шаньдунский университет науки и технологии (Циндао, провинция Шаньдун).

Это лишь несколько примеров из множества горных институтов и школ в Китае, которые предлагают обучение и подготовку работников горнодобывающего сектора.



Рис. 1. Карта полезных ископаемых в КНР

В целом сегодня в стране добываются практически все элементы периодической системы Менделеева (рис. 1). Однако к наиболее важным ископаемым относятся уголь, нефть и газ, а также редкоземельные металлы [5–8].

Уголь в стране является одним из главных добываемых ресурсов. Он используется в качестве основного топлива для тепловых электростанций (60 % электроэнергии в стране обеспечивается углем), для производства стали, а также для получения водорода (т.н. «коричневый водород» получается в процессе газификации угля) [9–13].

Уголь добывают во всех провинциях страны, но основные залежи сосредоточены на севере. Лидером по добыче является провинция Шаньси, где как предполагается, находится до 50 % всех залежей в стране. Другими важными угленосными провинциями являются Внутренняя Монголия, Ляонин, Хэйлунцзян, Хэбэй, Шаньдун и Цзилинь.

Самыми распространёнными видами угля в стране являются лигнит и битуминозный уголь. Первый отличается низкой теплотой сгорания (до 7700 ккал/кг), высоким содержанием влаги (от 30 до 70 %), неограниченным выходом летучих веществ. Битуминозный уголь отличается более высокой теплотой сгорания (7700–8800 ккал/кг), содержанием влаги до 10 % и ограниченным выходом летучих веществ.

Наиболее качественный вид угля – антрацит, имеющий теплоту сгорания (8000–8500 ккал/кг), содержание влаги до 5 % и выход летучих веществ до 14 %, – добывается в Китае в крайне ограниченных объёмах, что вынуждает правительство дополнительно импортировать его.

Динамика добычи угля в Китае приведена на рис. 2.

Основными источниками нефти, как и в случае с углём, выступают северные регионы страны. Наибольшие запасы сосредоточены в провинции Хэйлунцзян (нефтяное месторождение Дацин), Синьцзян-Уйгурском автономном районе (Таримская впадина), Цинхай и Ганьсу. Отдельные месторождения найдены в провинциях Сычуань, Хэнань, Шаньдун, Ляонин и Гуандун [14–17].

Большинство китайских месторождений чёрного золота можно условно разделить на два типа – лёгкую высококачественную и сланцевую нефть. Легкая нефть перерабатывается на нефтеперерабатывающих заводах и зачастую добыть ее совсем не сложно. В противовес ей, сланцевая, является более тяжёлой в переработке и сложной в добыче – в большинстве случаев она залегает глубоко и необходимы специальные технологии для её добычи – такие как гидравлический разрыв пласта. Добыча сланцевой нефти зачастую является низкорентабельной.

Разведка природного газа в Китае долгое время развивалась очень слабо, из-за чего до сих пор неизвестен потенциал этого ресурса в стране. Кроме того, зачастую при добыче нефти извлекается попутный природный газ – как, например, в Дацине. Это долгое время делало поиск газовых месторождений не очень востребованным направлением. На сегодня почти половина запасов природного газа была раз-



ведана в провинции Сычуань. Другие месторождения находятся во Внутренней Монголии, Шанхае, Шэньси, Хэбэй, Цзянсу, Чжэцзяне и недалеко от острова Хайнань [18–21].

Китай имеет обширные запасы железа – богатые залежи располагаются в провинциях Сычуань, Ганьсу, Гуйчжоу, Гуандун и на Хайнане. Запасы сурьмы, вольфрама, олова и бокситов считаются одними из крупнейших в мире [22]. Есть богатые месторождения золота и лития [23–25]. Пирит, сосредоточенный в провинциях Шаньси, Хэбэй, Шаньдун и Ляонин, также является одним из важнейших ресурсов [11].

Ещё одним немаловажным ресурсом являются редкоземельные элементы – 17 видов металлов, которые сегодня используются в микроэлектронике, приборостроении, химической отрасли, металлургии и атомной промышленности. Их особенностью является то, что несмотря на их распространённость по всему миру, они очень редко встречаются в виде залежей. Это делает их добычу крайне нерентабельной, за исключением некоторых мест, где их концентрация очень высока. Одним из таких мест является Баян-Обо в провинции Внутренняя Монголия – на это месторождение приходится больше половины мировой добычи редкоземельных элементов и около 70 % внутреннего производства. По различным оценкам, запасы этого месторождения оцениваются в более чем 50 млн т [26–29].

Наличие такой развитой минерально-сырьевой базы предполагает и наличие хорошо развитой и современной инфраструктуры в данном секторе. В стране производится широкий спектр горнодобывающего оборудования и техники, начиная от простых ручных инструментов и заканчивая современной техникой, такой как экскаваторы, бульдозеры и краны. В Китае также имеется широкий спектр вариантов транспортировки добытых полезных ископаемых. Разветвлённая сеть автомобильных, железных дорог и водных путей обеспечивает эффективную транспортировку добытых ресурсов. В Китае хорошо развита энергетическая инфраструктура с широким спектром доступных источников энергии, включая уголь, нефть, газ и гидроэлектроэнергию. Страна вкладывает значительные

средства в исследования и разработки, чтобы повысить эффективность и безопасность своих горнодобывающих предприятий. Все эти факторы помогли сделать Китай одним из ведущих мировых производителей полезных ископаемых и других природных ресурсов.

Развитие горно-металлургической отрасли в стране

Если Советский Союз в основном помогал Китаю в поиске и первичной разработке полезных ископаемых, то США с конца 70-х годов прошлого века начали активно инвестировать в создание совместных американо-китайских компаний. Основу для такого ведения бизнеса заложил Дэн Сяопин – «отец современной китайской экономики».

В то время страна испытывала огромный дефицит в современных технологиях, и Дэн Сяопин нашёл интересный выход – он предложил создавать совместные предприятия. Суть предложения заключалась в том, что иностранные инвесторы создавали на пару с китайскими совместный бизнес. Иностранцы передавали технологии и обеспечивали финансирование, в то время как китайская сторона обеспечивала налоговые льготы и выход на рынок с населением в 1,4 млрд чел. Вскоре эта практика распространилась по всей стране и существует по сей день.

Такая стратегия дала толчок быстрому росту множества компаний. Исключением не стал и горнодобывающий сектор – поэтому, рассуждая в дальнейшем о китайских компаниях, необходимо помнить, что часть из них являются по сути иностранными.

Также необходимо помнить, что, в отличие от американских и европейских, китайские компании горнодобывающей промышленности имеют ряд ключевых отличий, напрямую влияющих на их повседневную деятельность.

Помимо создания совместных предприятий, ключевым отличием является большое влияние государства на стратегию развития компаний. Это выражается в регулировании и «рекомендациях». Так, в 14-м пятилетнем плане, охватывающем период 2021–2025 гг., есть целый раздел, посвящённый горно-металлургической промышленности (рис. 3) [30].

ДОБЫЧА УГЛЯ В КИТАЕ, млрд тонн

ИСТОЧНИК: Национальное Бюро Статистики, оценки АТОна



Рис. 2. Динамика добычи угля в КНР

14-й пятилетний план развития: ключевые моменты

- Снизить зависимость от импорта железосодержащих рудных материалов;
- Инвестировать в зарубежные активы по добыче полезных ископаемых;
- Запустить новую программу геологоразведки для поиска новых месторождений полезных ископаемых;
- Сократить выбросы CO₂ путём модернизации производств;
- Продолжить консолидацию металлургической промышленности;
- Нарастить горнодобывающие мощности;
- Увеличить загруженность ломозаготовительных пунктов

Рис. 3. Ключевые моменты развития горно-металлургической отрасли КНР в период с 2021 по 2025 г.

Более детальное описание основных из представленных задач приведено ниже:

Снизить зависимость от импорта железосодержащих рудных материалов. Причиной такой задачи стала критическая зависимость от Австралии, на долю которой приходится 80 % китайского импорта этого сырья. Однако с 2020 г. между двумя странами отношения становятся все более напряжёнными и КНР пытается заблаговременно подстраховаться. Решить проблему зависимости планируется с помощью нескольких шагов:

- Запустить новую программу геологоразведки для поиска новых месторождений.

- Увеличить загруженность ломозаготовительных пунктов. В настоящее время страна производит чуть более 1 млрд т стали в год. При целевом показателе переработки в 30 % общее количество лома для переработки составит 300 млн т, что будет на 40 % больше, чем в 2019 г., когда было переработано 216 млн т.

- Увеличить инвестиции в зарубежные активы. В частности, правительством планируется разработать до двух железных рудников мирового уровня. Одним из наиболее вероятных объектов станет рудник Симанду в Гвинее (содержит около 2 млрд т высококачественной железной руды с содержанием железа 65 %).

- Увеличить добычу внутри страны. По запасам железной руды Китай находится на 4-м месте, однако качество ресурса является довольно низким, что делает его менее рентабельным, а также увеличивает выбросы CO₂ (чем более качественная железная руда, тем легче её обрабатывать, снижая общее количество выбросов CO₂ на тонну стали) [31].

Сократить количество вредных выбросов. Горнодобывающая и сталелитейная промышленности являются основным источником выбросов углеродов. В текущем плане правительство потребовало улучшить экологическую обстановку путём:

- установки новых технологий улавливания, использования и хранения углерода на новых горнодобывающих объектах, а также модернизации уже действующих;

- повышения роли возобновляемых источников энергии и атомной энергетики в структуре энергопотребления.

Консолидировать стальной сектор путём объединения действующих компаний, а также со-

кратить избыточные мощности сталелитейных предприятий. Продолжающаяся в Китае постепенная консолидация сталелитейной промышленности должна повысить государственный контроль над загрязнением окружающей среды и в долгосрочной перспективе привести к сокращению избыточных мощностей. Кроме того, это даст крупным игрокам отрасли более мощные рычаги влияния на ведущих производителей импортного железорудного сырья в ходе переговоров о ценообразовании.

К «рекомендациям» относятся негласные постановления правительства. В частности, с 6 ноября 2020 г. было «рекомендовано» прекратить закупки угля, медной руды и ряда других товаров из Австралии. Основной причиной послужили напряжённые отношения между двумя странами – Австралия поддержала США в торговой войне против Китая, а также неоднократно намекала на виновность КНР в распространении коронавирусной инфекции COVID-19. Чтобы понять масштаб негласных постановлений, достаточно привести всего пару цифр – до эмбарго Китай являлся крупнейшим импортёром австралийских товаров, закупая до 60 % коксующегося угля и 25 % энергетического угля – это 21 % от всего австралийского экспорта этого вида ресурса. Под запрет попала медная руда и его концентраты (закрывала 5 % спроса Китая), а также ряд других товаров. Чуть позже эмбарго было введено официально.

Китайские публичные горно-металлургические компании

Еще одним отличием является тенденция к постоянному объединению всё новых и новых компаний и созданию таким образом огромных промышленных корпораций. Из-за этого зачастую очень трудно судить о прибыльности – некоторые дочерние компании являются явно убыточными, однако за счёт других, более прибыльных, общие доходы корпорации практически всегда оказываются в плюсе. В нашем случае некоторые китайские добывающие компании объединяются с производственными – особенно хорошо это видно на примере сталелитейного сектора. Поэтому в настоящей статье рассматриваются китайские компании, которые относятся сразу к двум отраслям – горнодобывающей и металлургической. Это позволит избежать путаницы в финансовых показателях и основных характеристиках компаний.

В абсолютном выражении горно-металлургическая промышленность в Китае является огромной – рыночная капитализация оценивается в 477 млрд долл. США. Из них 197 млрд долл. доступны для инвесторов в виде акций в свободном обращении (рис. 4) [30].

СОВОКУПНАЯ КАПИТАЛИЗАЦИЯ КИТАЙСКОЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПО СЕКТОРАМ, %

ИСТОЧНИК: Bloomberg, оценки АТОНа



Рис. 4. Совокупная капитализация китайской горно-металлургической промышленности по секторам

Наиболее крупными секторами в промышленности являются добыча и производство стали и угля – их рыночная капитализация составляет 126 и 98 млрд долл. США соответственно. За ними идет сектор драгоценных металлов, добыча лития и кобальта, недрагоценные металлы и алюминий, редкоземельные элементы и др. [30].

Рассмотрим каждый сектор более подробно:

Стальной сектор. Из 23 публичных компаний только три достаточно крупные: Baoshan Iron & Steel (капитализация 27 млрд долл.), China Steel Corp (20 млрд долл.) и Inner Mongolia Baotou Steel Union (11 млрд долл.). Их средняя рентабельность по EBITDA (аналитический показатель прибыли компании до вычета всех видов расходов) в 2020 г. составляла 9 %. В целом это на уровне Японии и стран Северной Америки, но ниже, чем в России (27 %) и Индии (23 %). Также следует отметить большие выплаты дивидендов, несмотря на долговую нагрузку сектора – средняя прогнозируемая дивидендная доходность составляет 5 % за 2022 г., уступая только российскому с 10 % [30].

Стоит отметить, что основные добытые запасы железа расположены к северу от реки Янцзы и снабжают соседние металлургические предприятия. Однако Китай вынужден постоянно импортировать сырьё для удовлетворения своих производственных потребностей. Наибольшая доля импорта железной руды (60 %) – приходится на Австралию. Этот вид ресурсов не попал под эмбарго.

Угольный сектор. Сектор представлен пятью компаниями, четыре из которых торгуются на Шанхайской бирже. Самой крупной из них является China Shenhua Energy. Её капитализация составляет больше половины всего сектора – 58 млрд долл. За ней идёт Shaanxi Coal and Chemical Industry с капитализацией в 17,5 млрд долл. и China Coal Energy (12 млрд долл.). Средняя рентабельность по EBITDA в 2020 г. составила 23 % – самый высокий показатель во всей горно-металлургической промышленности. Прогнозируемая

дивидендная доходность в 2022 г. составит 6 % – также самый высокий показатель во всей отрасли [30].

Всего за 2021 г. китайскими компаниями было добыто 3,9 млрд т угля. Это на 2,5 % больше, чем в 2020 г. Рост добычи объясняется постепенным снижением карантинных мер и энергетическим кризисом в ЕС. Ожидается, что темпы роста добычи угля будут составлять 1,1 %, таким образом, объём добычи достигнет 4,1 млрд т к 2025 г. Тем не менее в связи с инициативой правительства по выводу из эксплуатации устаревших мощностей по извлечению угля [32] темпы роста добычи угля в ближайшей перспективе будут снижаться.

Здесь следует также отметить сильное регулирование добычи правительством – ранее по всей стране были созданы тысячи небольших шахт, обеспечивающие углём местные нужды. На них приходится 40 % от всей добычи внутри страны – большая часть из них является низкорентабельной. Однако такая инициатива помогла снизить нагрузку на транспортную сеть, страдающую от чрезмерных нагрузок при вывозе угля из провинции Шаньси.

Сектор драгоценных металлов. В него входит шесть публичных компаний с общей капитализацией в 70 млрд долл. Наиболее крупными из них являются Zijin Mining (капитализация составляет 42 млрд долл.), Shandong Gold Mining (14 млрд долл.) и Zhongjin Gold (7 млрд долл.), а также частные China National Gold и Zhaojin Gold. Средняя рентабельность по EBITDA в 2020 г. составила 12 % – против 50 % у мировых производителей золота [30].

Сектор добычи лития и кобальта. Состоит из четырёх публичных компаний – Tianqi Lithium, Ganfeng Lithium, GME и Zhejiang Huayou Cobalt. Средний показатель рентабельности EBITDA за 2020 г. составил 21 % [30].

Сектор недрагоценных металлов и алюминия. Представлен пятью компаниями по добыче недрагоценных металлов (Jiangxi Copper, Tongling Nonferrous, Chihong Zinc, China Molybdenum и Tibet Huayu Mining) и четырьмя по добыче алюминия (China Zhongwang, Aluminium Corp, China Hongqiao и Shandong Nanshan). Общая рыночная капитализация сектора составляет 74 млрд долл. Средняя рентабельность по EBITDA в 2020 г. составила 7 % у недрагоценных металлов (против 37 % у мировых производителей) и 21 % у производителей алюминия (выше мировых производителей). У этого сектора самая высокая долговая нагрузка среди всей промышленной отрасли [30].

Необходимо учитывать, что многие компании по добыче недрагоценных металлов имеют шахты по добыче таких руд, как кобальт, молибден, редкоземельные элементы и т.д.

Сектор редкоземельных элементов. В него входит 34 производителя, из которых только пять можно назвать относительно крупными. Самой большой из них является China Rare Earth (капитализация 11,4 млрд долл.), затем идёт China Northern, Xiamen Tungsten, China Minmetals и JL Mag. Средняя рентабельность по EBITDA в 2020 г. составила 10 % [30].

Следует отметить, что часть компаний помимо добычи ресурсов из этого сектора занимаются производством других – литий, вольфрам, калий и т.д.

В целом, как мы видим, по финансовым показателям китайские компании выглядят не очень привлекательно для инвесторов – в большинстве случаев зарубежные компании, которых не сдерживают политические планы, демонстрируют куда более высокую эффективность (рис. 5). С другой стороны, государство продвигает новые программы по поиску новых месторождений полезных ископаемых и активно поощряет увеличивать добычу.

Впрочем, несмотря на развитие китайских компаний и наращивание усилий по увеличению добычи полезных ископаемых, страна не может удовлетворить все свои потребности. Это вынуждает Китай постоянно импортировать ресурсы из других стран и заниматься международной экспансией.

Торговля полезными ископаемыми

Полезные ископаемые играют важную роль в становлении экономической мощи Китая. Это связано с тем, что на протяжении последних десятилетий страна делала упор на развитие собственной промышленности, создавая всевозможные товары – от велосипедов до космических кораблей. Однако, несмотря на многочисленные собственные запасы полезных ископаемых, китайская промышленность приобрела такой размах, что страна была вынуждена начать импортировать ресурсы из других стран.

По данным Всемирной торговой организации, китайский импорт топлива и полезных ископаемых

в 2021 г. составил 789,255 млрд долл., уступив первенство только Евросоюзу – 987,763 млрд долл. В разрезе последних лет видно, что Китай, как и ЕС, активно наращивал импорт (табл. 2). Замедление в 2018–2019 гг. связано с торговой войной с США, когда обе страны наложили таможенные пошлины на ряд товаров и ресурсов. Небольшое падение в 2020 г. обусловлено последствиями коронавирусных ограничений.

Любопытно отметить и то, что Китай активно скупает полезные ископаемые, но при этом слабо их продаёт. Так, экспорт топлива и полезных ископаемых в 2021 г. составил всего 87,871 млрд долл., заняв лишь 13-е место в списке крупнейших экспортёров. Впрочем, тенденция к увеличению продажи ресурсов видна и здесь, так же, как и падение в 2019 и 2020 гг. по вышеперечисленным причинам.

Ниже будут более детально представлены ключевые показатели по импорту и экспорту ключевых полезных ископаемых.

Импорт полезных ископаемых

Можно отметить характерную особенность Китая при импорте полезных ископаемых – они ищут поставщиков с наиболее низкими ценами, не допуская, чтобы международная политическая повестка влияла на их закупки. Хотя в некоторых случаях страна отказывается от выгодных условий, если Коммунистическая партия Китая «негласно» рекомендует перестать работать с той или иной страной.

Основными статьями импорта полезных ископаемых выступают уголь, сырая нефть, железная и медная руды (рис. 6).



Рис. 5. Средняя рентабельность по EBITDA в 2020 г. некоторых горно-металлургических секторов

Таблица 2

Мировые лидеры по импорту полезных ископаемых за 2016–2021 гг. (по данным Всемирной торговой организации)

Регион	Сумма импорта полезных ископаемых по годам, млрд долл./год					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Евросоюз	569,917	716,361	883,131	788,515	573,823	987,763
Китай	326,216	444,767	560,913	580,577	541,761	789,255
США	205,737	257,850	300,582	265,652	185,778	307,856
Япония	146,164	184,213	222,842	201,620	151,774	227,103
Германия	117,119	140,207	168,694	157,057	125,779	202,784
Индия	108,092	148,150	198,755	177,565	123,616	201,546

Рассмотрим данные статьи импорта подробнее:

Железная руда. Традиционно основным поставщиком железной руды в Китай выступала Австралия. Однако из-за политического курса страны, ориентированного на поддержку США, правительство КНР в последние годы активно развивает поставки из других стран – в первую очередь из Бразилии. При этом в третьем квартале 2022 г. поставки из южноамериканской страны выросли – в первую очередь из-за хороших погодных условий, позволивших увеличить добычу. Однако сама цена на этот вид ресурса постоянно падает. За тот же период индекс IODEX упал на 25 %, снизившись до 95,95 долл. (на 30 сентября 2022 г.). Это связано с тем, что Китай, выступая одним из главных импортёров железной руды, испытывает кризис на

рынке недвижимости, из-за чего спрос на железо для строительства падает.

Медная руда. Здесь также основным экспортёром ресурса является Австралия. В ноябре 2020 г. был введён негласный запрет на поставки медной руды и угля из-за требования правительства Австралии провести международное расследование о причинах возникновения COVID-19. В ноябре 2022 г. после встречи лидеров КНР и Австралии на саммите G-20 негласное эмбарго было снято.

Уголь. В феврале 2023 г. в Китай прибыли первые два судна с углём из Австралии и ещё несколько находятся в пути, прервав тем самым двухлетнее эмбарго. Однако 16 февраля 2023 г. таможенное управление не пропустило один корабль с 12 тыс. т угля. В течение

Таблица 3

Мировые лидеры по экспорту полезных ископаемых за 2016–2021 гг. (по данным Всемирной торговой организации)

Регион	Сумма экспорта полезных ископаемых по годам, млрд долл./год					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Евросоюз	340,330	430,396	510,980	465,947	359,363	589,889
США	129,247	177,683	238,025	243,141	201,283	305,067
Россия	163,989	209,142	263,390	248,032	171,033	248,868
Австралия	112,245	142,277	170,951	184,308	169,108	241,301
ОАЭ	55,423	72,285	132,631	223,881	181,802	233,014
Китай	50,524	62,657	79,447	78,357	60,493	87,871

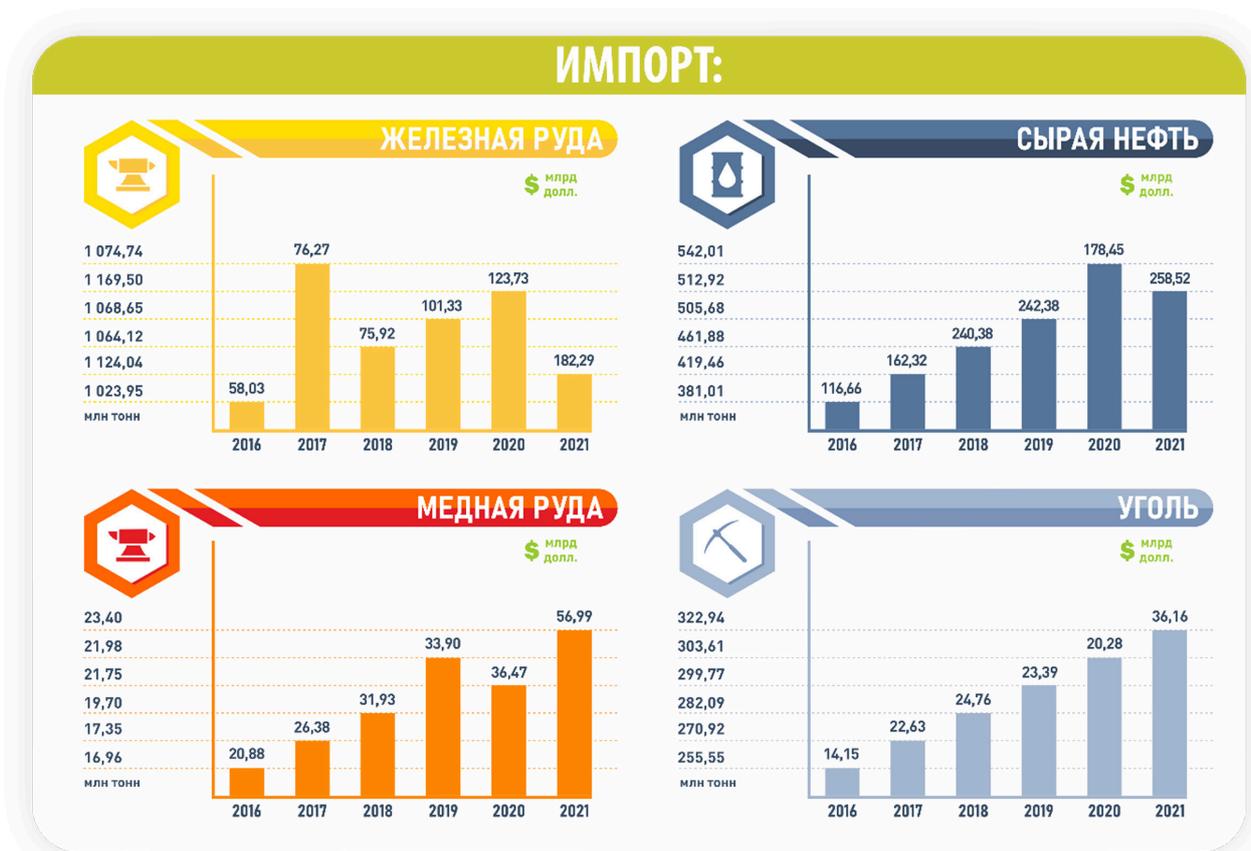


Рис. 6. Импорт основных полезных ископаемых в Китай в период с 2016 по 2021 г. (по данным Национального бюро статистики Китая и UN Comtrade Database)

пяти суток корабль пытался пройти таможенный до-смотр, но так и не смог этого сделать. Поэтому ему пришлось изменить свою курс и поставить уголь во Вьетнам. Само событие говорит о том, что правительство Китая ещё не до конца разобралось, нужно ли полностью снимать эмбарго с Австралии по экспорту некоторых полезных ископаемых. Кроме того, Китай активно наращивает импорт угля из России. Из-за эмбарго ЕС и Великобритании на российский уголь РФ начала переориентировать потоки в Азию. Однако основной проблемой поставок является перегруженность железных дорог, что ограничивает возможности России поставлять этот ресурс.

Сырая нефть. Основными поставщиками являются Россия и Саудовская Аравия. Причём ресурсы от первой чаще всего закупаются для последующей перепродажи в западные страны из-за международных санкций, в то время как нефть из Саудовской Аравии идёт на внутренние нужды страны.

Экспорт полезных ископаемых

Китай является одним из ведущих мировых экспортёров природных ресурсов с широким спектром полезных ископаемых, сельскохозяйственной продукции и ископаемого топлива. Страна экспортирует различные полезные ископаемые и металлы, в том числе железную руду, медь, нефть, алюминий и марганец, а также является ведущим мировым производителем редкоземельных элементов, которые исполь-

зуются во многих отраслях, включая электронику, автомобилестроение и возобновляемые источники энергии. На рис. 7 представлены одни из основных статей экспорта.

По данным Национального бюро статистики Китая, в 2019 г. Китай экспортировал в общей сложности 6,08 млрд т полезных ископаемых, включая железную руду, медь, алюминий, марганец и редкоземельные элементы. На экспорт железной руды приходится наибольшая доля экспорта полезных ископаемых: в 2019 г. было экспортировано 2,82 млрд т, за ней следуют медь (1,08 млрд т), алюминий (0,72 млрд т), марганец (0,48 млрд т) и редкоземельные элементы (0,35 млрд т).

Экспорт полезных ископаемых из Китая неуклонно растёт в течение последних нескольких лет. В 2018 г. Китай экспортировал 5,9 млрд т полезных ископаемых, а в 2017 г. – 5,4 млрд т. Это увеличение экспорта обусловлено сочетанием факторов, включая увеличение спроса со стороны торговых партнёров Китая, а также увеличение производственных мощностей в стране.

Но если при импорте ресурсов китайское правительство и бизнес активно пытаются расширить количество поставщиков, чтобы иметь возможность приобретать полезные ископаемые по низким ценам, то в случае экспорта Китай активно использует своё влияние, чтобы поднимать расценки или добиваться политических уступок. Так, например, в 2010 г. Китай

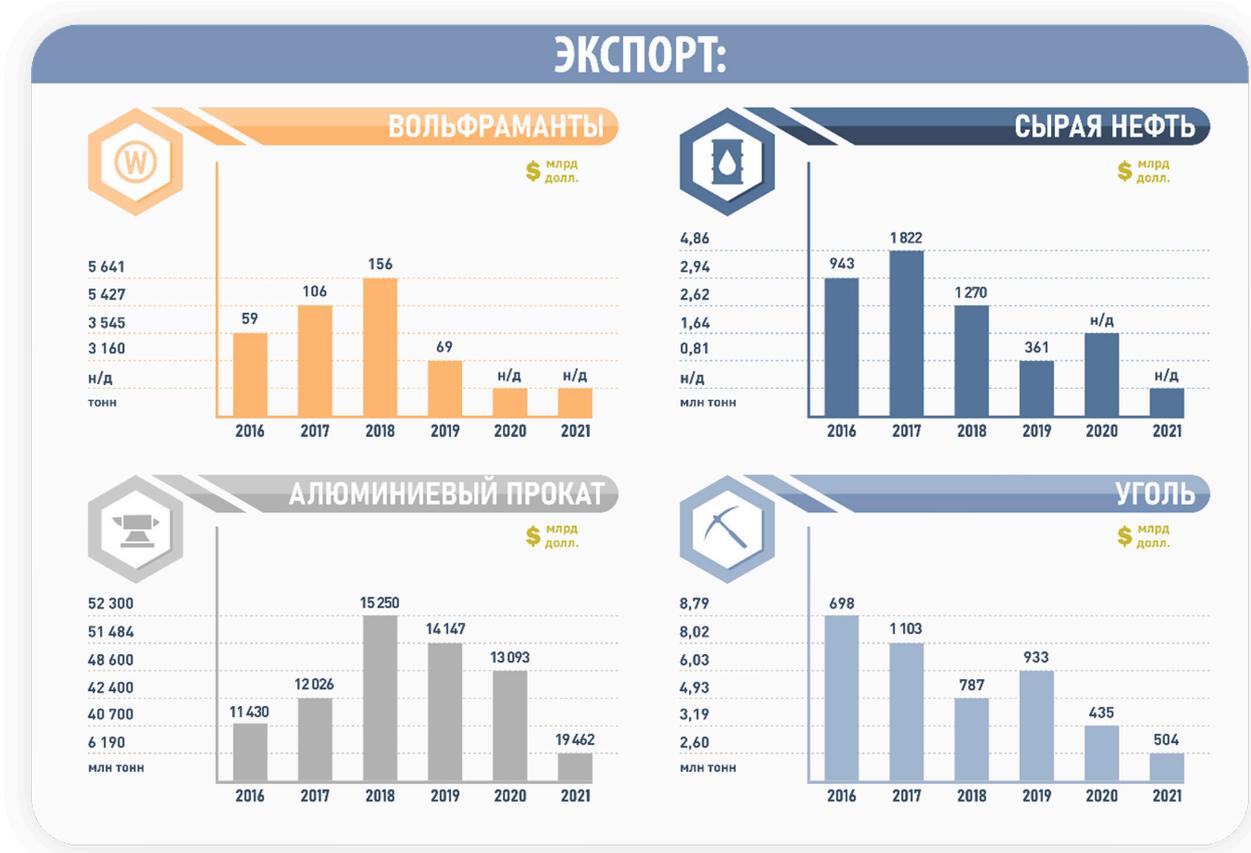


Рис. 7. Экспорт основных полезных ископаемых из Китая в период с 2016 по 2021 г. (по данным Национального бюро статистики Китая и UN Comtrade Database)



сократил свои поставки редкоземельных элементов в Японию на фоне скандала с рыболовным судном, в 2019 г. из-за торговой войны с США страна угрожала поднять пошлины на этот же ресурс, а в декабре 2021 г. даже временно исключила Литву из своего таможенного реестра, заблокировав возможность литовского бизнеса растаможивать свои товары.

Другой особенностью экспорта является крайнее нежелание страны продавать полезные ископаемые в чистом виде. Вместо этого они стараются продавать готовые изделия или хотя бы провести первичную переработку. Так, среди крупнейших статей экспорта страны отсутствует железная, медная или алюминиевая руда, но при этом есть чугун, алюминиевый, стальной и медный прокат, а также изделия из них (гвозди, болты и т.д.). Китай добывает почти 60 % всех видов редкоземельных элементов, но при этом за границу поставляется уже обогащённая руда в виде редкоземельных металлов или и вовсе изделия на их основе.

Основными странами-получателями полезных ископаемых являются США, Япония, Южная Корея и страны Евросоюза. При этом часть ресурсов поставляется с помощью морских перевозок (нефть и нефтепродукты), а часть – с помощью железнодорожных (редкоземельные элементы, уголь).

Международная экспансия по поиску и разработке текущих и новых месторождений полезных ископаемых

Торговая война с США в 2018 г., эмбарго на австралийские ресурсы в 2020 г., подготовка новых американских санкций в 2022 г. заставили китайское руководство задуматься о новых угрозах для текущих поставок сырья, а эмбарго на российские энергоресурсы – начать действовать заблаговременно.

Поскольку импорт может неожиданно сократиться, китайское правительство начало активно проводить международную экспансию по поиску и разработке текущих и новых месторождений. В первую очередь предпочтение отдаётся наиболее близким с точки зрения географии объектам. Так, Китай активно инвестирует в проекты, связанные с добычей угля и медной руды в Монголии. Причём инвестиции касаются не только компаний, непосредственно работающих в этих секторах, но и компаний, занимающихся развитием транспортной инфраструктуры, которые помогают увеличить объём поставок.

Несмотря на рост напряжённости с США, китайские компании активно сотрудничают с западными коллегами, проводя совместную разведку новых месторождений нефти в Жёлтом и Китайском морях, Тонкинском и Бохайском заливах. Некоторые перспективные места входят в зону экономических интересов Вьетнама, Северной и Южной Кореи, Тайваня.

Особое внимание Китай уделяет развивающимся странам Африки и Южной Америки. Согласно отчёту Шанхайского университета международного бизнеса и экономики с 2000 по 2019 г. КНР инвестировала в 52 из 54 стран африканского континента. Объём инвестиций вырос с 210 млн до 47,3 млрд долл. В 2021 г. размер инвестиций составил 49 млрд долл.

Однако размер инвестиций не учитывает кредитование отдельных государств китайскими компаниями. Поэтому определить, сколько денег ушло на развитие горнодобывающей промышленности, очень сложно. Об этом можно судить лишь по косвенным признакам – таким как рост торгового оборота до 254 млрд долл. в 2021 г., и сообщениям об отдельных инвестиционных проектах. К таким проектам относится разработка железорудного месторождения Симанду в Гвинее. Китайская компания в составе консорциума Winning Consortium Simandou и австралийско-британская компания Rio Tinto договорились инвестировать в рудник более 15 млрд долл. Часть средств планируется потратить на создание инфраструктуры для удобного вывоза сырья с континента.

Другим сообщением является новость о приобретении китайской компанией Zijin Mining двух африканских компаний Guyana Goldfields и Continental Gold, занимающихся добычей золота. Всего же за 2019 г. китайский бизнес потратил 750 млн долл. на покупку золотодобывающих активов за границей [30].

В Южной Америке Китай стал главным торговым партнёром таких стран, как Бразилия, Перу, Уругвай и Чили. У большинства других стран он занимает вторую позицию. В обмен на закупку сырья Китай зачастую предлагает инвестиции в крупные инфраструктурные проекты, а отдельным компаниям – кредиты для некоторых добывающих предприятий. Общий объём торговли в 2020 г. составил 315 млрд долл., а сумма кредитов в добывающую промышленность – 2,1 млрд долл. [33].

Особенно важно здесь подчеркнуть роль Венесуэлы в поставках нефти для Китая. Страна закрывает 13 % китайского импорта (40 % экспорта нефти Венесуэлы).

При этом необходимо отметить, что всё чаще китайские горнодобывающие компании сталкиваются с конкуренцией со стороны американских компаний. Помимо традиционного соперничества в виде выкупа компаний или получения лицензий, в некоторых ситуациях компании начинают заниматься «чёрным пиаром». Так, китайское новостное агентство «Синьхуа» в январе 2022 г. опубликовало опровержение сообщения британской газеты «The Guardian». В последней сообщалось, что две китайские горнодобывающие компании – Jinding Mining Zimbabwe и Shanghai Naoyun – платят низкую заработную плату и заставляют местных рабочих трудиться сверхурочно.

Заключение

Китай оказывает огромное влияние на весь азиатский регион – страна находится в статусе с развивающейся экономикой и является мировым лидером по добыче большого перечня различных полезных ископаемых.

В представленном исследовании продемонстрировано влияние горнодобывающего сектора на экономику страны. Основываясь на анализе результатов, полученных в ходе выполнения данной работы, можно заключить, что перспективы добычи полезных ископаемых постепенно стабилизируются после пан-



демии COVID-19. Так, вслед за развитием экономики Китая и ростом иностранных инвестиций ряд китайских компаний стали широко известны в мировой горнодобывающей промышленности.

В последние годы Китай всё больше зависит от импорта природных ресурсов. Это связано с сочетанием факторов, включая рост населения, быстрый экономический рост и сдвиг в энергетическом балансе страны от угля к возобновляемым источникам энергии. В результате Китай в настоящее время является крупнейшим в мире импортёром природных ресурсов, при этом импорт полезных ископаемых, сельскохозяйственной продукции и ископаемого топлива в последние годы только увеличивается.

Для достижения поставленных целей разработанного 14-го пятилетнего плана стране необходимо ориентироваться в том числе на более активное развитие экологически чистой энергии, включая энергию ветра, фотоэлектрическую энергию, гидроэнергетику и атомную энергетику, провести структурную реформу и ликвидацию устаревших мощностей в отраслях с высоким энергопотреблением (сталелитейная, нефтехимическая и химическая).

В качестве продолжения данного исследования будущие работы будут направлены на углубленное изучение каждого рассмотренного в работе сектора добычи полезных ископаемых в КНР и его детализированный анализ.

Список литературы

1. Cucchisi J.L. *The causes and effects of the Chinese Civil War, 1927–1949*. South Orange, New Jersey: Seton Hall University. 84 p. URL: <https://scholarship.shu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3416&context=dissertations> (Дата обращения: 01.11.2022)
2. Пу Ц. Помощь СССР Китаю в области промышленности в 1950-е гг. *Манускрипт*. 2018;(5):45–49. <https://doi.org/10.30853/manuscript.2018-5.9>
3. Муромцева З.А. Реформа государственного сектора КНР: совершенствование системы современных государственных предприятий. В: *40 лет экономических реформ в КНР*. Москва, 01–02 апреля 2019 г. М.: Институт Дальнего Востока Российской академии наук; 2020. С. 76–89.
4. Евдошенко Ю.В. Внешнеэкономические проекты сталинской поры: нефть Синьцзяна и Советский Союз (1935–1955 гг.). *Экономическая история: ежегодник*. 2021;2020:264–318.
5. Zhang B., Yao J., Lee H.-J. Economic impacts and challenges of Chinese mining industry: an input-output analysis. *Frontiers in Energy Research*. 2022;10:784709. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.784709>
6. Hu R., Liu J., Zhai M. *Mineral resources science in China: A roadmap to 2050*. Beijing, Berlin: Science Press Springer; 2010. 86 p.
7. Zhai M. G., Hu R. Z., Wang Y., et al. Mineral resource science in China: review and perspective. *Geography and Sustainability*. 2021;2(2):107–114. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.002>
8. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*. 2019;10(4):1285–1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
9. Xu M. *Analysis: Quantity over quality – China faces power supply risk despite coal output surge*. Reuters. June 21, 2022. URL: <https://www.reuters.com/markets/commodities/quantity-over-quality-china-faces-power-supply-risk-despite-coal-output-surge-2022-06-21/> (Дата обращения: 01.11.2022)
10. China Energy Portal. *2021 electricity & other energy statistics (preliminary)*. 2022. URL: <https://chinaenergyportal.org/en/2021-electricity-other-energy-statistics-preliminary/> (Дата обращения: 01.11.2022)
11. Britannica. *Minerals of China*. URL: <https://www.britannica.com/place/China/Minerals> (Дата обращения: 01.11.2022)
12. Кондратьев В.Б. Ситуация на мировом рынке угля в период восстановления мировой экономики после кризиса COVID-19. *Горная промышленность*. 2021;(4):84–92. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-84-92>
13. Цянь Ч., Прокофьева Л.М. «Черное золото» Китая. *Азия и Африка сегодня*. 2011;(3):42–47.
14. Yuan S., Wang Q. New progress and prospect of oilfields development technologies in China. *Petroleum Exploration and Development*. 2018;45(4):698–711. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(18\)30073-9](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(18)30073-9)
15. Евдошенко Ю.В. Нефть Синьцзяна и нефтекомбинат «Тушанцзы». Об организации добычи и переработки нефти в Северо-Западном Китае в 1938–1943 гг. *Нефтяное хозяйство*. 2020;(2):108–112. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-2-108-112>
16. Коржубаев А.Г. О перспективах сотрудничества России и Китая в нефтегазовой сфере. *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2011;(5):32–36.
17. Никитина М.Г. Нефтяная дипломатия китайской народной Республики. *Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия: Экономика и управление*. 2014;27(1):94–100. URL: <http://sn-ecoman.cfuv.ru/wp-content/uploads/2017/04/010nikitina.pdf>
18. Li J., She Y., Gao Y., et al. Natural gas industry in China: development situation and prospect. *Natural Gas Industry B*. 2020;7(6):604–613. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2020.04.003>
19. Zhen W., Yinghao K., Wei L. Review on the development of China's natural gas industry in the background of “carbon neutrality”. *Natural Gas Industry B*. 2022;9(2):132–140. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.021>
20. Wang J., Feng L., Zhao L., Snowden S. China's natural gas: resources, production and its impacts. *Energy Policy*. 2013;55:690–698. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.034>



21. Zhang J., Meerman H., Benders R., Faaij A. Potential role of natural gas infrastructure in China to supply low-carbon gases during 2020–2050. *Applied Energy*. 2022;306(A):117989. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117989>
22. В мировой “столице вольфрама” – пров. Цзянси – разведка на новом крупном вольфрамовом месторождении дала хорошие результаты. *Жэньминь Жибао*. 2013. URL: <http://russian.people.com.cn/31518/8271841.html> (Дата обращения: 01.11.2022)
23. Полеванов В. П. Золотой путь Китая. *Золото и технологии*. 2016;(2):30–34.
24. Wang D.-H., Dai H.-Z., Liu S.-B., et al. Research and exploration progress on lithium deposits in China. *China Geology*. 2020;(3):137–152. <https://doi.org/10.31035/cg2020018>
25. Lightfoot P.C., Bagas L., Nie F.J. Gold deposits of China: a special issue of ore geology reviews. *Ore Geology Reviews*. 2016;73(2):175–178. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.07.025>
26. Mitchell J. China’s stranglehold of the rare earths supply chain will last another decade. *Mining Technology*. April 26, 2022. URL: <https://www.mining-technology.com/analysis/china-rare-earth-dominance-mining/> (Дата обращения: 01.11.2022)
27. Почему редкоземельные элементы стали оружием в экономической войне США и Китая. *Euronews*. 2019. URL: <https://ru.euronews.com/2019/08/16/rare-earth-elements-ru> (Дата обращения: 01.11.2022)
28. Li H.-T., Yang K.-F., Gao Y.-P., et al. Age and origin of the H9 member from the Bayan Obo Group: Implications for the genesis of the giant Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, China. *Ore Geology Reviews*. 2022;146:104927. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104927>
29. Fan H.R., Yang K.F., Hu F.F., et al. The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: Controversy and ore genesis. *Geoscience Frontiers*. 2016;7(3):335–344. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.11.005>
30. Лобазов А., Федорова М. *Китай. Кузница глобальных металлургических трендов*. М.: ООО «Атон»; 2021. 24 с.
31. China to boost coal output, reserves to ensure power supply – NDRC. *Reuters*. March 7, 2022. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/china-boost-coal-output-reserves-ensure-power-supply-ndrc-2022-03-05/> (Дата обращения: 01.11.2022)
32. Top five coal producing countries (million tonnes, 2021). *GlobalData*. 2021. URL: <https://www.globaldata.com/data-insights/mining/the-top-five-coal-producing-countries-million-tonnes-2021/> (Дата обращения: 01.11.2022)
33. Мамышева Д.К. Основные аспекты сотрудничества Китая и Латинской Америки в энергетическом секторе. *Инновации и инвестиции*. 2021;(3):72–75.

References

1. Cucchisi J.L. *The causes and effects of the Chinese Civil War, 1927–1949*. South Orange, New Jersey: Seton Hall University. 84 p. URL: <https://scholarship.shu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3416&context=dissertations> (Accessed: 01.11.2022)
2. Pu J. Soviet assistance to Chinese industry in the 1950s. *Manuscript*. 2018;(5):45–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.30853/manuscript.2018-5.9>
3. Muromtseva Z.A. Reform of the public sector in china: improving the system of modern state-owned enterprises. In: *40 years of economic reforms in the PRC*. Moscow, April 01–02, 2019. Moscow: Institute of the Far East of the Russian Academy of Sciences; 2020. Pp. 76–89. (In Russ.)
4. Yevdoshenko Yu.V. Foreign economic projects of the Stalin era: Xinjiang oil and the Soviet Union, 1935–1955. *Economic History: a Yearbook*. 2021;2020:264–318.
5. Zhang B., Yao J., Lee H.-J. Economic impacts and challenges of Chinese mining industry: an input-output analysis. *Frontiers in Energy Research*. 2022;10:784709. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.784709>
6. Hu R., Liu J., Zhai M. *Mineral resources science in China: A roadmap to 2050*. Beijing, Berlin: Science Press Springer; 2010. 86 p.
7. Zhai M.G., Hu R.Z., Wang Y., et al. Mineral resource science in China: review and perspective. *Geography and Sustainability*. 2021;2(2):107–114. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.002>
8. Balam V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*. 2019;10(4):1285–1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
9. Xu M. *Analysis: Quantity over quality – China faces power supply risk despite coal output surge*. Reuters. June 21, 2022. URL: <https://www.reuters.com/markets/commodities/quantity-over-quality-china-faces-power-supply-risk-despite-coal-output-surge-2022-06-21/> (Accessed: 01.11.2022)
10. China Energy Portal. *2021 electricity & other energy statistics (preliminary)*. 2022. URL: <https://chinaenergyportal.org/en/2021-electricity-other-energy-statistics-preliminary/> (Accessed: 01.11.2022)
11. Britannica. *Minerals of China*. URL: <https://www.britannica.com/place/China/Minerals> (Accessed: 01.11.2022)
12. Kondratiev V.B. Situation on the global coal market during the recovery of the world economy after the COVID-19 crisis. *Russian Mining Industry*. 2021;(4):84–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-84-92>
13. Tzian Ch., Prokofieva L.M. “Black Gold” of China. *Asia and Africa Today*. 2011;(3):42–47. (In Russ.)



14. Yuan S., Wang Q. New progress and prospect of oilfields development technologies in China. *Petroleum Exploration and Development*. 2018;45(4):698–711. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(18\)30073-9](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(18)30073-9)
15. Evdoshenko Yu. V. Xinjiang oil and the “Dushantsi” oil processing plant. Oil production and processing in northwest China in 1938–1943. *Oil Industry*. 2020;(2):108–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-2-108-112>
16. Korzhubaev A. G. Cooperation prospects of Russia and China in oil and gas industry. *Problems of Economics and Management of Oil and Gas Complex*. 2011;(5):32–36. (In Russ.)
17. Nikitina M. G. Petroleum diplomacy of the People’s Republic of China. *Uchenyye Zapiski Tavricheskogo Natsional’nogo Universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Seriya: Ekonomika i Upravleniye*. 2014;27(1):94–100. (In Russ.) URL: <http://sn-ecoman.cfuv.ru/wp-content/uploads/2017/04/010nikitina.pdf>
18. Li J., She Y., Gao Y., et al. Natural gas industry in China: development situation and prospect. *Natural Gas Industry B*. 2020;7(6):604–613. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2020.04.003>
19. Zhen W., Yinghao K., Wei L. Review on the development of China’s natural gas industry in the background of “carbon neutrality”. *Natural Gas Industry B*. 2022;9(2):132–140. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.021>
20. Wang J., Feng L., Zhao L., Snowden S. China’s natural gas: resources, production and its impacts. *Energy Policy*. 2013;55:690–698. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.034>
21. Zhang J., Meerman H., Benders R., Faaij A. Potential role of natural gas infrastructure in China to supply low-carbon gases during 2020–2050. *Applied Energy*. 2022;306(A):117989. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117989>
22. In the world “Tungsten Capital” – Jiangxi Province – exploration at a new large tungsten deposit produced good results. *Rénmín Ribào*. 2013. URL: <http://russian.people.com.cn/31518/8271841.html> (Accessed: 01.11.2022)
23. Polevanov V. P. China’s Golden Path. *Gold and Technology*. 2016;(2):30–34. (In Russ.)
24. Wang D.-H., Dai H.-Z., Liu S.-B., et al. Research and exploration progress on lithium deposits in China. *China Geology*. 2020;(3):137–152. <https://doi.org/10.31035/cg2020018>
25. Lightfoot P. C., Bagas L., Nie F. J. Gold deposits of China: a special issue of ore geology reviews. *Ore Geology Reviews*. 2016;73(2):175–178. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.07.025>
26. Mitchell J. China’s stranglehold of the rare earths supply chain will last another decade. *Mining Technology*. April 26, 2022. URL: <https://www.mining-technology.com/analysis/china-rare-earth-dominance-mining/> (Accessed: 01.11.2022)
27. What are rare earth elements and why are they so important in the us-china trade war? *Euronews*. (In Russ.) URL: <https://ru.euronews.com/2019/08/16/rare-earth-elements-ru> (Accessed: 01.11.2022).
28. Li H.-T., Yang K.-F., Gao Y.-P., et al. Age and origin of the H9 member from the Bayan Obo Group: Implications for the genesis of the giant Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, China. *Ore Geology Reviews*. 2022;146:104927. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104927>
29. Fan H. R., Yang K. F., Hu F. F., et al. The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: Controversy and ore genesis. *Geoscience Frontiers*. 2016;7(3):335–344. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.11.005>
30. Lobazov A., Fedorova M. *China. Forge of global metallurgical trends*. Moscow: LLC “Aton”; 2021. 24 p. (In Russ.)
31. China to boost coal output, reserves to ensure power supply – NDRC. *Reuters*. March 7, 2022. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/china-boost-coal-output-reserves-ensure-power-supply-ndrc-2022-03-05/> (Accessed: 01.11.2022)
32. Top five coal producing countries (million tonnes, 2021). *GlobalData*. 2021. URL: <https://www.globaldata.com/data-insights/mining/the-top-five-coal-producing-countries-million-tonnes-2021/> (Accessed: 01.11.2022)
33. Mamysheva D. K. Key aspects of China – Latin America cooperation in the energy sector. *Innovation & Investment*. 2021;(3):72–75. (In Russ.)

Информация об авторе

Александр Константинович Кирсанов – кандидат технических наук, доцент кафедры шахтного и подземного строительства, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7977-4954](https://orcid.org/0000-0001-7977-4954), Scopus ID [56825475600](https://scopus.com/authorid/56825475600), ResearcherID [A-7720-2016](https://orcid.org/A-7720-2016); e-mail AKirsanov@sfu-kras.ru

Information about the author

Aleksandr K. Kirsanov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Mine and Underground Construction, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7977-4954](https://orcid.org/0000-0001-7977-4954), Scopus ID [56825475600](https://scopus.com/authorid/56825475600), ResearcherID [A-7720-2016](https://orcid.org/A-7720-2016); e-mail AKirsanov@sfu-kras.ru

Поступила в редакцию	22.11.2022	Received	22.11.2022
Поступила после рецензирования	27.02.2023	Revised	27.02.2023
Принята к публикации	13.03.2023	Accepted	13.03.2023



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обзорная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-83>

УДК 622.3:546.831:339.13

**Обзор циркониевой отрасли России:
состояние, проблемы обеспечения сырьем****В. Ю. Хатьков¹  , Г. Ю. Боярко²   , Л. М. Болсуновская²  ,
А. М. Дибров³ , Ю. А. Диброва²  **¹ ПАО «Газпром», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация³ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация gub@tpu.ru**Аннотация**

Актуальность работы обусловлена наличием в течение длительного времени импортозависимости России по циркониевому сырью, осложняемой встречными потоками тотального импорта цирконового концентрата и экспорта значительной доли бадделеитового концентрата.

Цель: изучение динамики товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) циркониевого сырья в России, его цен (мировых и российских), сырьевой базы циркония России и перспектив национального производства ее добычи и переработки.

Методы: статистический, графический, логический.

Результаты: Россия импортирует подавляющее количество (98–100 %) потребляемого цирконового концентрата (3,5–14,9 тыс. т/год). Лишь в 2022 г. началось массовое национальное производство селективного цирконового концентрата при разработке Туганского титан-циркониевого месторождения, что позволит уже в 2023 г. закрыть до 30 % потребности России в циркониевом сырье, а дальнейшее строительство 2-й очереди Туганского ГОКа приведет к увеличению его предложения до 15 тыс. т/год, что полностью перекроет российские потребности в циркониевом сырье. В то же время концентрат бадделеита (природный оксид циркония), извлекаемый попутно при обогащении апатит-магнетитовых руд на Ковдорском ГОКе, до 2017 г. практически весь (96–100 %) отправлялся на экспорт (4,0–9,3 тыс. т/год) и лишь с 2018 г. наметилось снижение экспортных поставок и увеличение его национального потребления (до 60 % от производства).

В 2022 г. прекратился импорт цирконового концентрата с Украины и осложнились его поставки из недружественных стран. Для покрытия временного дефицита российского потребления цирконового концентрата (3–5 тыс. т/год) возможны поставки от независимых производителей из дружественных стран, в том числе и по схеме параллельного импорта. Снижение временного дефицита циркониевого сырья возможно также переориентированием части экспортного потока бадделеитового концентрата на российские нужды.

На территории России имеются подготовленные месторождения, включающие полезный циркониевый компонент, но для всех них имеются экономические и технологические сложности их освоения. Это Лукояновское, Бешпагирское, Туганское, Центральное и Тарское титан-циркониевые погребенные россыпные месторождения, Катугинское, Улуг-Танзегское, Зашихинское и Сахарйокское комплексные рудные цирконсодержащие редкометалльно-редкоземельные месторождения, участок эвдидальтовых руд Аллуайв на Ловозерском редкометалльном месторождении.

Кроме развития уже организованных добычных работ на Туганском титан-циркониевом месторождении, ведутся работы по подготовке Зашихинского месторождения, где при обогащении тантал-редкоземельных руд будет дополнительно извлекаться до 8 тыс. т/год цирконового концентрата.

Возможно также создание зарубежных совместных предприятий по добыче циркониевого и титанового сырья в дружественных странах (во Вьетнаме и ЮАР) для последующих поставок добытого сырья в Россию. Намечившийся тренд снижения импортозависимости России по циркониевому сырью, а в дальнейшем и полная ее ликвидация позволят нарастить потребление циркона и оксидов циркония в самом емком направлении их использования – для глушения глазури керамической плитки. Наличие независимой и достаточной национальной добывающей базы циркониевого сырья позволит развивать российское производство циркония металлического, циркониевых огнеупорных и абразивных продуктов, твердо-топливных энергетических элементов и других цирконийсодержащих приложений.

Ключевые слова

стратегическое сырье, импортозависимость, циркон, бадделеит, цирконий металлический, оксиды циркония, экспорт, национальные проекты



Благодарности

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

Для цитирования

Khatkov V. Yu., Boyarko G. Yu., Bolsunovskaya L. M., Dibrov A. M., Dibrova Yu. A. Russian zirconium industry: current issues in raw material supply. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):128–140. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-83>

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Review paper

Russian zirconium industry: current issues in raw material supply

V. Yu. Khatkov¹  , G. Yu. Boyarko²   , L. M. Bolsunovskaya²  ,
A. M. Dibrov³  , Yu. A. Dibrova²  

¹ PJSC «Gazprom» Russia, St. Petersburg, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

 gub@tpu.ru

Abstract

The relevance of the research is connected with Russia's long-term import dependence on zirconium raw materials.

Goal of this research: to study the dynamics of commodity flows (production, import, export, consumption) of Russian zirconium raw materials; its prices (world and Russian); the raw material base of zirconium in Russia and the prospects for national production of its extraction and processing.

Methods: statistical, graphic, logical.

Results: Russia imports the vast majority (3.5–14.9 kt/year or 98–100 % of consumption) of consumed zircon concentrate. At the same time, almost all of the baddeleyite mined in Russia (4.0–9.3 kt/year or 96–100 % of production) is exported. Since 2018 has there been a decrease in its export supplies and an increase in the national consumption (up to 60 % of production).

Russia has existing deposits, including a useful zirconium component, but all are connected with a certain economic and technological complexity in their development.

In 2022, the national production of selective zircon concentrate began during the development of the Tugan titanium-zirconium deposit. This deposit covers up to 30 % of Russia's demand for zirconium raw materials up to 2023. Furthermore, the construction of the 2-nd stage of the Tugan mining and processing plant will increase its supply to 15 kt/year. This will completely cover Russian demand for zirconium raw materials. Work is in progress on Zashikhinsky field preparation, where, in the course of enrichment of tantalum-rare-earth ores, up to 8 kt/year of zircon concentrate will be additionally extracted. The emerging trend of reducing Russia's import dependence on zirconium raw materials, and in the future its complete elimination will allow consumption of zircon and zirconium oxides to be increased in the most demanding area of their use – for dampening the glaze of ceramic tiles. The presence of an independent and sufficient national mining base of zirconium raw materials will allow Russian production of metal zirconium, zirconium refractory and abrasive products, solid fuel energy cells and other zirconium-containing applications to be developed.

Keywords

strategic raw materials, import dependence, zircon, baddeleyite, metal zirconium, zirconium oxides, export, national projects

Acknowledgements

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

For citation

Khatkov V. Yu., Boyarko G. Yu., Bolsunovskaya L. M., Dibrov A. M., Dibrova Yu. A. Russian zirconium industry: current issues in raw material supply. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):128–140. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-02-83>



Введение

На рынке производства и потребления циркониевого сырья в России сложилась весьма сложная ситуация, обремененная высокими рисками сбоев обеспечения движения его товарных потоков.

Если в мировом циркониевом производстве основным направлением использования циркония является производство керамических изделий (54 %), противопожарных покрытий (14 %) и огнеупорных изделий (13 %) в литейном производстве [1], то в России свыше 60 % циркониевого минерального сырья используется в интересах атомной промышленности для производства металлического циркония [1, 2]. Цирконий включен в национальный перечень основных видов стратегического минерального сырья (Распоряжение Правительства РФ от 16 января 1996 г. № 50-р), а в Стратегии развития минерально-сырьевой базы России до 2030 года он относится к проблемной третьей группе дефицитных полезных ископаемых, внутреннее потребление которых в значительной степени обеспечивается вынужденным импортом (Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р).

Наибольшие сложности для циркониевой отрасли России возникли после распада СССР, когда основные поставки циркониевого сырья осуществлялись с действующих ГОКов (Вольногорский, Иршинский, Стрелиногорский, Междуреченский), расположенных на территории Украины. Если в 80-е годы XX в. в СССР ежегодно добывалось и перерабатывалось до 40 тыс. т цирконового концентрата (содержащего 65 % ZrO_2), то с 1991 г. он начал поступать в Россию только по импорту и к 2000 г. его российское потребление снизилось до 9 тыс. т/год [2].

В то же время в России на Ковдорском ГОКе в Мурманской области при разработке одноименного апатит-магнетитового месторождения осуществляется добыча 4–9,3 тыс. т/год попутного полезного ископаемого – бадделеитового концентрата (природного оксида циркония) [2], но большая его часть (2,4–9,3 тыс. т/год или 40–100 %) отправляется на экспорт.

Налицо тотальный дефицит цирконового сырья для нужд российских промышленных производств, покрываемый по импорту, и противоречия выгод экспорта российского бадделеитового концентрата и проблем внутрироссийских потребностей в этом продукте.

Необходимо разобраться в реальном текущем состоянии циркониевой отрасли России, учитывая риски последствий антироссийских экономических санкций ЕС и США.

Методика

С целью изучения российского рынка циркониевого сырья были собраны данные по мировой и российской добыче циркониевого сырья за период 1996–2020 гг., по динамике российских и мировых цен на циркониевые продукты за период 1996–2022 гг. Источники информации: бюллетени и обзоры-доклады Министерства природных ресурсов и экологии

России¹, базы данных внешней торговли Федеральной таможенной службы России², Геологической службы США³ и Британии⁴, информационной службы ООН⁵ и обзоры маркетинговых компаний⁶. Объемы добычи, производства, импорта, экспорта и потребления приводятся в метрических тоннах. Цены на циркониевые продукты приведены в USD за метрическую тонну конкретного товара. При расчете суммы циркониевых продуктов разного качества они приводятся в пересчете на 100 % ZrO_2 в метрических тоннах.

Состояние циркониевой отрасли России

Добыча. В мировой практике основным источником цирконового концентрата являются титан-циркониевые прибрежно-морские россыпные месторождения, весьма технологичные в отработке и обогащении рудных песков. Лидерами мировой добычи циркона являются Австралия (400–620 тыс. т/год), ЮАР (320–390 тыс. т/год), США (70–100 тыс. т/год) и Сенегал (50–100 тыс. т/год)⁷. В России, несмотря на достаточно подготовленную сырьевую базу разведанных месторождений титан-циркониевых песков, добыча циркона (силиката циркония, содержащего 65 % ZrO_2) не осуществлялась ввиду наличия устойчивого импортного потока цирконового (вместе с ильменитовым и рутиловым) концентрата с Украины. В 2007–2015 гг. осуществлялась опытно-промышленная эксплуатация Туганского титан-циркониевого месторождения в Томской области с годовым выпуском 79–936 т/год цирконового концентрата [2, 3]. В 2022 г. завершено строительство 1-й очереди Туганского ГОКа АО «Ильменит» (рис. 1) с производством на конец года 410 т цирконового концентрата и ожидаемым его выпуском 3,5–3,7 тыс. т в 2023 г., а это 30–35 % российской потребности в этом продукте. Планируемое в 2025 г. строительство 2-й очереди Туганского ГОКа позволит увеличить выпуск цирконового концентрата до 14,7 тыс. т/год, что полностью перекроет российские потребности в циркониевом сырье [3].

¹ Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Государственные доклады «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации». 2000–2020 гг. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

² Федеральная таможенная служба России. URL: <http://stat.customs.ru/analytics/>

³ Геологическая служба США (USGS). URL: [National Minerals Information Center | U.S. Geological Survey \(usgs.gov\)](https://www.usgs.gov/minerals-information-center)

⁴ Геологическая служба Британии (BGS). URL: [Commodities & statistics | MineralsUK \(bgs.ac.uk\)](https://www.bgs.ac.uk/commodities-and-statistics/mineralsuk)

⁵ UNdata. A world of information. URL: <https://data.un.org/Default.aspx>

⁶ TrendEconomy. URL: <https://trendeconomy.ru/>

⁷ Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Государственные доклады «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации». 2000–2020 гг. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

Бадделеит (природный оксид циркония) представляет собой редкий промышленный вид минерального сырья, тем не менее периодически разрабатываемый в корях выветривания карбонатитов месторождения Посус-ди-Калдас в Бразилии (40–50-е XX в.), попутно извлекаемый при обогащении апатит-медных руд карбонатитового месторождения Палабора в ЮАР (1964–2001 гг.). В России начиная с 1975 г. бадделеит извлекается при обогащении бадделеит-apatит-магнетитовых руд Ковдорского карбонатитового месторождения на одноименном ГОКе АО «МХК «Еврохим» (см. рис. 1) [2, 4]. Так как бадделеитовый концентрат является попутным полезным компонентом, объемы его выпуска практически не регулируются ввиду переменности качества состава руд (содержащего всего 0,13–0,16 % ZrO_2), управляемых по оптимизации выпуска главного товарного компонента – железорудного концентрата. Соответственно объемы выпуска бадделеитового концентрата переменны во времени (4,0–9,3 тыс. т/год) с трендами первоначального увеличения с локального минимума в 4,0 тыс. т в 1999 г. до максимума в 9,3 тыс. т в 2010 г. и последующего тренда снижения предложения вплоть до 6,0 тыс. т в 2020 г. (рис. 2).

В объемах добычи суммарного циркониевого сырья в России бадделеит составляет 99–100 %, доля

выпуска циркона не превышает 1,4 %. По отношению к мировому производству циркониевого сырья доля предложения от России составляет 0,6–1,1 %, колеблясь относительно среднего уровня в 0,8 % (рис. 3) – весьма малый вклад в объемах мирового потребления циркониевых продуктов (528–1127 тыс. т/год в пересчете на 100 % ZrO_2).

Импорт. Подавляющее количество цирконового концентрата (98–100 %) до 2021 г. включительно поставлялось в Россию по импорту (3,5–14,9 тыс. т/год), см. рис. 2. Основным товарный поток циркона осуществлялся с Украины (3,0–12,9 тыс. т/год или 43–94 %), что было обусловлено традиционностью привычных товарных потоков циркона и, в частности, его меньшей радиоактивностью по сравнению с цирконовым концентратом из ЮАР и США [5]. Но если в 1990-е и 0-е годы подавляющая доля импорта цирконового концентрата поступала с Украины (75–94 %), то в 10-е годы увеличиваются поставки из Нидерландов (до 32 %), Италии (до 24 %) и США (до 9 %), см. рис. 2. Появились небольшие импортные поставки цирконового концентрата из Индонезии, Китая, Казахстана. В 2022 г. прекратился импорт цирконового концентрата с Украины и осложнились его поставки из недружественных стран.



Рис. 1. Предприятия, добывающие, перерабатывающие и потребляющие циркониевое сырье, металлогенические провинции расположения цирконсодержащих россыпей и собственно месторождения циркония:

- 1 – металлогенические провинции расположения цирконсодержащих россыпей (I – Унеча-Крапивненская; II – Центрально-Черноземная; III – Пензенско-Муромская; IV – Лукьяновская; V – Северо-Кавказская; VI – Тиманская; VII – Зауральская; VIII – Тарская; IX – Западносибирско-Хатангская);
- 2 – титан-циркониевые россыпные месторождения;
- 3 – цирконсодержащие комплексные редкометалльные месторождения;
- 4 – бадделеитовые месторождения в карбонатитах;
- 5 – бадделеитовые месторождения в корях выветривания карбонатитов;
- 6 – предприятия, добывающие циркониевое сырье;
- 7 – металлургические предприятия по производству металлического циркония;
- 8 – другие предприятия, потребляющие циркониевое сырье

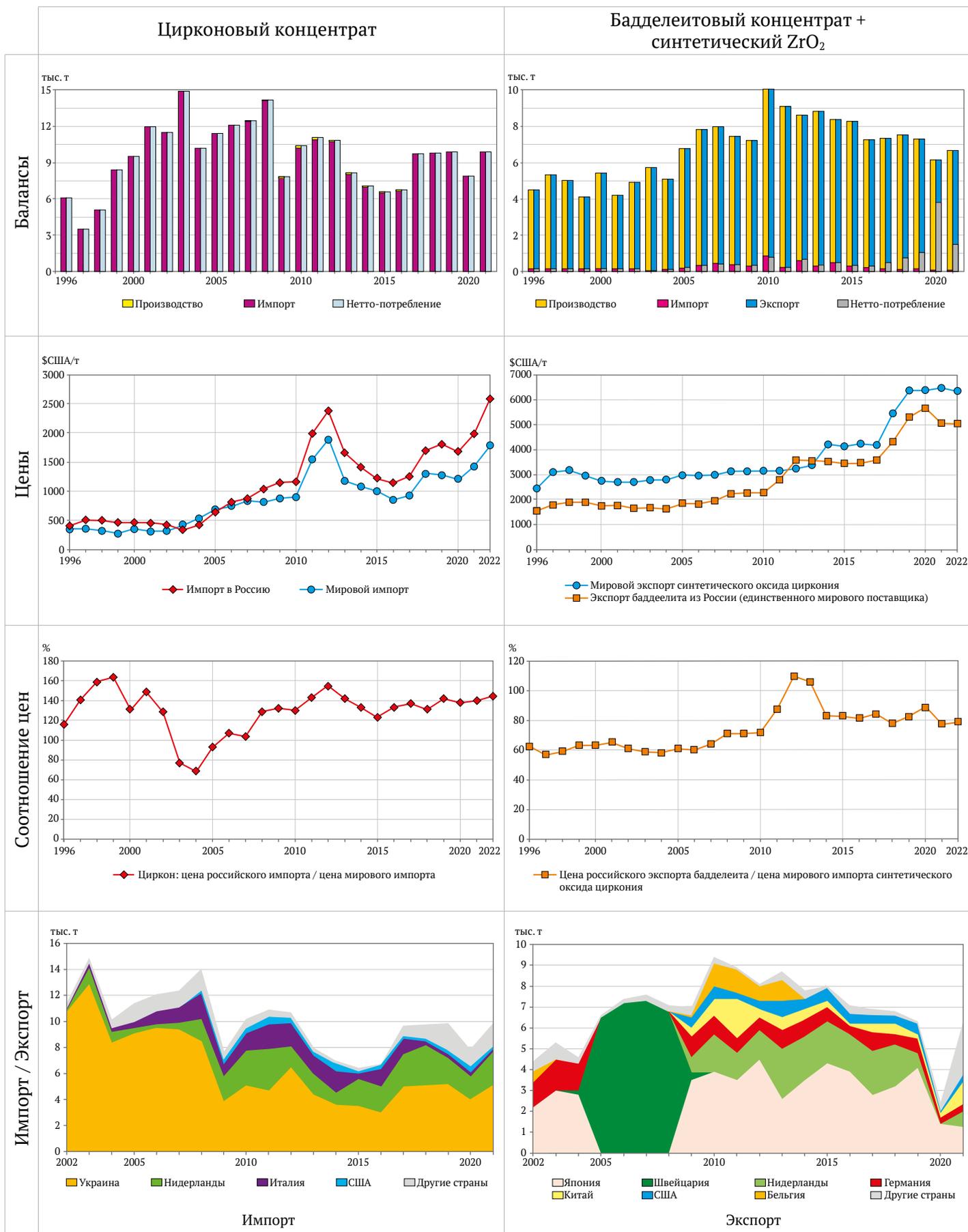


Рис. 2. Динамика показателей товарных потоков цирконового и бадделеитового концентратов за 1996–2021(2022) гг.

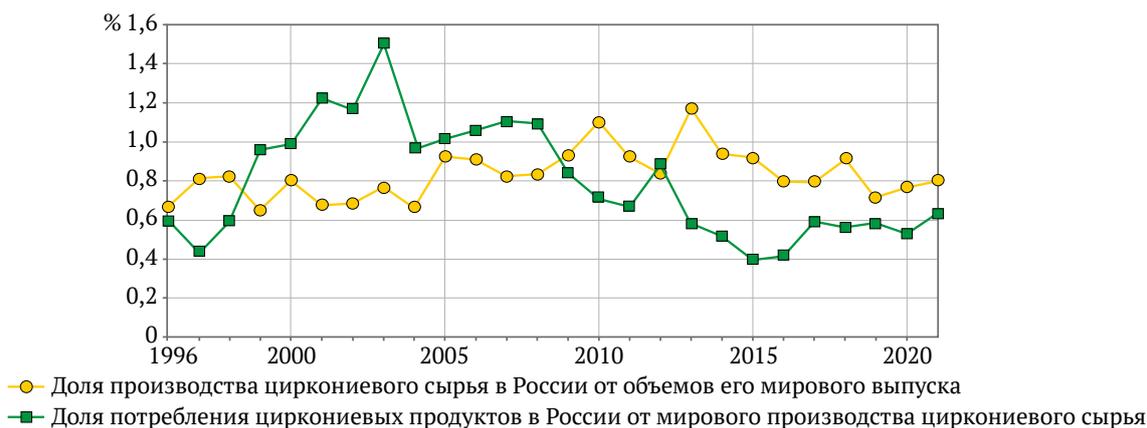


Рис. 3. Доли российского производства и потребления циркониевого сырья от объемов мирового его выпуска за 1996–2021 гг. (в пересчете на 100 % ZrO_2)

Средние цены мирового импорта для цирконового концентрата в 1996–2002 гг. находились на уровне 310–360 USD/т, в 2003 г. начался их рост на фоне увеличения его потребления в Китае (20 % мирового спроса в 2002 г. и 60 % в 2012 г.) вплоть до 1534 USD/т в 2012 г., причем мировой экономический кризис 2008–2009 гг. отразился на тренде роста цен на циркон лишь замедлением их увеличения (см. рис. 2). В дальнейшем на фоне уменьшения объемов потребления цирконового концентрата в Китае его среднемировые цены снизились до 860 USD/т в 2016 г., а в дальнейшем при возобновлении увеличения спроса возобновился их рост вплоть до 1780 USD/т в 2020 г.

Цена импортного цирконового концентрата лишь в 2003–2005 гг. (в начальный период роста его потребления в Китае) была ниже среднемировых цен экспорта на –24...–32 % (см. рис. 2). В остальные же годы имело место превышение цены российского импорта над мировыми на +20...+60 %, что уже трудно объяснить заявленным более высоким качеством украинского цирконового концентрата [5]. В целом же на фоне общего роста мировых цен стоимость российского импорта цирконового концентрата выросла с 2,6 млн USD в 1996 г. до 25,4 млн USD в 2012 г., а в дальнейшем на фоне спада объемов импорта составляла 8–18 млн USD/год.

Имеются также небольшие объемы импорта синтетического оксида циркония (аналога природного бадделеита) – 51–852 т/год (см. рис. 2), преимущественно высококачественных сортов. Импортируется также 96–172 т/год металлического циркония.

Экспорт. Бадделеитовый концентрат, производимый на АО «Ковдорский ГОК», до 2017 г. практически весь отправляется на экспорт (96–100 %), см. рис. 2. Этому способствовали достаточно высокий уровень мировых цен на него и ограниченные объемы мировой торговли природного и синтетического оксида циркония. Динамика экспортных поставок бадделеитового концентрата практически полностью повторяет тренды выпуска бадделеита с первоначальным увеличением с локального минимума в 4,0 тыс. т в 1999 г. до максимума в 9,3 тыс. т в 2010 г. и последующего тренда снижения экспорта вплоть до 6,9 тыс. т

в 2017 г., на затем их резкое сокращение до 2,6 тыс. т в 2020 г. (40 % от производства), см. рис. 2. Основными покупателями российского бадделеитового концентрата были Япония (до 65 % российского предложения), Нидерланды (до 30 %) и Германия (до 28 %), см. рис. 2. В 2005–2008 гг. экспортный поток бадделеитового концентрата из России проходил через посреднические компании в Швейцарии, см. рис. 2.

В целом же рынок международной торговли оксидами циркония (природными + искусственными) относительно небольшой – 29–52 тыс. т/год, что соответствует 3,9–6,3 % мирового производства/потребления циркониевого сырья (в пересчете на ZrO_2), рис. 4. Доля же российского экспорта бадделеита (4,8–9,3 тыс. т) в мировой торговле оксидов циркония составляет 12–22 % (см. рис. 4).

Цены мировой торговли для синтетического оксида циркония длительный период (1996–2013 гг.) находились примерно на одном уровне 2700–3350 USD/т, после чего наблюдаются скачки роста цен с последующей стабильностью их уровня 4200–4300 USD/т в 2014–2017 гг. и 6400–6500 USD/т в 2019–2022 гг. (см. рис. 2). Мировой экономический кризис 2008–2009 гг. совершенно не отразился на динамике цен на оксиды циркония. Возрастание же цен на оксиды циркония в 2013 и в 2018 гг. приходится на моменты снижения объемов российского производства и, соответственно, экспорта бадделеитового концентрата.

Цена экспорта российского бадделеитового концентрата в 2002–2010 гг. была ниже среднемировых цен импорта синтетического оксида циркония на –28...–48 % с тенденцией снижения во времени (см. рис. 2). В 2012–2013 гг. был единственный период превышения цен российского экспорта над среднемировыми ценами на 6–10 %, что обусловлено большей долей выхода керамических сортов произведенного в это время бадделеита. В 2014–2022 гг. российский бадделеитовый концентрат опять продавался со скидкой в +10...+22 %. Стоимость российского экспорта бадделеитового концентрата возрастала с 6,8 млн USD в 1996 г. до максимума 33,5 млн USD в 2019 г., но резко просела при падении экспортных объемов до 13,7 млн USD в 2020 г.

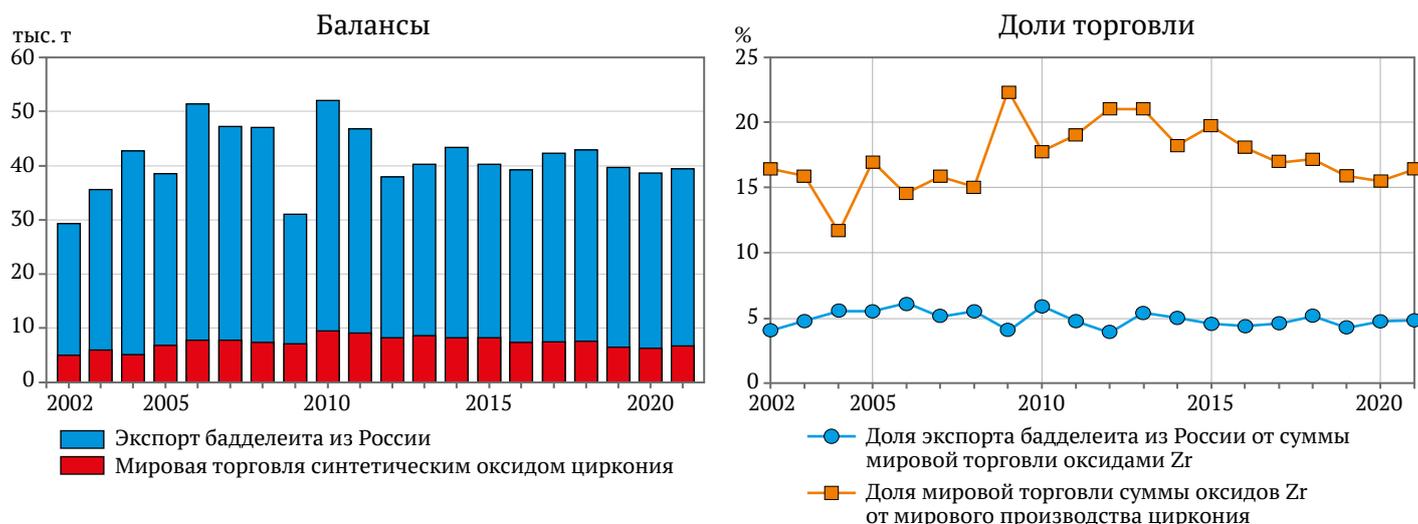


Рис. 4. Динамика балансов мировой торговли природным и синтетическим оксидами циркония, а также доли экспорта бадделейта из России от суммы мировой торговли оксидами циркония и доли мировой торговли оксидами циркония от мирового производства циркониевого сырья за 2002–2021 гг. (в пересчете на 100 % ZrO_2)

Потребление. Главным потребителем импортного и отечественного *цирконового концентрата* в России является АО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов, Республика Удмуртия), выпускающий металлический цирконий и изделия из него для нужд атомной промышленности, а также синтетический диоксид циркония. На Чепецком МЗ в 10-е годы XXI в. ежегодно производилось до 3 тыс. т металлического циркония [2], получаемого при переработке до 5,0 тыс. т цирконового концентрата⁸ [5].

ООО «Керама Марацци» на Орловском заводе керамической плитки цирконового концентрат используется для глушения эмали керамической плитки с потреблением 0,8–1,3 тыс. т/год⁹.

АО «Ключевский ферросплавный завод» (пос. Двуреченск, Свердловская область), ежегодно выпускает до 150 т ферросиликоциркония для раскисления стали и повышения ее прочности с потреблением до 250 т цирконового концентрата [6].

Цирконового концентрат используется также для изготовления противопожарной краски покрытий тиглей и изложниц непосредственно на предприятиях черной и цветной металлургии [7], но статистики по объемам этого направления употребления не имеется.

Значительная часть импортного цирконового концентрата (3–5 тыс. т/год) перерабатывается на диоксид циркония для использования в производстве огнеупорных материалов и керамики.

Переработка цирконового концентрата на диоксид циркония (в т.ч. с допированием кальцием или иттрием) производится на российских предприятиях: АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина» и ООО «Технокерамика» (г. Обнинск, Калужская область), АО «Динур» (г. Первоуральск, Свердловская область).

⁸ Федеральная таможенная служба России. URL: <http://stat.customs.ru/analytics/>

⁹ Там же.

ООО «Технокерамика» кроме оксидов циркония выпускает абразивные материалы из оксидов циркония (Zirco+).

АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина» производит огнеупорные материалы на основе оксидов циркония: керамическая плёнка из диоксида циркония, пористые элементы и диафрагмы для электрохимической очистки воды, слоистые структуры с покрытиями на основе диоксида циркония для изолирующих или герметизирующих элементов для электрохимических устройств, сопла и втулки для установок распыления металлических расплавов, твёрдые электролиты электрохимических твёрдооксидных топливных элементов и кислородных насосов, датчиков концентрации кислорода в расплавах металлов, тигли для черной и цветной металлургии для проведения термообработки различных материалов, электрохимические элементы в датчиках кислорода динамического типа бортовых систем безопасности и жизнеобеспечения и в атомной энергетике.

АО «НТЦ «Бакор» (г. Москва), АО «Шербинский завод электроплавящихся огнеупоров» (г. Щербинка, Московская область) и АО «Боровичский комбинат огнеупоров» (г. Боровичи, Новгородская область) производит корундооксидциркониевые огнеупорные изделия и мортели (насыпные огнеупоры) для стекольной промышленности, а также изделия для непрерывной разливки стали на основе диоксида циркония или с добавкой циркона.

По динамике российского потребления цирконового концентрата наблюдается значительный рост потребления с 3,5 тыс. т в 1997 г. до 15 тыс. т в 2004 г. со стабилизацией на уровне 10–12 тыс. т/год до 2012 г. с кризисной просадкой до 7,7 тыс. т в 2009 г., после чего потребление этого товарного продукта колеблется в интервале 8–11 тыс. т/год (см. рис. 2). В пересчете на 100 % ZrO_2 минимальное годовое потребление циркона



составляло 3,2 тыс. т в 1997 г., максимальное – 9,7 тыс. т в 2003 г., последнее в 2020 г. – 6,4 тыс. т (см. рис. 1).

В динамике российского собственно первичного предложения оксидов циркония (бадделеита + импорта синтетического оксида циркония) наблюдается рост потребления с 0,15 тыс. т в 1996 г. до 3,8 тыс. т в 2020 г. (см. рис. 2).

При переработке на российских предприятиях импортного циркона на оксиды к реализации направляется еще 2–3,5 тыс. т/год и, таким образом, если к 2010 г. суммарное потребление оксидов циркония в России составляло до 1 тыс. т [8], то в 2020 г. – 7,3 тыс. т/год.

В целом, используя национальное и импортное циркониевое сырье, на производство металлического циркония используется 30–60 % потребляемых сырьевых продуктов, на огнеупорные изделия – 40–60 %, на керамику – до 20 %, на абразивные материалы – до 5 %, на ферросплавы – до 2 %.

В то же время в мировой практике свыше 50 % направляется в производство массовых керамических изделий для глушения эмали, повышения ее прочности и снижения теплопроводности [9]. Это направление использования сдерживается в российских условиях именно тотальной импортозависимостью по циркониевому сырью [10], но опыт создания масштабного производства керамической плитки на Орловском заводе ООО «Керама Марацци», приведший к взрывному росту объемов ее производства и потребления в России в 2013–2015 гг., свидетельствует о насущной востребованности этой продукции и, соответственно, возрастании спроса на циркониевые и бадделеитовые сырьевые продукты.

Тотальная импортозависимость России по циркониевому сырью сдерживает и другие направления использования циркониевых продуктов:

- производство порошков карбида циркония [11] и диборида циркония [12] для изготовления абразивных материалов, износостойких покрытий и в составе твердых сплавов;

- использование оксидов циркония (допированных иттрием или скандием) в качестве твердых электролитов, устойчивых при высоких температурах в твердоотопленных элементах преобразования химической энергии углеводородного топлива в электричество и тепло [13];

- гидрохимическое производство порошков оксида циркония стабилизированных магнием для изготовления термостойкого композиционного керамического материала [14].

Минерально-сырьевая база. В мировом пространстве в настоящее время разрабатывается только один тип циркониевых месторождений – современные прибрежно-морские *титан-циркониевые россыпи* с минимальными объемами вскрыши. На территории России также известны титан-циркониевые россыпи, но практически все они являются погребенными и с эпигенетическими изменениями свойств полезных минералов [15], что осложняет их разработку и снижает экономическую привлекательность для инвесторов. Наиболее привлекательными

из них по качеству и количеству циркониевого сырья являются¹⁰ [2]:

- Лукояновское месторождение в Нижегородской области, содержащее в песках в среднем 13 кг/м³ циркония, запасы 389 тыс. т ZrO₂;

- Бешпагирское месторождение в Ставропольском крае, 7,84 кг/м³, 166 тыс. т;

- Туганское месторождение в Томской области, 7,65 кг/м³, 1007 тыс. т;

- Центральное месторождение в Тамбовской области, 6,7 кг/м³, 830 тыс. т;

- Тарское месторождение в Омской области, 6,37 кг/м³, 181 тыс. т.

В настоящее время завершено строительство 1-й очереди Туганского ГОКа АО «Ильменит» и начата промышленная эксплуатация Туганского титан-циркониевого месторождения с годовым выпуском до 3,7 тыс. т цирконового концентрата, до 11,4 тыс. т ильменитового концентрата, до 0,8 тыс. т рутилового концентрата и до 220 тыс. м³ строительного песка [3]. Лукояновское, Бешпагирское и Центральное месторождения в настоящее время находятся в нераспределенном фонде недр.

Возможны и проекты освоения титан-циркониевых россыпных месторождений в дружественных странах – во Вьетнаме (месторождения Кам-Хоа, Ки-Нинь, Ке-Сунг и др.) [16], а также в ЮАР, где имеется опыт создания российско-африканских добывающих предприятий (импортирующих в Россию марганцевые руды) [17].

Бадделеитовые руды в карбонатитовых месторождениях, единственное месторождение которых разрабатывается в России, – Ковдорское в Мурманской области, включают значительные запасы циркония (2182 тыс. т ZrO₂), но разрабатываются как попутный компонент из комплексных апатит-магнетитовых руд (среднее содержание 0,15 % ZrO₂)¹¹ [2]. Причем ввиду статуса попутного сырья для бадделеита имеют место невысокие показатели его извлечения в концентрат (30–40 %) и формирование хвостов, богатых этим минералом. На Ковдорском ГОКе к настоящему времени сформировалось техногенное месторождение, включающее 34 тыс. т ZrO₂. Поэтому требуется продолжить работы по разработке технологий обогащения бадделеитсодержащих руд с повышением его извлечения в концентрат.

В России известно и чисто бадделеитовое месторождение – Алгама в Хабаровском крае, являющееся генетическим аналогом (коры выветривания карбонатитов) месторождения Посус-ди-Калдас в Бразилии [18]. Но Алгаминское месторождение находится в отдаленной местности вне транспортных коммуникаций, не разведывалось и вряд ли в ближайшее время будет представлять промышленный интерес.

¹⁰ Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Государственные доклады «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации». 2000–2020 гг. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

¹¹ Там же.



В России ранее были разведаны и другие типы комплексных рудных месторождений, включающих значительную минерализацию циркона¹². Из них следует отметить:

– Катугинское циркон-пироксид-криолитовое месторождение в Забайкальском крае, с запасами 3086 тыс. т ZrO_2 при среднем содержании 1,6 % ZrO_2 ;

– Улуг-Танзегское циркон-пироксид-колумбитовое месторождение в Республике Тыва, 2900 тыс. т, 0,4 % ZrO_2 ;

– Зашихинское циркон-пироксид-колумбитовое месторождение в Иркутской области, 282 тыс. т, 0,46 % ZrO_2 .

– месторождение Сахарйок в Мурманской области с ресурсами 1625 тыс. т ZrO_2 .

Комплексные месторождения достаточно сложны в части обогащения их руд, селективности извлечения полезных минералов и компонентов и, что особенно рискованно, трудности управления объемами выпуска индивидуальных товарных продуктов, особенно в условиях изменений цен на них. Обычно выделяется главный товарный продукт, по которому планируется осуществление основного технологического процесса обогащения с оптимальным его выходом по качеству и количеству, а все остальные минеральные продукты учитываются по факту их выпуска как попутных компонентов. Для Катугинского и Улуг-Танзегского месторождений главным привлекательным компонентом комплексных руд является ниобий, для Зашихинского – тантал, и, таким образом, циркониевый продукт для этих объектов является второстепенным попутным полезным ископаемым.

В настоящее время на стадии доразведки и проектирования добывающего предприятия находится Зашихинское месторождение (владелец лицензии на недропользование – АО «Техноинвест Альянс»)¹³, причем главным привлекательным компонентом комплексных руд этого объекта в проекте является тантал (среднее содержание в рудах 0,03 % Ta_2O_5). Планируется годовой выпуск 8,2 тыс. т цирконового концентрата и 6 тыс. т пироксидового концентрата, содержащего 220 т Ta_2O_5 и 2,5 тыс. т Nb_2O_5 [19]. Катугинское и Улуг-Танзегское месторождения располагаются в отдаленных местностях и ввиду низкой инвестиционной привлекательности из-за сложности обогащения их руд находятся в нераспределенном фонде недр.

За рубежом цирконсодержащие комплексные рудные месторождения также становятся предметом инвестиционной привлекательности, особенно на фоне истощения большинства разрабатываемых титан-циркониевых россыпей, но для них существует та же проблема множественности выпуска товарных продуктов и привязки планирования производства к главному минеральному или товарному продукту.

¹² Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Государственные доклады «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации». 2000–2020 гг. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

¹³ Там же.

Подготавливаются к реализации проекты разработки месторождений, включающих извлечение цирконового концентрата: Тхор-Лэйк [20] и Стрейндж-Лейк [21] в Канаде, Беар Лодж в США [22], а также Зандкопсдриффт в ЮАР [23] и Танбриз в Гренландии [24] с главными компонентами в виде редкоземельных металлов.

Привлекательным становится и нетрадиционный тип циркониевого сырья – *эвдиалитовых руд*, известных на участке Аллуайв разрабатываемого Ловозерского редкометалльного месторождения. Ресурсы циркония в эвдиалитовых рудах на этом месторождении составляют 7275 тыс. т ZrO_2 при бортовом содержании 2,5 % ZrO_2 . Главным компонентом, извлекаемым из эвдиалитового концентрата, здесь является цирконий, второстепенными – редкоземельные материалы [25]. Положительным моментом проекта разработки Аллуайвского участка эвдиалитовых руд является наличие вблизи инфраструктуры действующего горнодобывающего комплекса, рисковыми же факторами – отсутствие предприятия по переработке эвдиалитового концентрата и вероятность объявления на территории горного отвода месторождения особо охраняемых геологических памятников природы (пегматитовые тела «Шкатулка» и «Юбилейная») по примеру эвдиалитового месторождения Пиланесберг в одноименном национальном парке ЮАР.

Месторождения эвдиалитовых руд подготавливаются к разработке за рубежом – проект Дурбо на месторождении Тунги в Австралии (главный компонент – цирконий) [26], проект Нечалачо в Канаде [27] и проект Кван-Фьельд в Гренландии [28] (главные компоненты – редкие земли).

Обсуждение и выводы

В России длительное время (с 1992 г.) на рынке циркония был полностью импортозависимый поток цирконового концентрата и преимущественно экспортноориентированный поток баделлеитового концентрата. Лишь в 2022 г. началось массовое национальное производство селективно извлеченного цирконового концентрата при разработке Туганского титан-циркониевого месторождения.

В списке последних политических санкций нет упоминаний по запрету торговли с Россией по циркониевым рудам и концентратам, но их поставки с Украины прекращены, а основные мировые производители циркониевого сырья либо являются недружественными (США, Австралия), либо контролируются последними (операторы Namakwa Sands и KZN Sands в ЮАР американской компании Tronox, QMM на Мадагаскаре австралийской Rio Tinto, Tizir в Сенегале французской Eramet и австралийской MDL, Moma Titanium Minerals в Мозамбике ирландской Kenmare). Тем не менее для покрытия временного дефицита российского потребления цирконового концентрата (3–5 тыс. т/год) возможны поставки от независимых производителей из дружественных стран. Требуется увеличивать объемы уже осуществляемых поставок цирконового концентрата из Индонезии и согласовывать новые потоки его импорта из Вьетнама, Шри Ланки, Индии, Бразилии, Намибии, Кении, Танзании и других стран, в том числе и по схемам параллельного импорта.



Перекрытие временного дефицита циркониевого сырья для российских нужд возможно также переориентированием товарного потока бадделеитового концентрата, производимого Ковдорским ГОКом, причем для выпуска, к примеру, металлического циркония его потребности составляют 2,2–3,3 тыс. т/год вместо 3,3–5,0 тыс. т/год цирконового концентрата [5]. Чепецкий МЗ уже с 2022 г. приступил к использованию бадделеитового концентрата.

При рассмотрении новых проектов производства циркониевого сырья имеются три группы предполагаемых объектов разработки: 1) традиционные рыхлые пески титан-циркониевых месторождений; 2) комплексные рудные редкометалльные месторождения, включающие извлекаемый полезный минерал – циркон, 3) комплексные редкометалльные месторождения эвдиалита, при переработке которого извлекается главный полезный компонент – цирконий.

Как уже отмечалось, разработка комплексных месторождений планируется исходя из выпуска главного полезного компонента, и объемы выпуска попутного цирконового концентрата становятся малоуправляемыми. Тем не менее осуществляемый проект освоения Зашихинского месторождения с танталом в качестве главного компонента реален в исполнении ввиду крайнего дефицита (полной импортозависимости) этого продукта, а при этом на реализацию будет поставляться дополнительно до 8 тыс. т/год цирконового концентрата. В отношении же эвдиалитового Ловозерского месторождения (участок Аллуайв), несмотря на высокие содержания циркония (главного компонента) вопрос освоения остается открытым, т.к. в настоящее время нет примеров промышленной переработки подобных руд, а только проекты и намерения разработки таких месторождений.

Наиболее перспективным направлением развития национальной добычи циркониевого сырья является освоение подготовленных титан-циркониевых россыпных месторождений. Запуск в эксплуатацию 1-й очереди Туганского ГОКа позволит начиная с 2023 г. выпускать до 3,5 тыс. т цирконового концентрата (30 % российской потребности в этом продукте), а дальнейшее строительство 2-й очереди ГОКа при-

ведет к увеличению его предложения до 15 тыс. т/год, что полностью перекроет российские потребности в циркониевом сырье. Ввиду возрастания российского спроса на циркониевое сырье возможно осуществление проектов разработки Центрального, Лукьяновского, Бешпагирского и Тарского россыпных титан-циркониевых месторождений, но при этом главными компонентами выпуска на них будут ильменитовый и рутиловый концентраты с подчиненным значением попутного цирконового концентрата. Главной проблемой освоения российских россыпных титан-циркониевых месторождений являются трудности в обеспечении удовлетворительного качества получаемых товарных концентратов. Одной из причин низкого качества концентратов является наличие на зернах циркона, ильменита и рутила новообразованных пленок лимонита, каолина и других экзогенных минералов. Эта проблема требует решения путем развития и применения новых технологий обогащения концентратов, что позволит повысить экономическую эффективность разработки российских россыпных месторождений.

Создание зарубежных совместных предприятий по добыче циркониевого и титанового сырья во Вьетнаме и ЮАР для последующих поставок добытого сырья в Россию возможно, но здесь возникает влияние фактора времени в координации с вводом в эксплуатацию новых национальных производств циркониевого и титанового сырья. Тем не менее вопрос их создания остается актуальным, а реализация этих проектов должна быть направлена не только на российские потребности в этом сырье, но и на их мировые рынки.

Наметившийся тренд снижения импортозависимости по циркониевому сырью, а в дальнейшем и ее ликвидация позволят нарастить потребление циркона и оксидов циркония в самом емком направлении их использования – для глушения глазури керамической плитки. Наличие независимой и достаточной национальной добывающей базы циркониевого сырья позволит развивать российское производство циркония металлического, циркониевых огнеупорных и абразивных продуктов, твердотопливных энергетических элементов и других цирконийсодержащих приложений.

Список литературы

1. Fedoseev S., Tsvetkov P., Sidorov N. Development potential of Russian zirconium industry on world markets. *Journal of business and retail management research*. 2017;12(1):41–48. URL: https://jbrmr.com/cdn/article_file/content_50624_17-10-04-21-28-12.pdf
2. Быховский Л.З., Ремизова Л.И., Чеботарева О.С. Циркониевое сырье России: состояние и перспективы освоения минерально-сырьевой базы. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2017;(2):11–18.
3. Кабанов А.А., Ахмадшин Н.Ю. Туганское месторождение – первенец промышленной разработки титаноциркониевых россыпей России. *Горный журнал*. 2021;(10):54–64.
4. Ларичкин Ф.Д., Воробьев А.Г., Новосельцева В.Д. и др. Цирконий: ресурсы, рынки, перспективы. *Цветные металлы*. 2013;(11):17–21.
5. Шаталов В.В., Никонов В.И., Коцарь М.Л. Перспективы сырьевого обеспечения ядерной энергетики России цирконием и гафнием до 2030 г. *Атомная энергия*. 2008;105(4):190–194. (Перев. вер.: Shatalov V.V., Nikonov V.I., Kotsar M.L. Prospects for zirconium and hafnium supplies for nuclear power in Russia up to 2030. *Atomic Energy*. 2008;105(4):242–247. <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9092-7>)
6. Boyarko G. Yu., Khatkov V. Yu., Bolsunovskaya L.M. The dynamics of ferroalloys commodity flows within Russia. *CIS Iron and Steel Review*. 2021;21:23–33. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2021.01.04>



7. Вдовин К.Н., Пивоварова К.Г., Понамарева Т.Б., Феоктистов Н.А. Совершенствование состава противопопригарной цирконового краской для стального литья. *Литейщик России*. 2018;(6):14–17.
8. Петров И.М. Потребление диоксида циркония для выпуска высокотехнологичной керамики. *Разведка и охрана недр.* 2011;(6):90–92.
9. Perks C., Mudd G. Titanium, zirconium resources and production: A state of the art literature review. *Ore Geology Reviews*. 2019;107:629–646. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.025>
10. Загайнов С.В., Рейнбах О.Е. Керамическая промышленность как основная отрасль потребления циркона. *Российский экономический интернет-журнал*. 2017;(1):1–9.
11. Alekseeva T.I., Galevsky G.V., Rudneva V.V., Galevsky S.G. Application of zirconium carbide: Assessment, determination of dominant trends and prospects. In: *20th International Scientific and Research Conference – Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality, metallurgy. iop Conference Series: Materials Science and Engineering*. 15–16 November, 2017. Novokuznetsk, Russia. 2018;411(119):012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012007>
12. Портнова Е.Н. Способы повышения механических характеристик керамики на основе диборидов циркония и гафния (обзор). *Вестник Пермского университета. Серия: Химия*. 2020;10(2):180–190. <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2020-2-180-190>
13. Ахунова Д.Р., Попова Н.А., Лукин Е.С. и др. Композиционная керамика на основе диоксида циркония для твердотопливных элементов (обзор). *Успехи в химии и химической технологии*. 2022;36(3):13–15.
14. Харитонов Д.В., Шинкевич А.И., Малышева Т.В. Потенциал российской сырьевой базы циркония для производства огнеупорных материалов на основе ZrO₂. *Черные металлы*. 2022;(8):17–21. <https://doi.org/10.17580/chm.2022.08.03>
15. Патык-Кара Н.Г., Левченко Е.Н., Стехин А.И. и др. Минеральные ассоциации титано-циркониевых песков месторождения Центральное (Восточно-Европейская платформа). *Геология рудных месторождений*. 2008;50(3):246–270. (Перев. вер.: Patyk-Kara N.G., Bochneva A.A., Chizhova I.A., et al. Mineral assemblages of titanium-zirconium sands at the central deposit, the East European platform. *Geology of Ore Deposits*. 2008;50(3):218–239. <https://doi.org/10.1134/S1075701508030045>)
16. Кюи Н.Ч.Т., Кириченко Ю.В. Минеральный потенциал подводных месторождений в Южно-Китайском море Вьетнама. *Горная промышленность*. 2020;(1):140–143. <http://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-140-143>
17. Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю. Критические товарные потоки марганцевого сырья в России. Известия Томского политехнического университета. *Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(4):38–53. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/4/2592>
18. Bagdasarov Yu.A., Pototskiy Yu.P., Zinkova O.N. Baddeleyite-containing stratiform bodies in old carbonate sequences. A possible new genetic type of zirconium deposits. *Transactions of the USSR Academy of sciences. Earth science sections*. 1990;315(6):144–148.
19. Селезнёв А.О. Текущий статус разработки Зашихинского месторождения: проблемы и перспективы. М.: АО «Техноинвест Альянс»; 2021. 12 с. URL: https://vims-geo.ru/documents/515/15.20_Селезнев_Презентация_ТЕХНОИНВЕСТ_АЛЬЯНС_ВИМС.pdf
20. Sheard E.R., Williams-Jones A.E., Heiligmann M., et al. Controls on the concentration of zirconium, niobium, and the rare earth elements in the Thor Lake rare metal deposit, Northwest Territories, Canada. *Economic Geology*. 2012;107(1):81–104. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.1.81>
21. Gysi A.P., Williams-Jones Anthony E., Collins P. Lithogeochemical vectors for hydrothermal processes in the Strange Lake peralkaline granitic REE-Zr-Nb deposit. *Economic geology*. 2016;111(5):1241–1276. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1241>
22. Moorea M., Chakhmouradian A.R., Marianob A. N., Sidhua R. Corrigendum to “Evolution of rare-earth mineralization in the Bear Lodge carbonatite, Wyoming: Mineralogical and isotopic evidence”. *Ore Geology Reviews*. 2015;64:499–521. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.015>
23. Riesgo García M.V., Krzemień A., Sáiz Bárcena L.C., et al. Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding on further project developments. *Resources Policy*. 2019;64:101525. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101525>
24. Schønwandt H.K., Barnes G.B., Ulrich T. A description of the world-class rare earth element deposit, Tanbreez, South Greenland. *Rare Earths Industry: Technological, Economic, and Environmental Implications*. 2015:73–85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802328-0.00005-X>
25. Чантурия В.А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов извлечения циркония и РЗЭ при глубокой и комплексной переработке эвдиалитового концентрата. *Записки Горного института*. 2022;256:505–516. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.31>
26. Spandler C., Morris C. Geology and genesis of the Toongi rare metal (Zr, Hf, Nb, Ta, Y and REE) deposit, NSW, Australia, and implications for rare metal mineralization in peralkaline igneous rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2016;171(121):104. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1316-y>
27. Möller V., Williams-Jones A.E. Magmatic and hydrothermal controls on the mineralogy of the basal zone, Nechalacho REE-Nb-Zr deposit, Canada. *Economic geology*. 2017;112(8):1823–1856. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2017.4531>



28. Riesgo García M.V., Krzemień A., Manzanedo del Campo M.Á., et al. Rare earth elements mining investment: It is not all about China. *Resources Policy*. 2017;53:66–76. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.004>

References

1. Fedoseev S., Tsvetkov P., Sidorov N. Development potential of Russian zirconium industry on world markets. *Journal of business and retail management research*, 2017;12(1):41–48. URL: https://jbrmr.com/cdn/article_file/content_50624_17-10-04-21-28-12.pdf
2. Bykhovsky L.Z., Remizova L.I., Chebotareva O.S. Zirconium resources of Russia: current state and prospects of the mineral resource base development. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*. 2017;(2):11–18. (In Russ.)
3. Kabanov A.A., Akhmadshchin N. Yu. Tuganskoye deposit is the first-born industrial development of titanium-zirconium placers in Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(10):54–64. (In Russ.)
4. Larichkin F.D., Vorobyev A.G., Novoseltseva V.D., et al. Zirconium: resources, markets, prospects. *Cvetnye Metally*. 2013;(11):17–21. (In Russ.)
5. Shatalov V.V., Nikonov V.I., Kotsar M.L. Prospects for zirconium and hafnium supplies for nuclear power in Russia up to 2030. *Atomic Energy*. 2008;105(4):242–247. <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9092-7> (Orig. ver.: Shatalov V.V., Nikonov V.I., Kotsar M.L. Prospects for zirconium and hafnium supplies for nuclear power in Russia up to 2030. *Atomic Energy*. 2008;105(4):190–194. (In Russ.))
6. Boyarko G. Yu., Khatkov V. Yu., Bolsunovskaya L.M. The dynamics of ferroalloys commodity flows within Russia. *CIS Iron and Steel Review*. 2021; 21: 23–33. <https://doi.org/10.17580/cislr.2021.01.04>
7. Vdovin K.N., Pivovarova K.G., Ponamareva T.B., Feoktistov N.A. Improved parting composition of zircon paint for steel casting. *Liteyshchik Rossii*. 2018;(6):14–17. (In Russ.)
8. Petrov I.M. Consumption of zirconium dioxide to produce high-tech ceramics. *Prospect and protection of mineral resources*. 2011;(6):90–92. (In Russ.)
9. Perks C., Mudd G. Titanium, zirconium resources and production: A state of the art literature review. *Ore Geology Reviews*. 2019;107:629–646. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.025>
10. Zagainov S.V., Reynbakh O.E. Ceramic industry as the main industry of zircon consumption. *Russian Economics Online Journal*. 2017;(1):1–9. (In Russ.)
11. Alekseeva T.I., Galevsky G.V., Rudneva V.V., Galevsky S.G. Application of zirconium carbide: Assessment, determination of dominant trends and prospects. In: *20th International Scientific and Research Conference – Metallurgy: Technologies, Innovation, Quality, metallurgy. iop Conference Series: Materials Science and Engineering*. 15–16 November, 2017. Novokuznetsk, Russia. 2018;411(119):012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012007>
12. Portnova E.N. Methods to improve mechanical characteristics of ceramics on the basis of zirconium and hafnium diborides (Review). *Bulletin of Perm University. Series: Chemistry*. 2020;10(2):180–190. <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2020-2-180-190> (In Russ.)
13. Ahunova D.R., Popova N.A., Lukin E.S., Pashkov O.D., Kucheryaev K.A. Composite ceramics based on zirconium dioxide for solid fuel elements (review). *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2022;36(3):13–15. (In Russ.)
14. Kharitonov D.V., Shinkevich A.I., Malysheva T.V. The potential of the Russian raw material base of zirconium for production of ZrO₂-based refractory materials. *Chernye Metally*. 2022;(8):17–21. <https://doi.org/10.17580/chm.2022.08.03>
15. Patyk-Kara N.G., Bochneva A.A., Chizhova I.A., et al. Mineral assemblages of titanium-zirconium sands at the central deposit, the East European platform. *Geology of Ore Deposits*. 2008;50(3):218–239. <https://doi.org/10.1134/S1075701508030045> (Orig. ver.: Patyk-Kara N.G., Bochneva A.A., Chizhova I.A., et al. Mineral assemblages of titanium-zirconium sands at the central deposit, the East European platform. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdeniy*. 2008;50(3):246–270. (In Russ.))
16. Quy N.C.T., Kirichenko Yu.V. Mineral potential of subsea deposits in Vietnamese part of South China Sea. *Russian Mining Industry*. 2020;(1):140–143. <http://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-140-143> (In Russ.)
17. Boyarko G. Yu., Khatkov V. Yu. Critical commodity flows of manganese raw materials in Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(4):38–53. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/4/2592> (In Russ.)
18. Bagdasarov Yu.A., Pototskiy Yu.P., Zinkova O.N. Baddeleyite-containing stratiform bodies in old carbonate sequences. A possible new genetic type of zirconium deposits. *Transactions of the USSR Academy of sciences. Earth science sections*. 1990;315(6):144–148.
19. Seleznev A.O. Current status of development of the Zashikhinsky deposit: problems and prospects. Moscow: *JSC "Tekhnoinvest Alyans"*; 2021. 12 p. URL: https://vims-geo.ru/documents/515/15.20_Селезнев_Презентация_ТЕХНОИНВЕСТ_АЛЪЯНС_ВИМС.pdf (In Russ.)
20. Sheard E.R., Williams-Jones A.E., Heiligmann M., et al. Controls on the concentration of zirconium, niobium, and the rare earth elements in the Thor Lake rare metal deposit, Northwest Territories, Canada. *Economic Geology*. 2012;107(1):81–104. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.1.81>



21. Gysi A.P., Williams-Jones Anthony E., Collins P. Lithochemical vectors for hydrothermal processes in the Strange Lake peralkaline granitic REE-Zr-Nb deposit. *Economic Geology*. 2016;111(5):1241–1276. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1241>
22. Moorea M., Chakhmouradian A.R., Marianob A.N., Sidhua R. Corrigendum to “Evolution of rare-earth mineralization in the Bear Lodge carbonatite, Wyoming: Mineralogical and isotopic evidence”. *Ore Geology Reviews*. 2015;64:499–521. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.015>
23. Riesgo García M.V., Krzemień A., Sáiz Bárcena L.C., et al. Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding on further project developments. *Resources Policy*. 2019;64:101525. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101525>
24. Schönwandt H.K., Barnes G.B., Ulrich T. A description of the world-class rare earth element deposit, Tanbreez, South Greenland. *Rare Earths Industry: Technological, Economic, and Environmental Implications*. 2015:73–85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802328-0.00005-X>
25. Chanturiya V.A. Scientific substantiation and development of innovative processes for the extraction of zirconium and rare earth elements in the deep and comprehensive treatment of eudialyte concentrate. *Journal of Mining Institute*. 2022;256:505–516. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.31>
26. Spandler C., Morris C. Geology and genesis of the Toongi rare metal (Zr, Hf, Nb, Ta, Y and REE) deposit, NSW, Australia, and implications for rare metal mineralization in peralkaline igneous rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2016;171(121):104. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1316-y>
27. Möller V., Williams-Jones A.E. Magmatic and hydrothermal controls on the mineralogy of the basal zone, Nechalacho REE-Nb-Zr deposit, Canada. *Economic geology*. 2017;112(8):1823–1856. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2017.4531>
28. Riesgo García M. V., Krzemień A., Manzanedo del Campo M.Á., et al. Rare earth elements mining investment: It is not all about China. *Resources Policy*. 2017;53:66–76. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.004>

Информация об авторах

Виталий Юрьевич Хатьков – начальник департамента, ПАО «Газпром», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0009-0002-0313-9166](https://orcid.org/0009-0002-0313-9166), Scopus ID [10046552700](https://scopus.com/authorid/10046552700); e-mail V.Khatkov@adm.gazprom.ru

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

Артём Михайлович Дибров – старший преподаватель, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-2954-9422](https://orcid.org/0000-0002-2954-9422); e-mail dibrov5@yandex.ru

Юлия Александровна Диброва (Болсуновская) – эксперт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4203-1609](https://orcid.org/0000-0003-4203-1609), Scopus ID [56350806400](https://scopus.com/authorid/56350806400); e-mail: juliadib@yandex.ru

Information about the authors

Vitaly Yu. Khatkov – Head of Department, PJSC “Gazprom” Russia, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID [0009-0002-0313-9166](https://orcid.org/0009-0002-0313-9166), Scopus ID [10046552700](https://scopus.com/authorid/10046552700); e-mail V.Khatkov@adm.gazprom.ru

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

Artem M. Dibrov – Senior Lecturer, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-2954-9422](https://orcid.org/0000-0002-2954-9422); e-mail dibrov5@yandex.ru

Yulia A. Dibrova (Bolsunovskaya) – expert, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4203-1609](https://orcid.org/0000-0003-4203-1609), Scopus ID [56350806400](https://scopus.com/authorid/56350806400); e-mail: juliadib@yandex.ru

Поступила в редакцию	13.02.2023	Received	13.02.2023
Поступила после рецензирования	16.03.2023	Revised	16.03.2023
Принята к публикации	17.03.2023	Accepted	17.03.2023



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-97>

УДК 622.276

Оценка параметров многостадийного гидравлического разрыва пласта с помощью 4D моделированияИ.И. Босиков¹ , Р.В. Ключев² , И.В. Силаев³ , Д.Э. Пилюева¹ ¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), г. Владикавказ, Российская Федерация² Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация³ Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова, г. Владикавказ, Российская Федерация kluev-roman@rambler.ru**Аннотация**

На современном этапе большинство нефтегазоконденсатных месторождений южной части Восточно-Сибирской нефтегазоносной провинции характеризуется ростом доли трудноизвлекаемых запасов нефти в плотных коллекторах. В акватории моря на месторождении Челенджер-море (Юго-Восточный купол) предлагается применить многостадийный гидравлический разрыв пласта (МГРП). Внедрение этой технологии на шельфе станет источником дополнительных рисков. Например, однозначно не оценены свойства покрышки RR-2, есть ряд геологических неопределенностей, например, тектонический режим. Однако есть ряд аргументов в пользу МГРП – неоднородность коллектора, небольшая проницаемость, низкая обводненность месторождения, достаточная мощность продуктивного пласта и покрышки. Также хорошим фактором является то, что в процессе добычи не наблюдается пескопроявлений. Выбор принципиальной схемы заканчивания скважин на восточном борту пласта RR-7 производится с целью эффективного извлечения остаточных запасов. Задачи проведенной работы заключаются в создании геолого-гидродинамической модели Челенджер-море (Юго-Восточный купол); разработке 1D и 3D геомеханических моделей; оценке прогнозов по добыче с использованием принципиально разных схем заканчивания скважин; определении оптимальных параметров многостадийного гидравлического разрыва пласта. Методы исследований включают в себя петрофизические методы; методы ГИС; ядерные исследования; буровые сводки и данные об испытаниях пластов; 3, 4D геомеханическое моделирование; геофизические методы: акустический каротаж, плотностной каротаж, гамма-каротаж. После построения геомеханической модели пласта на начало бурения производится гидродинамический расчет, по итогам которого определены кубы пластовых давлений и насыщений на определенных моменты времени. Полученные результаты позволили определить направления главных напряжений, значения эффективных и главных напряжений, а также величины упругих деформаций. Для оценки технологической эффективности МГРП были произведены прогнозы добычи на гидродинамической модели по разведочной скважине с традиционным заканчиванием (перфорированный хвостовик) с пятью стадиями МГРП. В первом случае накопленная добыча составила 144 тыс. т за 15 лет, во втором – 125 тыс. т за 17 лет. Разница в накопленной добыче обусловлена разными стартовыми дебитами скважин, а также темпами отбора в первые несколько лет разработки, а в дальнейшем кривые добычи и суточных дебитов демонстрировали схожее поведение. Для выбора наиболее эффективного варианта выполнен экономический анализ эффективности.

Ключевые слова

нефтегазоконденсатное месторождение, нефть, скважина, керн, пористость, геологическая модель, геомеханическая модель, геолого-гидродинамическая модель, акустический каротаж, плотностной каротаж

Для цитирования

Bosikov I. I., Klyuev R. V., Silaev I. V., Piliueva D. E. Estimation of multistage hydraulic fracturing parameters using 4D simulation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):141–149. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-97>



MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Estimation of multistage hydraulic fracturing parameters using 4D simulation

I. I. Bosikov¹  , R. V. Klyuev²   , I. V. Silaev³  , D. E. Piliyeva¹  ¹North Caucasian Mining and Metallurgical Institute, Vladikavkaz, Russia²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia³North Ossetian State University named after K. L. Khetagurov, Vladikavkaz, Russia kluev-roman@rambler.ru**Abstract**

At the present stage, most oil and gas condensate fields in the southern part of the East Siberian oil and gas province are characterized by an increasing proportion of difficult oil reserves in tight reservoirs. Multistage hydraulic fracturing (MHF) is proposed for the offshore Challenger Sea field (Southeast Dome). The implementation of this technique at a shelf will be a source of additional risks. For example, the properties of the RR-2 overlying seal have not been unambiguously assessed, and there are a number of geological uncertainties, such as the tectonic regime. However, there are a number of arguments in favor of MHF: heterogeneity of the reservoir; low permeability; low water cut of the field; sufficient thickness of the pay zone; and the overlying seal. One more positive factor is that sand ingress is not observed in the process of oil production. The selection of a principal well completion scheme on the eastern side of the RR-7 formation is aimed at effectively recovering the remaining reserves. The objectives of the study performed are: to create a geological and hydrodynamic model of the Challenger Sea (Southeast Dome); develop 1D and 3D geomechanical models; evaluate oil production forecasts based on fundamentally different well completion schemes; and determine the optimum parameters for multistage hydraulic fracturing. The research methods included: petrophysical methods; logging methods; core studies; drilling reports and formation testing data; and 3D, 4D geomechanical simulation. Other geophysical methods included acoustic logging, density logging, and gamma-ray logging. After building a geomechanical model of the reservoir at the beginning of drilling, a hydrodynamic calculation was performed. This established the reservoir pressures and saturations at certain points in time. The results made it possible for the principal stress directions, the values of effective and principal stresses, and the values of elastic strains to be determined. In order to assess MGF process efficiency, production forecasts were made using a hydrodynamic model for an exploration well with conventional completion (perforated liner) and with five-stage MGF. In the first case, the accumulated production was 144 kt over 15 years, and in the second case, 125 kt over 17 years. The difference in cumulative production is due to different initial well flow rates, as well as the rate of oil withdrawal during the first few years of development. Thereafter, the production and daily flow rate curves showed similar behavior. In order to select the most effective option, an economic analysis of the efficiency was performed.

Keywords

oil and gas condensate field, oil, well, core, porosity, geological model, geomechanical model, geological and hydrodynamic model (reservoir simulation model), acoustic logging, density logging

For citation

Bosikov I. I., Klyuev R. V., Silaev I. V., Piliyeva D. E. Estimation of multistage hydraulic fracturing parameters using 4D simulation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):141–149. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-97>

Введение

На современном этапе большинство нефтегазо-конденсатных месторождений южной части Восточно-Сибирской нефтегазоносной провинции характеризуется ростом доли трудноизвлекаемых запасов нефти в плотных коллекторах [1, 2].

Многостадийный гидравлический разрыв пласта (МГРП) – эффективный метод повышения нефтеотдачи и интенсификации добычи в терригенных отложениях по всему миру [3, 4].

В акватории моря на месторождении Челенджер-море (Юго-Восточный купол) предлагается применить МГРП. Внедрение этой технологии на шельфе станет источником дополнительных рисков [5, 6]. Например, однозначно не оценены свойства покрышки RR-2, есть ряд геологических

неопределенностей, например, тектонический режим. Однако есть аргументы в пользу МГРП – неоднородность коллектора [7, 8], низкая проницаемость, низкая обводненность месторождения, достаточная мощность продуктивного пласта и покрышки. Также хорошим фактором является то, что в процессе добычи не наблюдается пескопроявлений [9, 10].

Общие сведения о месторождении

Нефтегазоконденсатное месторождение Челенджер-море (Юго-Восточный купол) расположено на территории Стойковского района Приморской области в 40 км юго-восточнее г. Серова на шельфе Юго-Восточного Стойкова, на широте южного замыкания Старковского залива.

Месторождение Челенджер-море открыто в 2011 г. Месторождение является многопластовым, содержит газоконденсатные и нефтегазоконденсатные залежи разных типов – литологические, пластово-сводовые. По строению месторождение относится к очень сложным, по величине запасов – к крупным [11, 12].

В географическом отношении рассматриваемый район приурочен к южной гряде Восточно-Сибирского хребта. Рельеф холмисто-увалистый, местность частично покрыта лесом, частично заболочена. Максимальные высоты над уровнем моря не превышают 200 м. Рельеф дна в районе месторождения слабо расчлененный. Климат района характерный для Приморья: зима суровая, снежная, ветреная, с частыми метелями.

В тектоническом отношении месторождение Челенджер-море (Юго-Восточный купол) приурочено к крупной мегантиклинали, расположенной в северной части одноименной антиклинальной зоны, протягивающейся на шельфе Восточно-Сибирского хребта в северо-западном направлении более чем на 200 км [13, 14].

Разрез юго-восточного шельфа сложен мезозойскими и кайнозойскими отложениями, образующими два структурных этажа. Нижний, фундамент, сложен дислоцированными метаморфическими породами мелового возраста. Осадочный чехол состоит исключительно из кайнозойских отложений неогенового возраста. В разрезе осадочного чехла выделяются усть-давыдовский и приханкайский горизонты. Последний, в свою очередь, делится на нижнеприханкайский и верхнеприханкайский подгоризонты. Мощность приханкайского горизонта изменяется от 2000 до 3000 м, увеличиваясь с северо-востока на юго-запад. Нижнеприханкайский горизонт сложен песчаниками серыми, часто алевроитовыми и глинистыми, с прослоями алевролитов и глин. Верхнеприханкайский горизонт сложен песчаниками и алевролитами в нижней части, рыхлыми песками с прослоями глин – в верхней части.

Промышленная нефтегазоносность приурочена к верхнеприханкайскому подгоризонту. Основными продуктивными пластами на месторождении Челенджер-море (Юго-Восточный купол) являются пласты RR-2, RRI-1, RRI-2.

Методы исследований

Петрофизические методы; методы ГИС; керновые исследования; буровые сводки и данные об испытаниях пластов; 3D геомеханическое моделирование; геофизические методы: акустический каротаж, плотностной каротаж, гамма-каротаж.

Техническая часть

Исследования проводились по пласту RR-2. Продуктивный пласт отличается латеральной неоднородностью. Фильтрационно-емкостные свойства на восточном борту существенно хуже, чем на западном, поэтому для эффективного извлечения остаточных запасов нефти был рассмотрен вариант проведения МГРП.

Построение 3D геомеханической модели месторождения Челенджер-море (Юго-Восточный купол)

Исследования керна. КERN – единственный прямой источник информации о продуктивном пласте и покрывке, используемый как в геолого-гидродинамическом, так и в геомеханическом моделировании [15, 16]. Для уточнения механических свойств горных пород и построения достоверной геомеханической модели были проведены специальные исследования на керне скважин месторождения Челенджер-море (Юго-Восточный купол).

Для проведения данных исследований керна привлеклся керн из скв. 88-Р и 120-Р Челенджер-море, только по RR-2 пласту. Охарактеризованность пласта керном слабая, каменный материал отбирался лишь в двух скважинах из верхней и средней частей пласта. При отборе образцов учитывались литологические особенности пород. Перед тем как выбрать образцы, осматривался керн, изучалось первичное описание породы и просматривались шлифы под микроскопом (рис. 1). Всего было исследовано 87 образцов.

Построение одномерных геомеханических моделей

Одномерная геомеханическая модель представляет собой набор кривых упругих, прочностных свойств и главных напряжений вдоль траектории скважины: поровое давление; вертикальное напряжение (горное давление); максимальное и минимальное горизонтальные напряжения; модуль Юнга статический и динамический; коэффициент Пуассона; предел прочности на сжатие; предел прочности на разрыв; угол внутреннего трения.

Данный набор данных позволяет определять допустимые параметры бурового раствора для предотвращения осложнения в процессе бурения, предупреждать пескопроявления при эксплуатации добывающих скважин, а также планировать ГРП в горизонтальных и наклонных скважинах [17, 18]. Геомеханическая модель 1D по одной из опорных скважин приведена на рис. 2.

При создании геомеханической модели используется множество данных, включая методы ГИС, керновые исследования, буровые сводки и данные об испытаниях пластов [19, 20]. Необходимый объем методов приведен в табл. 1.



Рис. 1. Цилиндрический образец керна до и после определения предела прочности на сжатие

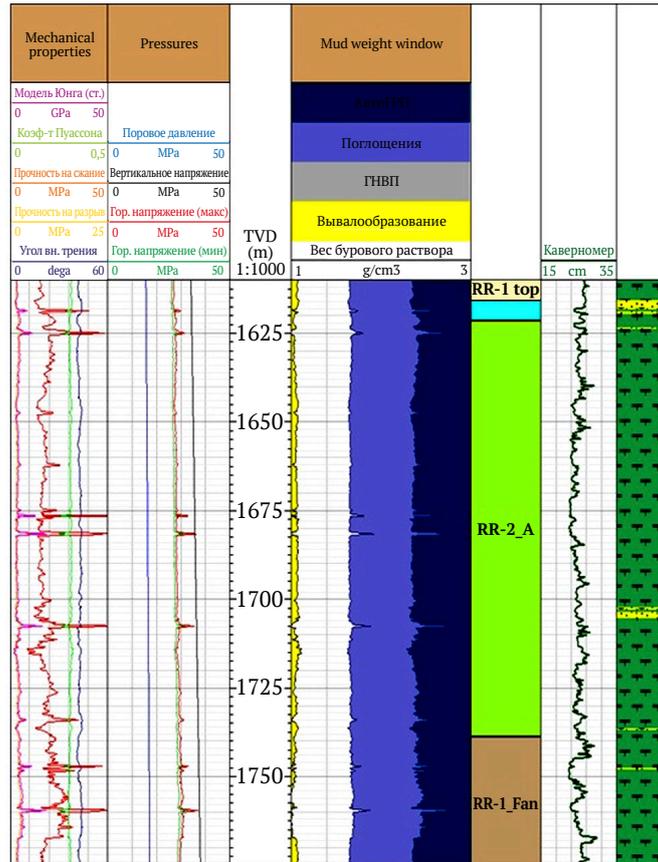


Рис. 2. Геомеханическая модель 1D по скважине 22-Р Челенджер-море (Юго-Восточный купол)

Таблица 1

Оценка полноты исходных данных по проведенным исследованиям

Тип данных	Источник данных	Применение	Степень достоверности
ГИС			
Акустический каротаж	Комплекс ГИС в разведочных скважинах	Построение ГММ – упругие свойства	Низкая
Плотностной каротаж	Записан в большинстве скважин на месторождении	Построение ГММ – упругие свойства и вертикальное напряжение	Высокая
Гамма-каротаж	Записан во всех скважинах	Расчет угла внутреннего трения	
Керн			
Модуль Юнга (динамический)	Лабораторные исследования	Расчет прочностных свойств	Средняя – новые лабораторные исследования; керн характеризует только продуктивную часть пласта
Коэффициент Пуассона		Расчет горизонтальных напряжений	
Модуль Юнга (статический)		Расчет горизонтальных напряжений	
Предел прочности на сжатие		Оценка стабильности ствола скважины	
Предел прочности на разрыв			
Другие данные			
Сведения об осложнениях при бурении	Буровые сводки	Калибровка ГММ	Средняя – отсутствуют буровые осложнения в интервале пласта
Сведения о начальном пластовом давлении	Данные опробований и ГДИС	Калибровка ГММ и оценка порового давления	Высокая
Стратиграфические разбивки	Схема детальной корреляции из ГМ	Применяются в построении ПФ зависимостей, прогнозировании свойств	Высокая
Литология разреза	Описание керна, РИГИС		Высокая

Геологическая модель и гидродинамика

Построение 3D геомеханической модели на начало бурения производится на основе геологической модели, а изменение напряженно-деформированного состояния пласта во времени учитывается с помощью результатов гидродинамического моделирования.

Геомеханическое моделирование предъявляет жесткие требования к геологической модели, поэтому для данного проекта была построена новая геологическая модель, учитывающая весь объем геологической информации, а также технические характеристики, необходимые для успешных геомеханических расчетов.

Модель построена на сетке 100×100 м, толщина ячеек в среднем 1 м, общее количество ячеек не превышает 300 тыс. Такие параметры были подобраны опытным путем, так как геомеханические и гидродинамические расчеты требуют больших вычислительных мощностей. Кроме того, в геологической модели была надстроена покрывка RR-2 пласта для детального моделирования прочностных свойств флюидоупора. В модель были включены все дизъюнктивные нарушения.

Геомеханическая модель 3D: на начало бурения

3D геомеханическая модель на начало бурения строится путем воссоздания напряженно-деформированного состояния на относительно большом фрагменте земной коры. Для этого сверху, снизу и с боков ГМ достраиваются дополнительные ячейки с породами, которые «давят» на ячейки в самой модели и таким образом формируют напряжения [21]. Кроме того, все ячейки наполняются упругими и прочностными свойствами горных пород и разломов в соответствии с теми ПФ зависимостями, что были получены на этапе одномерного моделирования (рис. 3). На рис. 3 прямоугольником выделена область построения геологической модели залежи.



Рис. 3. Общий вид геомеханического грида

Обсуждение: точка зрения

и непосредственные исследования автора

В работе произведен расчет изменения состояния со временем (геомеханическая модель 4D). После построения геомеханической модели пласта на начало бурения производился гидродинамический расчет, по итогам которого получены кубы пластовых давлений и насыщений на определенные моменты времени. Они являются входными параметрами для расчета НДС в эти моменты времени. По итогу расчета мы получаем направления главных напряжений, значения эффективных и главных напряжений (рис. 4), а также величины упругих деформаций. Кроме того, по кругам Мора можно оценить, насколько порода близка к разрушению в пластовых условиях. На рис. 4 линия разрушения показана темно-зеленым цветом, а соотношения нормальных и касательных напряжений в отдельно взятой ячейке – в виде классического круга Мора. Когда круг напряжений

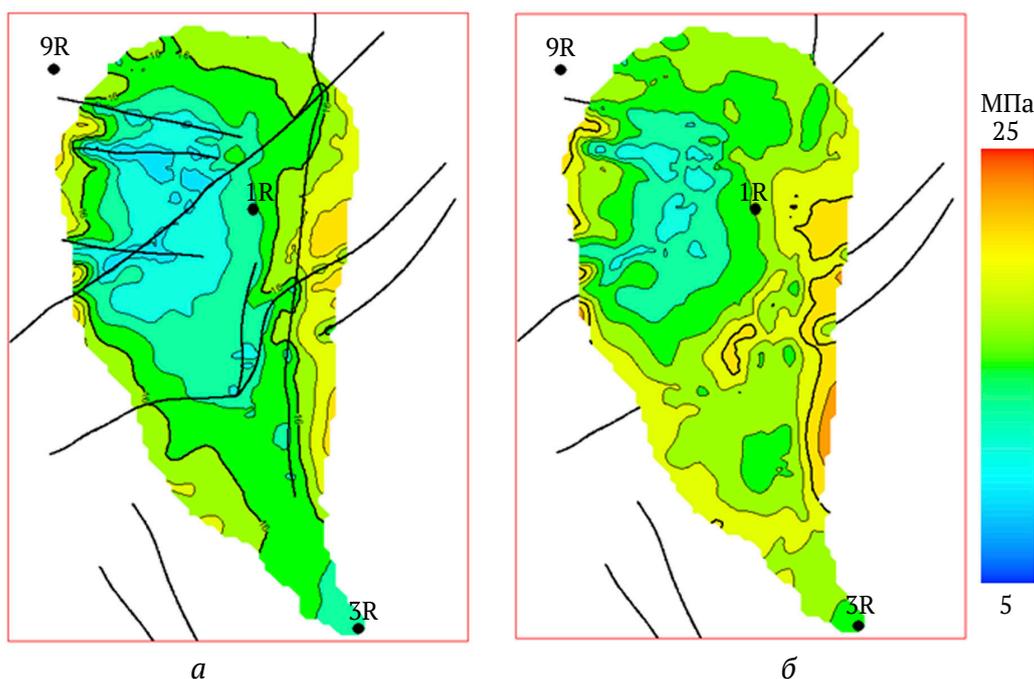


Рис. 4. Сравнение карт эффективных напряжений на 01.01.2015 (а) и 01.01.2022 (б)



касается линии разрушения, происходит нарушение целостности ГП – образуется разлом или трещина. В случае RR-2 пласта породы находятся в стабильном состоянии в данный момент времени и в течение периода разработки, на который построена модель.

Одномерная постбуровая геомеханическая модель позволяет спланировать МГРП: количество стадий, размещение портов МГРП и пакеров.

Показатели экономической эффективности по двум вариантам приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели эффективности

Показатель	Значения	
	Вариант 1	Вариант 2
Внутренняя норма дохода (ВНД), %	15	22
Накопленная добыча, тыс. т	165	212
Чистый дисконтированный доход NPV (ЧДД), млн руб.	327	612
Срок окупаемости, лет	7,5	5

Для оценки технологической эффективности МГРП были произведены прогнозы добычи на гидродинамической модели по разведочной скважине с традиционным заканчиванием (перфорированный хвостовик) с пятью стадиями МГРП. В первом случае накопленная добыча составила 144 165 тыс. т за 15 лет, во втором – 125 212 тыс. т за 17 лет. Разница в накопленной добыче обусловлена разными стартовыми дебитами скважин, а также темпами отбора в первые несколько лет разработки, в дальнейшем кривые добычи и суточных дебитов демонстрировали схожее поведение. Для выбора наиболее эффективного варианта выполнен экономический анализ эффективности.

Положительный экономический эффект – важнейший показатель успешности применяемых методов и необходимое условие для их реализации. В рамках проведенных исследований был оценен экономический эффект от бурения новой разведочной скважины с большим отходом от вертикали с тради-

ционным заканчиванием и от бурения такой же скважины, но с проведением МГРП. Рассчитывались такие экономические показатели, как затраты, выручка, амортизация и остаточная стоимость скважины, чистая прибыль (денежный поток), в том числе с учетом дисконтирования ($E = 10\%$), учитывались: налог на прибыль, экспортная пошлина, НДС, налог на имущество. Экономическая эффективность оценивалась по трем показателям: величине ЧДД и ВНД, а также сроку окупаемости.

Заключение

При проведении оценки параметров многостадийного гидравлического разрыва пласта с помощью 4D моделирования решены следующие задачи:

1. Проведен анализ достоинств и недостатков параметров технологии МГРП на шельфе.

2. Построена предварительная 4D геомеханическая модель пласта RR-2 месторождения Челенджер-море (Юго-Восточный купол).

3. Разработаны 1D и 3D геомеханические модели, проведены дополнительные исследования керна на Одопту-море с учетом особенностей RR-2 пласта для уточнения геомеханической модели.

4. Проведена оценка прогнозов по добыче с использованием принципиально разных схем заканчивания скважин.

5. Определены оптимальные параметры многостадийного гидравлического разрыва пласта.

6. На базе гидродинамической модели рассчитана прогнозная добыча по проектной скважине с традиционным заканчиванием (перфорированный хвостовик в горизонтальном стволе) и многостадийным ГРП (5 стадий).

7. Проведена оценка экономической эффективности вариантов разработки без МГРП и с учетом МГРП. Базовый вариант является экономически эффективным, ВНД составила 15 %, ЧДД – 327 млн руб. Второй вариант является экономически эффективным при норме дисконтирования 22 %, ЧДД составляет 612 млн руб.

8. Проведение МГРП (5 стадий) позволит увеличить ЧДД почти вдвое, а накопленную добычу на 30 %.

Список литературы

1. Гайдук В.В. Природа нефтегазоносности Терско-Сунженского нефтегазоносного района. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2019;(2):40–46. <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-2-40-46>
2. Данилов В.Н. Надвигообразование и нефтегазоносность Предуральского краевого прогиба. *Геология нефти и газа*. 2021;(1):57–72. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-1-57-72>
3. Vishkai M., Gates I. On multistage hydraulic fracturing in tight gas reservoirs: Montney Formation, Alberta, Canada. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;174:1127–1141. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.12.020>
4. Wasantha P.L.P., Konietzky H., Xu C. Effect of in-situ stress contrast on fracture containment during single- and multi-stage hydraulic fracturing. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019;205:175–189. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.11.016>
5. Liu Y., Ma X., Zhang X. et al. 3D geological model-based hydraulic fracturing parameters optimization using geology–engineering integration of a shale gas reservoir: A case study. *Energy Reports*. 2022;8:10048–10060. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.08.003>



6. Yaghoubi A. Hydraulic fracturing modeling using a discrete fracture network in the Barnett Shale. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019;119:98–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.01.015>
7. Ouchi H., Foster J.T., Sharma M.M. Effect of reservoir heterogeneity on the vertical migration of hydraulic fractures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017;151:384–408. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.12.034>
8. Li J.-Ch., Yuan B., Clarkson Ch.R., Tian J.-Q. A semi-analytical rate-transient analysis model for light oil reservoirs exhibiting reservoir heterogeneity and multiphase flow. *Petroleum Science*. 2022;20(1):309–321. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.09.021>
9. Liu P., Wang Zh., Lu K., Zhang Zh. Effect of sandstone and mudstone thickness on artificial fracturing for hydrocarbon extraction from low-permeability reservoirs. *Natural Gas Industry B*. 2022;9(4):411–425. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2022.08.001>
10. Mohamad-Hussein A., Mendoza P.E.V., Delbosco P.F. et al. Geomechanical modelling of cold heavy oil production with sand. *Petroleum*. 2021;8(1):66–83. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2021.02.002>
11. Босиков И.И., Ключев Р.В., Гаврина О.А. Анализ геолого-геофизических материалов и качественная оценка перспектив нефтегазоносности Южно-Харьбинского участка (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2021;11(1):6–21. <https://doi.org/10.46698/VNC.2021.36.47.001>
12. Ключев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020;12(2):283–290. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290>
13. Маниковский П.М., Васютин Л.А., Сидорова Г.П. Методика моделирования рудных месторождений в ГГИС. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2021;27(2):6–14. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-2-6-14>
14. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
15. 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>
16. Третьякова О.Г., Третьяков М.Ф., Софронов Г.В. Моделирование терригенных коллекторов и оценка прогнозных ресурсов россыпной алмазности на участке Ханнинский с помощью горно-геологической информационной системы (ГИС) Micromine. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле*. 2019;4(4):20–30. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.16.49722>
17. Савельев Д.Е., Макатов Д.К., Портнов В.С., Гатауллин Р.А. Морфология и текстурно-структурные особенности хромититовых залежей главного рудного поля Кемпирсайского массива (Южный Урал, Казахстан). *Георесурсы*. 2022;24(1):62–73. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.1.6>
18. Столяренко В.В., Минаков А.В., Рябошапка А.Г., Минаева С.В., Алфёрова В.А. Прогнозно-поисковая модель золотого оруденения в пределах мезозойских впадин в Центрально-Алданском рудно-россыпном районе (на примере Верхне-Якутского рудного поля). *Руды и металлы*. 2022;(1):44–76. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10003>
19. 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>
20. Khan R.A., Awotunde A.A. Determination of vertical/horizontal well type from generalized field development optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;162:652–665. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.083>
21. 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>

References

1. Gayduk V.V. The nature of the oil and gas potential of the Tersko-Sunzhensky Oil and Gas-Bearing Region. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2019;(2):40–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-2-40-46>
2. Danilov V.N. Formation of thrusts and hydrocarbon potential of Urals Foredeep. *Russian Oil and Gas Geology*. 2021;(1):57–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-1-57-72>



3. Vishkai M., Gates I. On multistage hydraulic fracturing in tight gas reservoirs: Montney Formation, Alberta, Canada. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;174:1127–1141. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.12.020>
4. Wasantha P.L.P., Konietzky H., Xu C. Effect of in-situ stress contrast on fracture containment during single- and multi-stage hydraulic fracturing. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019;205:175–189. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.11.016>
5. Liu Y., Ma X., Zhang X. et al. 3D geological model-based hydraulic fracturing parameters optimization using geology–engineering integration of a shale gas reservoir: A case study. *Energy Reports*. 2022;8:10048–10060. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.08.003>
6. Yaghoubi A. Hydraulic fracturing modeling using a discrete fracture network in the Barnett Shale. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019;119:98–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.01.015>
7. Ouchi H., Foster J.T., Sharma M.M. Effect of reservoir heterogeneity on the vertical migration of hydraulic fractures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017;151:384–408. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.12.034>
8. Li J.-Ch., Yuan B., Clarkson Ch.R., Tian J.-Q. A semi-analytical rate-transient analysis model for light oil reservoirs exhibiting reservoir heterogeneity and multiphase flow. *Petroleum Science*. 2022;20(1):309–321. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.09.021>
9. Liu P., Wang Zh., Lu K., Zhang Zh. Effect of sandstone and mudstone thickness on artificial fracturing for hydrocarbon extraction from low-permeability reservoirs. *Natural Gas Industry B*. 2022;9(4):411–425. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2022.08.001>
10. Mohamad-Hussein A., Mendoza P.E.V., Delbosco P.F. et al. Geomechanical modelling of cold heavy oil production with sand. *Petroleum*. 2021;8(1):66–83. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2021.02.002>
11. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Gavrina O.A. Analysis of geological-geophysical materials and qualitative assessment of the oil and gas perspectives of the Yuzhno-Kharbizhinsky area (Northern Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021;11(1):6–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.46698/VNC.2021.36.47.001>
12. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(2):283–290. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290>
13. Manikovskiy P., Vasyutich L., Sidorova G. Methodology for modeling ore deposits in the GIS Micromine. *Vestnik Zabaykalskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2021;27(2):6–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-2-6-14>
14. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
15. 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>
16. Tretiakova O.G., Tretiakov M.F., Sofronov G.V. Modeling of terrigenous collectors and assessment of forecast resources of placer diamond potential on Khanninsky site with the Mining-and-Geological Information System (GGIS) Micromine. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2019;(4):20–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.16.49722>
17. Saveliev D.E., Makatov D.K., Portnov V.S., Gataullin R.A. Morphological, textural and structural features of chromitite deposits of Main ore field of Kempirsay massif (South Urals, Kazakhstan). *Georesursy*. 2022;24(1):62–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2022.1.6>
18. Stolyarenko V.V., Minakov A.V., Ryaboshapko A.G. Mineral potential modelling for gold mineralization within the Mesozoic depressions in the Central-Aldan ore-placer area (on the example of the Upper Yakokutsk ore field). *Ores and Metals*. 2022;(1):44–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10003>
19. 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>
20. Khan R.A., Awotunde A.A. Determination of vertical/horizontal well type from generalized field development optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;162:652–665. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.083>
21. Rybak Y., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun C.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>



Информация об авторах

Игорь Иванович Босиков – кандидат технических наук, заведующий кафедрой нефтегазового дела, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8930-4112](https://orcid.org/0000-0001-8930-4112), Scopus ID [56919738300](https://scopus.com/authorid/56919738300)

Роман Владимирович Ключев – доктор технических наук, профессор кафедры техники низких температур им. П.Л. Капицы, 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/authorid/57194206632); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Иван Вадимович Силаев – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой физики и астрономии, Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-2490-1578](https://orcid.org/0000-0003-2490-1578), Scopus ID [57189031683](https://scopus.com/authorid/57189031683)

Дина Эдуардовна Пилюева – кандидат социологических наук, доцент кафедры философии и социально-гуманитарных технологий, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-6712-6789](https://orcid.org/0000-0002-6712-6789), Scopus ID [57201777149](https://scopus.com/authorid/57201777149)

Information about the authors

Igor I. Bosikov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Oil and Gas Department, North Caucasian Mining and Metallurgical Institute, Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8930-4112](https://orcid.org/0000-0001-8930-4112), Scopus ID [56919738300](https://scopus.com/authorid/56919738300)

Roman V. Klyuev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of the Technique of Low Temperature named after P.L. Kapitza, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), Scopus ID [57194206632](https://scopus.com/authorid/57194206632); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Ivan V. Silaev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Physics and Astronomy, North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0003-2490-1578](https://orcid.org/0000-0003-2490-1578), Scopus ID [57189031683](https://scopus.com/authorid/57189031683)

Dina E. Piliueva – Cand. Sci. (Sociol.), Associate Professor of the Department of Philosophy and Social and Humanitarian Technologies, North Caucasian Mining and Metallurgical Institute, Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0002-6712-6789](https://orcid.org/0000-0002-6712-6789), Scopus ID [57201777149](https://scopus.com/authorid/57201777149)

Поступила в редакцию	15.01.2023	Received	15.01.2023
Поступила после рецензирования	02.04.2023	Revised	02.04.2023
Принята к публикации	16.04.2023	Accepted	16.04.2023



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-13>

УДК 622.4



Параметризация модели вентиляционной сети при анализе аварийных режимов проветривания систем горных выработок

М. О. Пересторонин   , О. С. Паршаков  , М. Д. Попов  

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация
 per.maks1m.97@gmail.com

Аннотация

Численное моделирование развития рудничных пожаров и взрывов является важным этапом в процессе разработки технических решений и мероприятий по повышению безопасности персонала, задействованного на подземных работах. От корректности результатов моделирования зависит, насколько принятые решения будут эффективны в случае возникновения реальной аварийной ситуации. В связи с этим должно уделять внимание каждой стадии моделирования, и в особенности начальной – стадии параметризации модели. В настоящем исследовании сформулирован общий принцип определения параметров моделей рудничных пожаров и взрывов для оценки их развития при помощи аналитического комплекса «АэроСеть». Такими параметрами в случае пожара являются тепло- и газовыделения, а в случае взрыва – избыточное давление на фронте ударной волны в очаге взрыва. Установлено, что при моделировании пожара целесообразно использовать эквивалентные тепло- и газовыделения, определяемые содержанием горючих компонентов в источнике горения. В случае горения горнопроходческой техники данные параметры возможно рассчитать на основании технических характеристик машины. В свою очередь, при моделировании несанкционированного взрыва взрывчатых материалов избыточное давление, определяемое безразмерной длиной активного участка горения, рассчитывается с учетом массы и удельной теплоты сгорания взрывчатого вещества, а также геометрических параметров выработки. При моделировании взрыва метановоздушной смеси избыточное давление рассчитывается с учетом газоносности пород по свободным горючим газам, длины буровзрывной заходки, размеров области повышенного трещинообразования, а также нижнего предела взрываемости метана. На основании предлагаемого принципа параметризации аварийных моделей в качестве примера выполнена разработка модели развития пожара и взрыва в существующих протяженных тупиковых выработках (длиной более 1000 м), проходящих соосно друг другу на разных высотных отметках. Произведено численное моделирование различных аварийных ситуаций в выработках с учетом ведения горных работ в сложных горнотехнических условиях.

Ключевые слова

рудник, подземный пожар, взрыв, аварийная ситуация, ударная волна, моделирование, АэроСеть, параметризация, безопасность

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 20-35-90072.

Для цитирования

Perestoronin M. O., Parshakov O. S., Popov M. D. Parameterization of a ventilation network model for the analysis of mine working emergency ventilation modes. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):150–161. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-13>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Parameterization of a ventilation network model for the analysis of mine working emergency ventilation modes

М. О. Пересторонин   , О. С. Parshakov  , М. Д. Попов  

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation
 per.maks1m.97@gmail.com

Abstract

Digital simulation of mine fires and explosions is an important stage in the process of developing technical solutions and measures aimed at improving the safety of personnel involved in underground mining. Correct simulation results determine the effectiveness of decisions in the event of an actual emergency situation. In this regard, due attention should be paid to each stage of the simulation, and especially to the initial stage of



model parameterization. This study formulates a general principle for determining the parameters of mine fire and explosion models, in order to assess their development using the AeroNetwork analytical package. Such parameters in the event of a fire are heat and gas (afterdamp) releases. In the event of an explosion, excessive pressure at the shock front in the explosion origin. It has been established that when simulating a fire, it is advisable to use equivalent heat and gas releases determined by the content of combustible components in the combustion origin. In the event of burning mining equipment, these parameters can be calculated on the basis of the technical characteristics of a machine. Furthermore, when simulating an unauthorized explosion of explosives, the excess pressure determined by the dimensionless length of the active combustion area is calculated taking into account the weight and specific heat of an explosive, as well as the geometric parameters of a mine working. When simulating an explosion of a methane-air mixture (firedamp), the excess pressure is calculated taking into account the gas content of rocks in terms of free combustible gases, the length of a blast cut, the size of the area of increased fracturing, and the lower explosive limit of methane. Based on the proposed principle of the parameterization of emergency models, as an example, a model of fire and explosion development in existing extended dead-end workings (more than 1000 m long) passing coaxially to each other at different heights was developed. The numerical simulation of different emergency situations in workings was carried out, taking into account performing mining in difficult mining conditions.

Keywords

mine, underground fire, explosion, emergency, shock wave, simulation, AeroNetwork, parameterization, safety

Acknowledgments

The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation as part of Project No. 20-35-90072.

For citation

Perestoronin M. O., Parshakov O. S., Popov M. D. Parameterization of a ventilation network model for the analysis of mine working emergency ventilation modes. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):150–161. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-10-13>

Введение

В соответствии с Законом о промышленной безопасности № Ф3-116 горнодобывающее предприятие относится к опасному производственному объекту, для которого характерен повышенный риск возникновения аварийной ситуации. Особо остро стоит вопрос безопасности людей в строящихся подземных выработках, являющихся тупиковыми и имеющими только один аварийный выход из рабочей зоны. Для таких опасных условий труда необходима разработка технических решений и мероприятий, обеспечивающих безопасную эвакуацию людей и эффективное ведение горноспасательных работ. При этом в процессе их разработки целесообразно воспользоваться возможностями численного моделирования.

Согласно статистике [1, 2] наиболее разрушительными и часто встречающимися авариями являются рудничные пожары и взрывы. Поэтому в целях разработки оптимальных мер повышения безопасности шахтеров рационально и достаточно прогнозирование развития именно этих аварийных ситуаций. Однако адекватная параметризация таких моделей является задачей, отличающейся повышенной сложностью.

Так, тема моделирования развития пожара с позиции распространения продуктов горения в горных выработках освещена в трудах [3–5]. Общим недостатком представленных работ и других существующих исследований в данной области знаний является то, что аварийные тепло- и газовыделения принимаются без привязки к конкретному источнику горения. Как правило, в качестве исходных данных для моделирования используются абстрактные параметры, отражающие возможную наиболее неблагоприятную аэрологическую и теплогазодинамическую обстановку, такие как газовыделение 100 % [6, 7] или тепловы-

деление 50 МВт [8] при «сильном» пожаре. Такое упрощение обусловлено значительной трудоемкостью расчета данных параметров, поскольку их нахождение возможно при проведении полномасштабных экспериментов, как в работах [9, 10], либо при дополнительном моделировании пожара с позиции физического процесса, как это производилось в работе [11].

Оптимальным же является аналитическое определение теплогазовыделений при пожаре, учитывая конкретные горнотехнические условия, поскольку такой подход позволяет принять адекватные параметры моделирования при сравнительно небольших трудозатратах. И поскольку в настоящий момент времени такие аналитические зависимости отсутствуют, равно как отсутствует методология расчета теплогазовыделений от рудничного пожара, научные исследования в данном направлении являются весьма актуальными.

В свою очередь, говоря о рудничных взрывах, невозможно не упомянуть таких ученых, как Абинов А.Г., Васенин И.М., Лукашов О.Ю., Палеев Д.Ю., Плотников В.М. и др., результаты научной деятельности которых легли в основу *Методики газодинамического расчета*¹, которая на сегодняшний день применяется при определении параметров воздушных ударных волн при взрывах в шахте. В данной методике вводится понятие «активного участка горения», который представляет собой участок горной выработки, заполненный взрывоопасной смесью, и определяет начальное избыточное давление на фронте ударной

¹ Распоряжение Федерального горного и промышленного надзора России «О введении в действие «Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» от 27 апреля 2004 года № Р-7. 16 с.

волны в очаге взрыва. Однако ориентированность методики на аварийные расчеты не позволяет с ее помощью определить длину этого участка без фактически измеренных параметров загазованности горной выработки. Другими словами, данная методика не отвечает на вопрос, как рассчитать длину активного участка горения для условий неаварийной выработки, для которой необходима заблаговременная разработка эвакуационных и горноспасательных мероприятий. Для случая несанкционированного взрыва взрывчатых материалов (ВМ) исковую длину можно определить по аналитическим зависимостям, представленным в работе [12]. Однако для случая взрыва метановоздушной смеси (МВС) этот вопрос остается открытым и потому требует исследования.

В связи с вышесказанным в настоящей работе на примере протяженных тупиковых выработок одного из рудников России предложена методология расчета параметров модели развития рудничного пожара и взрыва в аналитическом комплексе «АэроСеть» – одном из основных инструментов по решению задач в области рудничной вентиляции и обеспечения безопасности в шахте.

Предполагается, что результаты данного исследования будут полезны не только пользователям АК «АэроСеть», осуществляющим численное моделирование развития аварий в горных выработках, но и другим специалистам в области аэрологической безопасности, имеющим дело с расчетами рудничных пожаров и взрывов.

Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматриваются две протяженные тупиковые выработки одного из рудников России, проходимые с целью выполнения геолого-механических исследований и организации вентиляционной сбойки между шахтными стволами. Принципиальная схема пространственного расположения выработок представлена на рис. 1.

Рассматриваемые выработки характеризуются следующими особенностями трассировки и горнотехническими условиями проходки:

– проходка выработок осуществляется одновременно в направлении ствола № 2;

– глубина залегания выработки № 1 составляет 1750–1850 м (восходящий уклон 3 в направлении ствола № 2), глубина залегания выработки № 2 – 1950 м (уклон отсутствует);

– проектная длина выработок составляет 1840 м, для выработки № 1 характерна извилистая форма трассировки, для выработки № 2 – прямолинейная с минимальным числом поворотов;

– форма поперечного сечения выработок – арочная, площадь сечения составляет 17,8 м² в проходке и 17,0 м² в свету;

– для проходки выработок используется буровзрывной комплекс, состоящий из: буровой установки Epiroc Boomer 282, ковшовой погрузочно-доставочной машины (ПДМ) Epiroc ST-1030 и автосамосвала Sandvik TH 320;

– для проветривания выработок используется система вентиляции, состоящая из: 3 наземных вентиляторов, 5 гибких воздухопроводов в стволе № 1, 2 вентиляционных камер, 4 подземных вентиляторов местного проветривания (ВМП) и 2 жестких воздухопроводов в выработках (рис. 2);

– расход воздуха, поступающего в каждую выработку, составляет 20 м³/с; производительность ВМП в вентиляционной камере – 19,3 м³/с; производительность ВМП в нише – 17,2 м³/с; расход воздуха в забое – 15,1 м³/с;

– средняя температура нетронутого массива горных пород, окружающего выработку № 1, составляет 44,5 °С, выработку № 2 – 46,6 °С;

– при температуре наружного воздуха 21,0 °С в результате гидростатического сжатия, трения и теплообмена в выработки № 1 и № 2 поступает воздух с температурой 33,3 и 34,4 °С соответственно.

Параметризация модели развития пожара

Наиболее опасным эндогенным пожаром является пожар, вызванный возгоранием технологического транспорта, поскольку такой пожар характеризуется быстротечным развитием и сопровождается значительными тепло- и газовыделениями. В связи с этим для прогнозирования аварийной аэрогазодинамической обстановки в выработках целесообразно рассмотреть возгорание техники, содержащей максимальную пожарную нагрузку.

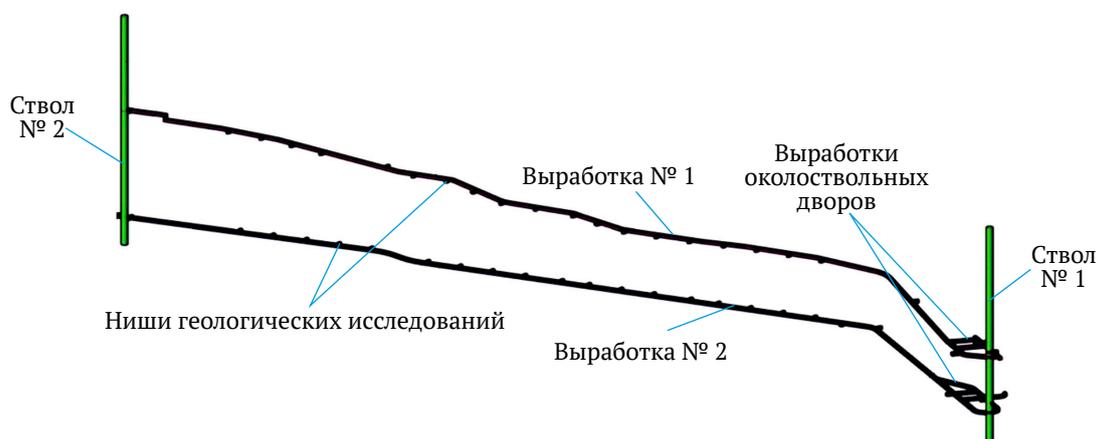


Рис. 1. Принципиальная схема пространственного расположения выработок

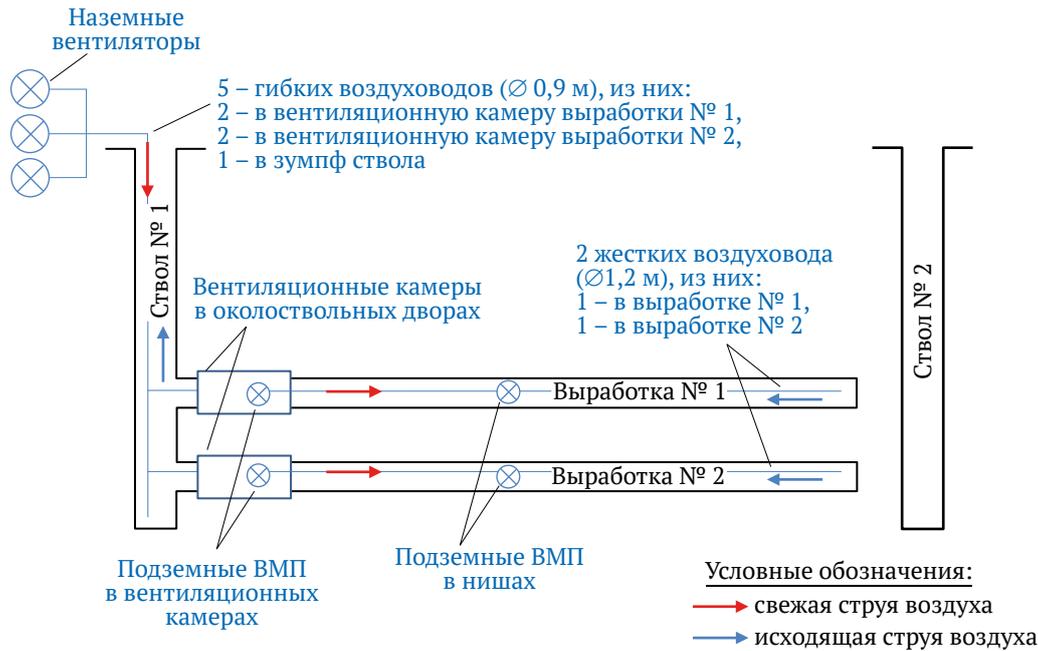


Рис. 2. Принципиальная схема проветривания выработок

Основную пожарную нагрузку машины составляют топливо, масло и резина [13]. Содержание прочих горючих компонентов незначительно, поэтому их влиянием на развитие пожара можно пренебречь. Приблизительно пожарную нагрузку машины можно определить по ее техническому паспорту. Так, объем топливного бака отражает содержание топлива, объем гидравлической системы – содержание масла, а типоразмер колесных покрышек – содержание резины.

Ключевыми параметрами модели развития пожара в горных выработках являются удельные тепло- и газовыделения. Данные параметры являются переменными во времени, поскольку пожар протекает в несколько стадий с разной интенсивностью горения [14]. Для упрощения моделирования целесообразно задаться их эквивалентными значениями на протяжении всех стадий пожара (рис. 3).

Для расчета максимальных тепловыделений, кВт, от горения определенного горючего компонента в некоторый момент времени можно воспользоваться известной формулой [15]:

$$W_i = \psi_i Q_i \eta, \tag{1}$$

где ψ_i – массовая скорость выгорания материала с пожарной нагрузки в данный момент времени, кг/с ($\psi_i = \psi_{spec i} S_i$, где $\psi_{spec i}$ – удельная скорость выгорания материала, кг/(с·м²), S_i – площадь горения в данный момент времени, м²); Q_i – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг; η – коэффициент полноты горения (принимается равным 0,85 в соответствии с [15]).

При этом время, с, выгорания горючей нагрузки определяется по формуле:

$$t_{spec i} = \frac{m_i \eta}{\psi_{spec i} S_i}, \tag{2}$$

где m_i – масса горючего компонента, кг.

Для выражения (2) в качестве площади горения предлагается принимать площадь поверхности сферы, в которую вписана вся масса горючей нагрузки для каждого компонента. Тогда эквивалентом тепловыделений, кВт, от горящей техники на протяжении всех стадий пожара будет являться некоторое среднее значение, определяемое суммированием средних тепловыделений от каждого из компонентов:

$$W_{spec} = \sum_i W_{spec i} \tag{3}$$

При этом среднее значение тепловыделений, кВт, от каждого из компонентов можно определить исходя из максимального времени горения машины t_{max} , которое соответствует времени полного выгорания последнего горящего компонента:

$$W_{spec i} = \frac{m_i \eta Q_i}{t_{max}} \tag{4}$$

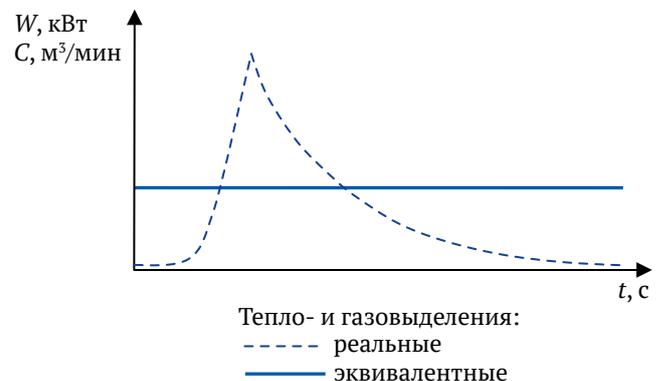


Рис. 3. Принципиальный вид эквивалентных тепло- и газовыделений при горении техники



Таблица 1

Тепловыделения от горения автосамосвала

Машина	Компонент	Масса, кг	Максимальные тепловыделения, МВт	Время выгорания, мин	Эквивалентные тепловыделения, МВт
Sandvik TH 320	топливо	283,0	4,32	39,5	1,58
	масло	340,2	4,54	44,3	1,87
	резина	278,0	1,22	108,0	1,22
	время горения машины и мощность пожара:			108,0	4,67

В условиях исследуемых выработок потенциальными источниками пожара значительной мощности являются горно-выемочная техника – буровая установка Epiroc Boomer 282, ПДМ Epiroc ST-1030, и автосамосвал Sandvik TH 320. Сравнение технических параметров показывает, что наибольшую опасность при горении несет автосамосвал Sandvik TH 320, поскольку он обладает максимальной пожарной нагрузкой. В связи с этим расчет удельных тепло- и газовойделений целесообразно производить только для данной машины.

Результаты расчета эквивалентных тепловыделений при горении автосамосвала Sandvik TH 320 представлены в табл. 1.

Согласно результатам расчета время горения автосамосвала Sandvik TH 320 составит 108,0 мин. При этом средние тепловыделения будут равны 4,67 МВт.

Для расчета удельных газовойделений необходимо знать удельный объем продуктов сгорания при горении определенного компонента техники и состав горючей массы.

Согласно Справочнику руководителя тушения пожара [15] удельный объем продуктов сгорания при горении дизельного топлива, масла, резины составляет 11,95, 11,86, 10,79 м³/кг соответственно. При этом основной состав горючей массы, выделяющейся при сгорании дизельного топлива, масла, резины [16], имеет вид:

– дизель – 86,3 % C^G, 13,3 % H^G, 0,3 % S^G, 0,1 % (O^G + N^G);

– масло – 86,5 % C^G, 12,6 % H^G, 0,4 % S^G, 0,5 % (O^G + N^G);

– резина – 85,5 % C^G, 11,8 % H^G, 2,0 % S^G, 0,7 % (O^G + N^G).

Таким образом, ключевыми компонентами в продуктах сгорания рассматриваемых материалов являются соединения углерода. При этом при пожаре в значительной мере будет происходить выделение только углекислого газа CO₂, в то время как угарный газ CO, являясь побочным продуктом реакции горения, будет существенно выделяться только при недостатке кислорода.

Для упрощения решения задачи аварийного газораспределения предполагается, что содержания кислорода в воздухе, поступающем к очагу пожара, достаточно для нормального протекания реакции

горения, в результате чего содержание угарного газа CO в продуктах горения незначительно. Тогда в качестве характерных газовойделений от пожара можно принять выделения углекислого газа CO₂, м³, которые определяются по формуле [16]:

$$V_{CO_2} = \left(0,0187 + \frac{C^G}{100} \right) V_G, \quad (5)$$

где C^G – содержание углерода C в сгораемом материале, %; V_G – общий объем продуктов горения, м³.

В таком случае удельные газовойделения, м³/мин, углекислого газа CO₂ составят:

$$v_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{t}, \quad (6)$$

где t – время горения техники, мин.

Согласно результатам расчета удельные газовойделения углекислого газа CO₂ при горении автосамосвала Sandvik TH 320 составят 72,2 м³/мин.

Параметризация модели развития взрыва

В условиях горных выработок наиболее вероятными являются взрывы, связанные с воспламенением [12]:

– взрывчатых материалов (несанкционированное возгорание);

– метановоздушной смеси;

– пыли (угольной или сульфидной).

В настоящем исследовании проведен анализ несанкционированного взрыва взрывчатых материалов и взрыва метановоздушной смеси. Исследование взрыва угольной и сульфидной пыли, присутствующей в горных выработках угольных и колчеданных шахт соответственно, в работе не осуществляется. Таким образом, в работе сделан акцент на изучение взрывов в условиях рудников, опасных по газу и не опасных по пыли.

Для оценки последствий от взрыва и разработки мероприятий по его предупреждению и ограничению зоны разрушения необходимо знать распределение давления на фронте ударной волны на некотором удалении от очага взрыва. При этом расчет параметров ударной волны на удалении от места взрыва начинается с определения давления в самом очаге.

Согласно Методике газодинамического расчета² давление в зоне взрыва ΔP_f , МПа, зависит от безразмерной длины активного участка горения \bar{L} в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 4.

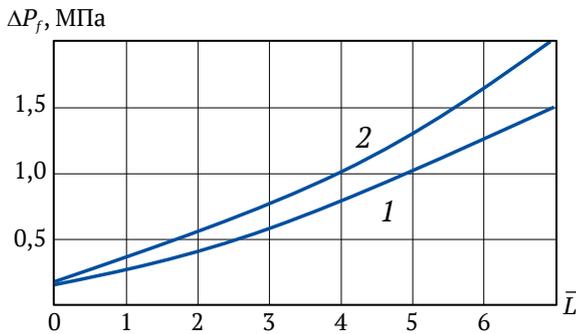


Рис. 4. Зависимость избыточного давления в зоне взрыва от безразмерной длины выработки:
1 – при взрыве метана;
2 – при взрыве метана и угольной пыли

Безразмерная длина активного участка горения \bar{L} представляет собой длину участка выработки от очага воспламенения до границы раздела «горючая смесь – воздух» и определяется по формуле³:

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i P_i}{4 S_i}, \quad (7)$$

где L_i – длина i -го участка зоны взрыва, м; $i = 1, 2, \dots, n$ – фактическое число участков; S_i – площадь поперечного сечения выработки i -го участка, м²; P_i – периметр выработки, м (в случае арочной выработки $P = 3,84\sqrt{S}$).

При расчете несанкционированного взрыва взрывчатых материалов в горной выработке искомым параметр можно определить по формуле [12]:

$$\bar{L} \approx \frac{M_{es} q_{es} P}{7 S^2}, \quad (8)$$

где M_{es} – масса взрывчатого вещества, кг; q_{es} – удельная теплота сгорания взрывчатого вещества, зависящая от его типа, МДж/кг.

Таким образом, для определения давления в очаге несанкционированного взрыва ВВ достаточно знать его тип и массу.

Так, в условиях исследуемых выработок для выполнения одного цикла проходки используется гранулит АС-8 массой 180 кг – в каждой выработке. С учетом этого безразмерная длина активного участка горения составляет 7,3 м.

² Распоряжение Федерального горного и промышленного надзора России «О введении в действие «Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» от 27 апреля 2004 года № Р-7. 16 с.

³ Распоряжение Федерального горного и промышленного надзора России «О введении в действие «Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» от 27 апреля 2004 года № Р-7. 16 с.

Сложнее выполнить расчет давления в очаге взрыва метановоздушной смеси. Это обусловлено тем, что при прогнозном расчете взрыва МВС искомым безразмерную длину активного участка горения \bar{L} , которая фактически определяется объемом горной выработки, заполненной взрывоопасной смесью, можно определить только приближенно.

Одним из оптимальных подходов определения максимального загазованного объема горной выработки, м³ является расчет, учитывающий газоносность горных пород по свободным горючим газам и их минимальную концентрацию, достаточную для возникновения взрыва:

$$V_g = \frac{g S_{sink} (L_{sink} + B) 100}{C_{low}}, \quad (9)$$

где g – газоносность горных пород по свободным горючим газам, м³/м³; S_{sink} – площадь поперечного сечения горной выработки в проходке, м²; L_{sink} – длина заходки, м; B – длина участка породного массива перед горной выработкой, с которого происходят газовыделения (зона наибольшего трещинообразования), м; C_{low} – нижний предел взрываемости метана, %.

Нижний предел взрываемости метана в нормальных условиях составляет 5 %. Однако в условиях давлений, отличающихся от нормального, необходим его пересчет по формуле [17]:

$$C_{low} = \frac{5}{k}, \quad (10)$$

где k – коэффициент пересчета объемной концентрации метана в молярную ($k = p/98070$, где p – барометрическое давление в горной выработке, Па).

Безразмерная длина активного участка горения \bar{L} в таком случае находится по формуле:

$$\bar{L} = \frac{V_g}{S_{expl}}, \quad (11)$$

где S_{expl} – площадь поперечного сечения горной выработки в свету, м².

В представленном подходе предполагается, что выделение метана в призабойное пространство выработки происходит из отбиваемого объема горных пород, а также с участка зоны опорного давления впереди забоя, который наиболее сильно подвержен трещинообразованию (рис. 5). Газовыделения из стенок, кровли и почвы выработки, обнаженных до момента взрывных работ, не учитываются ввиду их незначительности вследствие дегазации данных участков в предыдущих проходческих циклах.

Для условий рассматриваемых выработок длина буровзрывной заходки равна 2,3 м. При этом в соответствии с результатами исследования [18] зона наибольшего трещинообразования распространяется на глубину 5,3 м от забоя. При газоносности пород по свободным горючим газам 0,15 м³/м³ и нижнем пределе взрываемости метана 4,11 % (выработка № 1) и 4,02 % (выработка № 2) искомая безразмерная длина активного участка горения составит 29,1 м и 29,7 м для выработок № 1 и № 2 соответственно.

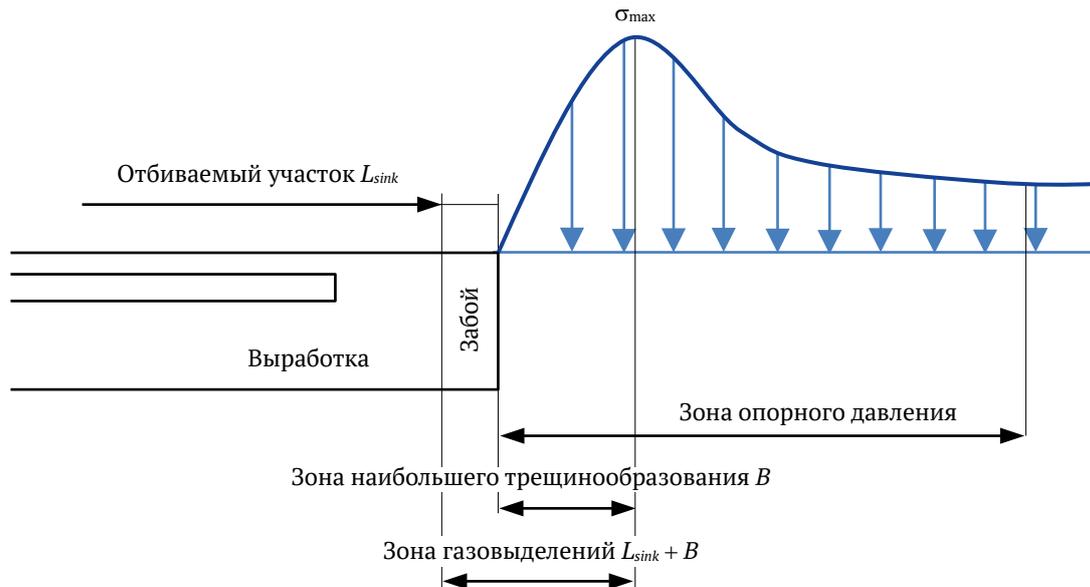


Рис. 5. Зона газовыделений

Результаты моделирования развития пожара

Разработке модели развития пожара предшествует разработка вентиляционной и теплогазодинамической моделей выработок. В АК «АэроСеть» разработка вентиляционной модели начинается с построения топологии вентиляционной сети. Затем всем выработкам задаются аэродинамические параметры (площади поперечного сечения, периметры, длины, коэффициенты шероховатости), на основании которых выполняется расчет аэродинамических сопротивлений элементов сети. После этого в модель вносятся сведения о вентиляционных сооружениях и источниках тяги, характеризующие режим их работы.

Теплогазодинамическая модель параметризуется путем активации/деактивации учета различных физических процессов, влияющих на теплогазораспределение в выработках. Для случая рассмотрения пожара в тупиковой выработке теплогазодинамический расчет должен учитывать гидростатическое сжатие воздуха, работу сил давления, теплообмен в системе «источник горения – породный массив – воздух в выработке – воздух в воздуховоде» и влияние тепловых депрессий (подробное описание математической модели тепловых и аэродинамических процессов в АК «АэроСеть» представлено в работе [19]). Задание в теплогазодинамической модели источника теплогазовыделений с расчетными параметрами (4,67 МВт, 72,2 м³/мин) позволяет выполнить расчет развития пожара с позиции определения газо- и температурораспределений в выработках с течением времени. При этом результаты моделирования напрямую зависят от места расположения источника горения.

В случае рассматриваемых тупиковых выработок отгрузка отбитой горной массы осуществляется по-

грузочно-доставочной техникой, курсирующей между забоями и шахтным стволом. Ввиду этого пожар возможен в любой части тупиковой выработки. Однако с учетом сконцентрированности горных работ именно в призабойном пространстве выработок целесообразно рассмотреть пожар в забое.

Необходимо отметить, что в случае рассматриваемой задачи принимается, что целостность воздуховода при пожаре не нарушается ввиду его жесткого металлического исполнения и расположения очага пожара в забое. Однако при расположении пожара по длине тупиковой выработки и использовании гибкого неогнестойкого воздуховода необходимо учитывать возможное нарушение его герметичности или обрыв в результате теплового воздействия.

Результаты моделирования распределения температуры воздуха спустя 108 мин после возникновения пожара в выработке № 1 представлены на рис. 6. Дополнительно на рисунке указаны значения концентраций углекислого газа CO₂ в ключевых точках выработок.

Согласно результатам моделирования возникновения пожара в устье выработки № 1 не приведет к существенному изменению расхода воздуха в выработке № 2. При этом в очаге пожара температура воздуха достигнет 339,8 °С, а концентрация углекислого газа CO₂ составит 8,43 %. Стоит отметить, что пожар в устье выработки № 1 не приведет к возникновению в выработке № 2 атмосферы, неблагоприятной по составу и температуре. Это обусловлено тем, что разогретые продукты горения, имеющие меньшую плотность в сравнении с воздухом в стволе, будут удаляться в направлении к дневной поверхности. Кроме этого, загазованности выработки № 2 будет препятствовать работа поверхностных вентиляторов, работающих на нагнетание, и вытесняющих дым из выработки № 1 наружу.

Схожие результаты получены при моделировании развития пожара в устье выработки № 2, что обусловлено идентичностью параметров проветривания выработок. Однако в случае пожара в устье выработки № 2 будет происходить попадание продуктов горения в околоствольный двор выработки № 1 в результате диффузионных процессов и тепловой депрессии.

Результаты моделирования распространения ударной волны от взрыва

Модель распространения ударной волны от взрыва так же, как и модель развития пожара, основывается на вентиляционной модели горных выработок. Задание в ней источника взрыва с исходными параметрами (тип и масса ВВ или безразмерная длина ак-

тивного участка горения МВС) позволяет выполнить расчет распределения избыточных давлений в выработках в момент взрыва. При этом результаты моделирования будут зависеть от места расположения источника взрыва.

Несанкционированный взрыв взрывчатых материалов возможен в любой части тупиковой выработки, что обусловлено процессом доставки ВМ от шахтного ствола к забое. В свою очередь, взрыв метановоздушной смеси наиболее вероятен в забое выработки, поскольку именно забой склонен к суфлярым и внезапным газовыделениям. Для возможности выполнения сравнительного анализа последствий от взрывов ВМ и МВС рассматривается их возникновение в забое тупиковой выработки.

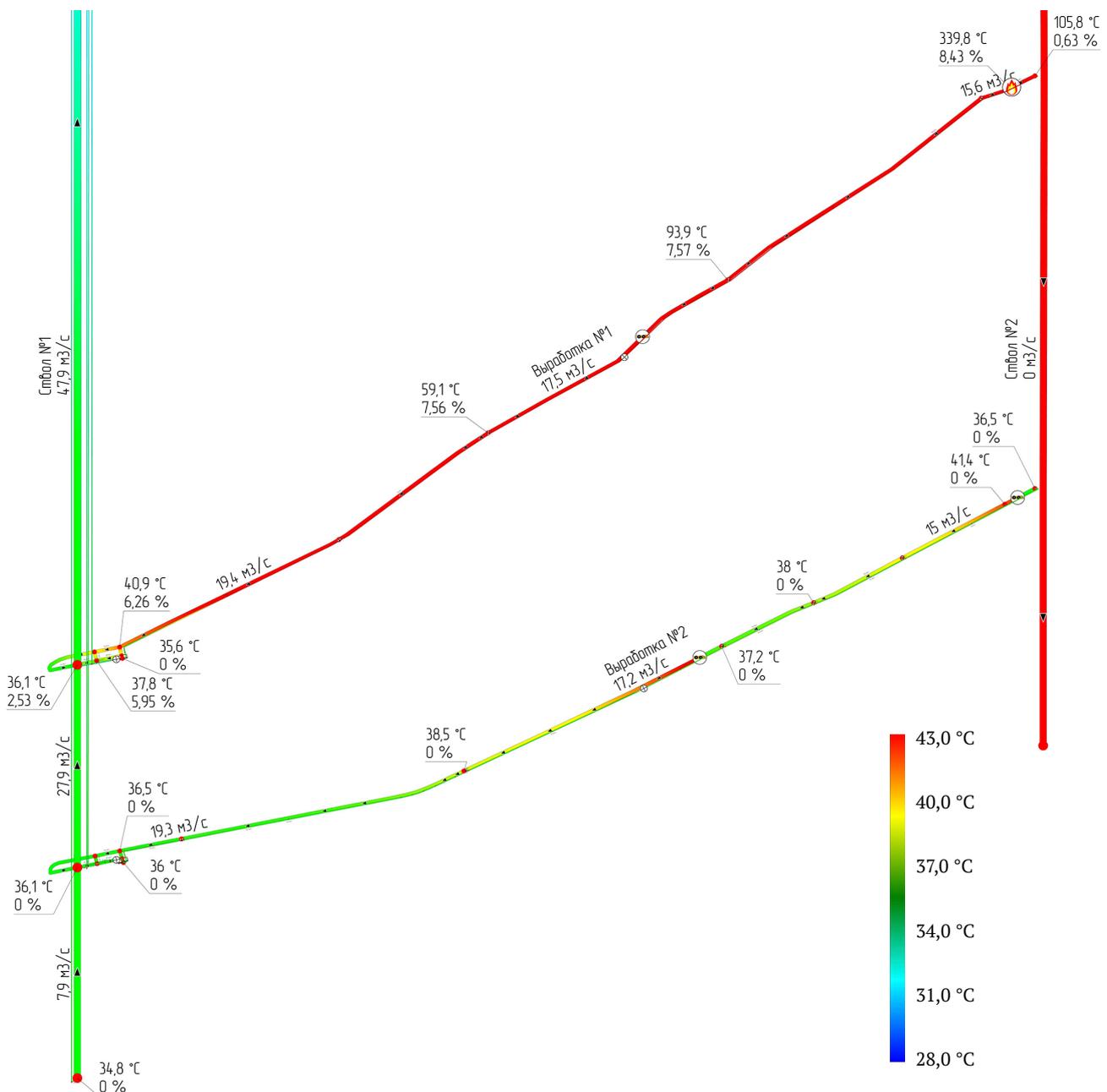


Рис. 6. Распределение температуры воздуха в горных выработках при возникновении пожара в забое выработки № 1

Распределение давления на фронте ударной волны при взрыве в забое выработки № 1 ВМ и МВС представлено на рис. 7. В соответствии с *Методикой газодинамического расчета*⁴ в качестве критерия опасности воздействия ударной волны на людей, находящихся в шахте, принято избыточное давление на фронте волны, равное 0,006 МПа.

⁴ Распоряжение Федерального горного и промышленного надзора России «О введении в действие «Методики газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли» от 27 апреля 2004 года № Р-7. 16 с.

Согласно результатам моделирования при несанкционированном взрыве ВМ в забое выработки № 1 избыточное давление в очаге взрыва составит 0,25 МПа. При этом зона опасного воздействия ударной волны распространится на расстояние 560 м, что соответствует 30 % от общей протяженности тупиковой выработки (1840 м). При взрыве МВС в забое выработки № 1 избыточное давление в очаге взрыва составит 0,6 МПа, а зона опасного воздействия ударной волны распространится на расстоянии 643 м, что соответствует 35 % от общей протяженности тупиковой выработки. Схожие результаты моделирования

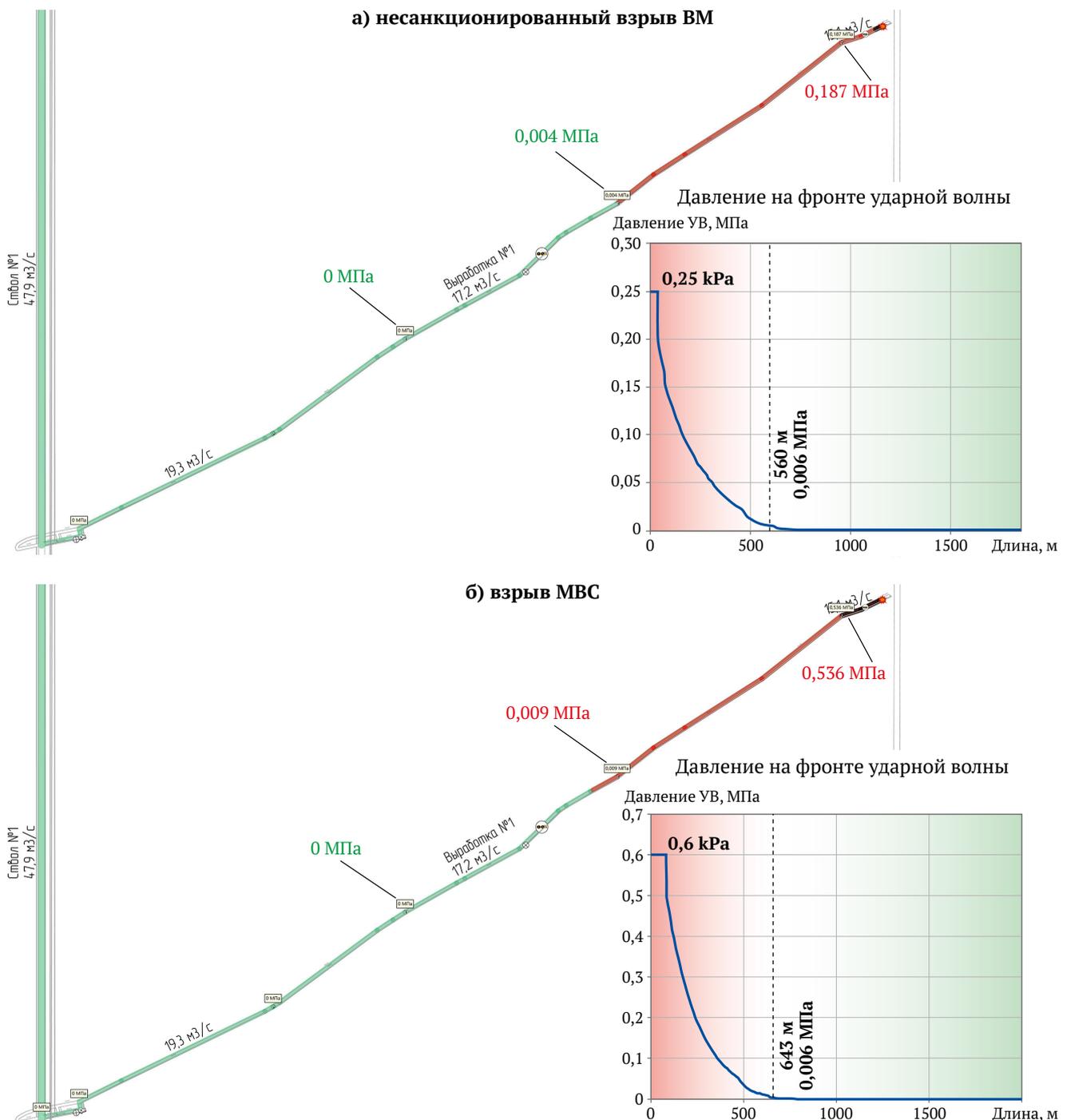


Рис. 7. Распределение давления на фронте ударной волны при взрыве в забое выработки № 1: а – взрыв ВМ; б – взрыв МВС



получены при рассмотрении взрыва в устье выработки № 2 с тем только отличием, что в данном случае зона опасного воздействия ударной волны будет иметь больший радиус распространения по причине прямолинейности выработки № 2. Таким образом, в условиях рассматриваемых выработок наибольшую опасность несет взрыв МВС.

Заключение

В настоящем исследовании сформулирован общий принцип определения параметров моделей рудничных пожаров и взрывов для оценки их развития при помощи АК «АэроСеть». Согласно этому принципу параметризация модели развития пожара заключается в определении тепло- и газовой выделений от источника горения с учетом следующих особенностей:

– для прогнозирования возможного наиболее неблагоприятного состояния рудничной атмосферы при возникновении шахтного экзогенного пожара целесообразно рассмотрение возгорания только техники с максимальной пожарной нагрузкой;

– основную пожарную нагрузку техники составляют топливо, масло и резина, поэтому приблизительно пожарную нагрузку можно определить на основании технических характеристик машины, таких как объем топливного бака, объем гидравлической системы, типоразмер колесных покрышек;

– в качестве тепло- и газовой выделений от горячей техники целесообразно принимать эквивалентные значения, определяемые пересчетом по отдельным горючим компонентам;

– с учетом химического состава пожарной нагрузки для оценки ядовитости рудничной атмосферы при пожаре достаточно рассмотреть распространение углекислого газа CO_2 .

В свою очередь, параметризация модели развития взрыва заключается в определении избыточного давления на фронте ударной волны в очаге взрыва с учетом следующих особенностей:

– избыточное давление на фронте ударной волны в очаге взрыва определяется в зависимости от безразмерной длины активного участка горения \bar{L} ;

– для случая несанкционированного взрыва МВ параметр \bar{L} определяется массой и удельной теплотой сгорания взрывчатого вещества, а также геометрическими параметрами выработки;

– для случая взрыва МВС параметр \bar{L} определяется с учетом газоносности пород по свободным горючим газам, длины буровзрывной заходки, размеров области повышенного трещинообразования, а также нижнего предела взрываемости метана, пересчитываемого по фактическому давлению в горной выработке.

Список литературы

1. Пахомов В.П., Рудакова Л.В. Техногенные катастрофы горнопромышленного характера. *Экономика региона*. 2006;(2):23–36.
2. Ремизов А.В., Хобта А.А. Причины возникновения аварийных ситуаций в угольных шахтах и возможности их предотвращения. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2016;(1):14–16. URL: <https://www.sibsiu.ru/downloads/public/vestniksibgiu/vestnik15.pdf>
3. Brake D.J. Fire modelling in underground mines using Ventsim Visual VentFIRE Software. In: Chalmers D. (ed.) *The Australian Mine Ventilation Conference*. Adelaide, South Australia, 1–3 July 2013. The AusIMM; 2013. Pp. 265–276. URL: https://ventsim.com/wp-content/uploads/2019/04/Fire_Modelling_in_Underground_Mines_using_Ventsim_VentFIRE.pdf
4. De Rosa M.I. *Analysis of mine fires for all US metal/non-metal mining categories, 1990–2001*. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH); 2004. URL: <https://www.cdc.gov/NIOSH/Mining/UserFiles/works/pdfs/2005-105.pdf>
5. Палеев Д.Ю., Лукашов О.Ю. Программа расчета вентиляционных режимов в шахтах и рудниках. *Горная промышленность*. 2007;(6):20–23. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/866-programma-rascheta-ventilyatsionnykh-rezhimov-v-shakhtakh-i-rudnikakh>
6. Lönnemark A., Blomqvist P. *Emissions from tyre fires*. Borås, Sweden: SP Swedish National Testing and Research Institute; 2005.
7. Лискова М.Ю., Наумов И.С. Моделирование аварийных ситуаций в шахтах и рудниках. *Научные исследования и инновации*. 2013;7(1–4):78–81.
8. Шалимов А.В. Численное моделирование газоздушных потоков в экстремальных ситуациях и аварийных режимов проветривания рудников и шахт. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2011;(6):84–92. (Перев. вер.: Shalimov A.V. Numerical modeling of air flows in mines under emergency state ventilation. *Journal of Mining Science*. 2011;47(6):807–813. <https://doi.org/10.1134/S106273914706013X>)
9. Hansen R., Ingason H. *Full-scale fire experiments with mining vehicles in an underground mine*. Research report. Västerås, Sweden: Mälardalen University; 2013.
10. Hansen R. Analysis of methodologies for calculating the heat release rates of mining vehicle fires in underground mines. *Fire Safety Journal*. 2015;71:194–216. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.11.008>
11. Данилов А.И., Маслак В.А., Вагин А.В., Сиваков И.А. Численное моделирование пожара в вагоне метрополитена. *Пожаровзрывобезопасность*. 2017;26(10):27–35. <https://doi.org/10.18322/pvb.2017.26.10.27-35>



12. Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Костеренко В. Н. и др. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах. В: *Библиотека горного инженера. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 3. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр»; 2011. 312 с.*
13. Смолин И. М., Полетаев Н. Л., Гордиенко Д. М. и др. *Пособие по применению СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»*. М.: ВНИИПО; 2014. 147 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/c84/4293768102.pdf>
14. Карсаков О. Г. К вопросу обоснования критического времени пожара на начальной стадии. *Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2015;4(1–1):330–332.
15. Иванников В. П., Ключ П. П. *Справочник руководителя тушения пожара*. М.: Стройиздат; 1987. 288 с.
16. Быстрицкий Г. Ф., Гасангаджиев Г. Г., Кожиченков В. С. *Общая энергетика. Основное оборудование*. Учебник. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Юрайт; 2018. 416 с. URL: https://mx3.urait.ru/uploads/pdf_review/90FAE97C-FD7D-41FC-ACD5-6E038A39261C.pdf
17. Колесниченко И. Е., Колесниченко Е. А., Артемьев В. Б., Черечукин В. Г. Зависимость объемного концентрационного предела взрываемости метана от физических параметров атмосферы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S7):174–181.
18. Черданцев Н. В., Зыков В. С. Решение задачи определения параметров опорного давления в окрестности пластовой выработки на основе вычислительного эксперимента. *Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли*. 2017;(3):16–30. URL: <http://vestnik.nc-vostnii.ru/arhiv/vypusk-3-2017/reshenie-zadachi-opredeleniya-parametrov-opornogo-davleniya-v-okrestnosti-plastovoy-vyrabotki-na-osnove-vychislitelnogo-eksperimenta/>
19. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;(2):154–161. (Перев. вер.: Levin L. Y., Semin M. A., Zaitsev A. V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. *Journal of Mining Science*. 2014;50(2):371–378. <https://doi.org/10.1134/S1062739114020203>)

References

1. Pakhomov V. P., Rudakova L. V. Catastrophes formed by a technical reaction of the character of mining industries. *Economy of Regions*. 2006;(2):23–36. (In Russ.)
2. Remizov A. V., Hobta A. A. The causes of emergency situations in coal mines and the possibilities of their prevention. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2016;(1):14–16 (In Russ.) URL: <https://www.sibsiu.ru/downloads/public/vestniksibgu/vestnik15.pdf>
3. Brake D. J. Fire modelling in underground mines using Ventsim Visual VentFIRE Software. In: Chalmers D. (ed.) *The Australian Mine Ventilation Conference*. Adelaide, South Australia, 1–3 July 2013. The AusIMM; 2013. Pp. 265–276. URL: https://ventsim.com/wp-content/uploads/2019/04/Fire_Modelling_in_Underground_Mines_using_Ventsim_VentFIRE.pdf
4. De Rosa M. I. *Analysis of mine fires for all US metal/non-metal mining categories, 1990–2001*. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH); 2004. URL: <https://www.cdc.gov/NIOSH/Mining/UserFiles/works/pdfs/2005-105.pdf>
5. Paleyev D., Lukashov O. Software complex “Mining Aerology (Ventilation)”. *Russian Mining Industry*. 2007;(6):20–23. (In Russ.) URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/866-programma-rascheta-ventilyatsionnykh-rezhimov-v-shakhtakh-i-rudnikakh>
6. Lönnemark A., Blomqvist P. *Emissions from tyre fires*. Borås, Sweden: SP Swedish National Testing and Research Institute; 2005.
7. Liskova M. Yu., Naumov I. S. Design of emergency situations in mines. *Nauchnyye Issledovaniya i Innovatsii*. 2013;7(1–4):78–81. (In Russ.)
8. Shalimov A. V. Numerical modeling of air flows in mines under emergency state ventilation. *Journal of Mining Science*. 2011;47(6):807–813. <https://doi.org/10.1134/S106273914706013X> (Orig. ver.: Shalimov A. V. Numerical modeling of air flows in mines under emergency state ventilation. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2011;(6):84–92. (In Russ.))
9. Hansen R., Ingason H. *Full-scale fire experiments with mining vehicles in an underground mine*. Research report. Västerås, Sweden: Mälardalen University; 2013.
10. Hansen R. Analysis of methodologies for calculating the heat release rates of mining vehicle fires in underground mines. *Fire Safety Journal*. 2015;71:194–216. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.11.008>
11. Danilov A. I., Maslak V. A., Vagin A. V., Sivakov I. A. Numerical simulation of a subway car fire. *Fire and Explosion Safety*. 2017;26(10):27–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.18322/pvb.2017.26.10.27-35>
12. Paleev D. Yu., Lukashov O. Yu., Kosterenko V. N. et al. Shock waves during explosions in coal mines. In: *Mining Engineer’s Library. Volume 6 “Industrial Safety”. Part 3*. Moscow: Gornoe Delo Publ, Cimmerian Center LLC; 2011. 312 p. (In Russ.)



13. Smolin I.M., Poletayev N.L., Gordienko D.M. et al. *Manual for the application of SP 12.13130.2009 "Determining the categories of premises, buildings, and outdoor installations in terms of explosion and fire hazard"*. Moscow: VNIPO Publ.; 2014. 147 p. (In Russ.) URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/c84/4293768102.pdf>
14. Karsakov O.G. On the problem of justifying the critical time of a fire at the initial stage. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy*. 2015;4(1–1):330–332. (In Russ.)
15. Ivannikov V.P., Klyus P.P. *Fire extinguishing manager's handbook*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1987. 288 p. (In Russ.)
16. Bystritsky G.F., Gasangadzhiev G.G., Kozhichenkov V.S. *General power engineering. Core equipment*. Textbook. 2nd update. Moscow: Yurait Publ. House; 2018. 416 p. (In Russ.) URL: https://mx3.urait.ru/uploads/pdf_review/90FAE97C-FD7D-41FC-ACD5-6E038A39261C.pdf
17. Kolesnitchenko I.E., Kolesnitchenko E.A., Artemiev V.B., Icheretchukin V.G. Dependence of volumetrically concentration limit of methane blasting on physical parameters of the atmosphere. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S7):174–181. (In Russ.)
18. Cherdancev N.V., Zykov V.S. The solution to a problem of in-seam working areas abutment pressure parameters determination based on the simulation experiment. *Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2017;(3):16–30. (In Russ.) URL: <http://vestnik.nc-vostnii.ru/arhiv/vypusk-3-2017/reshenie-zadachi-opredeleniya-parametrov-opornogo-davleniya-v-okrestnosti-plastovoy-vyrabotki-na-osnove-vychislitel'nogo-eksperimenta/>
19. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. *Journal of Mining Science*. 2014;50(2):371–378. <https://doi.org/10.1134/S1062739114020203> (Orig. ver.: Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2014;(2):154–161. (In Russ.))

Информация об авторах

Максим Олегович Пересторонин – аспирант, сектор горной теплофизики, отдел аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0009-0003-0203-9304](https://orcid.org/0009-0003-0203-9304), Scopus ID [57701516700](https://scopus.com/authorid/57701516700); e-mail per.maks1m.97@gmail.com

Олег Сергеевич Паршаков – кандидат технических наук, сектор горной теплофизики, отдел аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5545-442X](https://orcid.org/0000-0001-5545-442X), Scopus ID [57202379375](https://scopus.com/authorid/57202379375); e-mail olegparshakov@gmail.com

Максим Дмитриевич Попов – аспирант, сектор горной теплофизики, отдел аэрологии и теплофизики, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-6388-608X](https://orcid.org/0009-0007-6388-608X), Scopus ID [57208722129](https://scopus.com/authorid/57208722129); e-mail maxpan09@gmail.com

Information about the authors

Maxim O. Perestoronin – Postgraduate Student, Mining Thermal Physics Sector, Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0009-0003-0203-9304](https://orcid.org/0009-0003-0203-9304), Scopus ID [57701516700](https://scopus.com/authorid/57701516700); e-mail per.maks1m.97@gmail.com

Oleg S. Parshakov – Cand. Sci. (Eng.), Mining Thermal Physics Sector, Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5545-442X](https://orcid.org/0000-0001-5545-442X), Scopus ID [57202379375](https://scopus.com/authorid/57202379375); e-mail olegparshakov@gmail.com

Maxim D. Popov – Postgraduate Student, Mining Thermal Physics Sector, Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0009-0007-6388-608X](https://orcid.org/0009-0007-6388-608X), Scopus ID [57208722129](https://scopus.com/authorid/57208722129); e-mail maxpan09@gmail.com

Поступила в редакцию 06.10.2022
Поступила после рецензирования 19.01.2023
Принята к публикации 27.01.2023

Received 06.10.2022
Revised 19.01.2023
Accepted 27.01.2023



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-21>

УДК. 621.671.22



Разработка и обоснование усовершенствованного варианта классической схемы главного водоотлива кимберлитового рудника с этажным обрушением руды

Н. П. Овчинников   *Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация* ovchinnlar1986@mail.ru

Аннотация

Практика показывает, что с ростом производственной мощности кимберлитового рудника отмечается увеличение объемного содержания твердых частиц в шахтных водах, откачиваемых из его водосборных горных выработок. На руднике «Удачный» в связи с высокой производительностью по сравнению с другими отечественными кимберлитовыми рудниками отмечаются более высокая концентрация взвешенных твердых частиц в шахтных водах, а также интенсивное заиливание водосборных горных выработок системы главного водоотлива. Данные обстоятельства крайне негативно влияют на эффективность эксплуатации насосного оборудования и надежности погрузочно-доставочных машин. Для обеспечения более качественного осветления шахтных вод в водосборных горных выработках и дальнейшего в них обезвоживания осевшей ило-шламовой пульпы предложен усовершенствованный вариант классической схемы главного водоотлива кимберлитового рудника, где применяется технология этажного обрушения руды. Кроме того, разработана методика по обоснованию рабочих параметров водосборных горных выработок, учитывающая их продолжительность нахождения в процессе очистки от ило-шламовых отложений, седиментационные характеристики твердой фазы, а также реологические характеристики жидкой фазы шахтных вод.

Ключевые слова

кимберлитовый рудник, главный водоотлив, эффективность, механические примеси, водосборник, осветление воды, обезвоживание, методика

Для цитирования

Ovchinnikov N. P. Development and substantiation of an improved version of a main drainage facility classical scheme at a kimberlite mine developed by block caving method. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):162–172. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-21>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research paper

Development and substantiation of an improved version of a main drainage facility classical scheme at a kimberlite mine developed by block caving method

N. P. Ovchinnikov   *North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Yakutsk, Russian Federation* ovchinnlar1986@mail.ru

Abstract

Evidence demonstrates that as the production capacity of a kimberlite mine increases, there is a corresponding increase in the volumetric concentration of suspended solids in the mine water extracted from its water-collecting workings. The Udachny mine, known for its high productivity in comparison to other domestic kimberlite mines, experiences a higher concentration of suspended solids in the mine waters, leading to significant sludge settling within the primary drainage facility's water-collecting workings. This detrimental effect adversely affects the operational efficiency of pumping equipment and the reliability of LHDs. To address these issues, an enhanced version of the conventional main drainage facility scheme, specifically designed for kimberlite mine utilizing the block caving method, is proposed. This modified scheme aims to provide improved clarification of the mine water in the water-collecting workings and facilitate more efficient dewatering of the settled slurry sludges. Furthermore, a methodology has been developed to determine the

optimal operating parameters for the water-collecting workings. This methodology takes into account factors such as the time required for slurry sludge removal, the sedimentation characteristics of the solid phase, and the rheological properties of the liquid phase of the mine water.

Keywords

kimberlite mine, main drainage facility, efficiency, suspended solids, water collector, water clarification, dewatering, technique

For citation

Ovchinnikov N. P. Development and substantiation of an improved version of a main drainage facility classical scheme at a kimberlite mine developed by block caving method. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):162–172. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-21>

Введение

Рудник «Удачный» имени Ф. Б. Андреева Удачинского ГОКа в настоящее время является самым производительным и пока единственным подземным горным предприятием АК «АЛРОСА», где применяется технология этажного обрушения [1–3].

Одной из главных причин ухода от традиционно используемой технологии закладки выработанного пространства твердеющими смесями в пользу технологии этажного обрушения на рассматриваемом руднике стало существенное снижение расхода цемента.

Такой положительный опыт применения данной технологии предопределил ее дальнейшее использование при подземной отработке кимберлитовой трубки «Юбилейная», являющейся наиболее крупным алмазонасным месторождением Российской Федерации, которая будет обрабатываться до 2035 г. открытым способом.

Исследованиями доказано, что с повышением производственной мощности кимберлитового рудника отмечается увеличение объемного содержания твердых частиц в шахтных водах, откачиваемых из его водосборных горных выработок.

На руднике «Удачный» в связи с высокой производительностью по сравнению с другими отечественными кимберлитовыми рудниками АК «АЛРОСА» отмечается более высокая концентрация взвешенных твердых частиц в шахтных водах, а также интенсив-

ное заиливание осветляющих резервуаров и водосборников системы главного водоотлива [4]. Установлено, что данные обстоятельства отрицательно сказываются на надежности и энергоэффективности насосного оборудования и надежности погрузочно-доставочных машин. К примеру, увеличение на 1 г в шахтных водах усредненной концентрации k механических примесей на выходе из водосборников ведет к ожидаемому росту суммарных затрат на электропотребление секционных насосов S_1 – на 1,16 млн руб/год, на выполнение их капитальных ремонтов S_2 – на 3,4 млн руб/год (рис. 1, а, б).

В связи с этим на сегодняшний день актуальны разработка и обоснование различного рода технологических решений по минимизации отрицательного воздействия твердой фазы шахтных вод, которые в перспективе будут полезны при проектировании подземного рудника «Юбилейный».

Тщательный анализ различных открытых источников свидетельствует, что вопросам повышения эффективности рудничного водоотлива путем снижения содержания и негативного воздействия твердой фазы шахтных вод уделено достаточное количество работ. Несмотря на многообразие работ по тематике исследования, описанные в них технологические решения в перспективе были бы малоэффективны в условиях кимберлитового рудника с этажным обрушением руды.

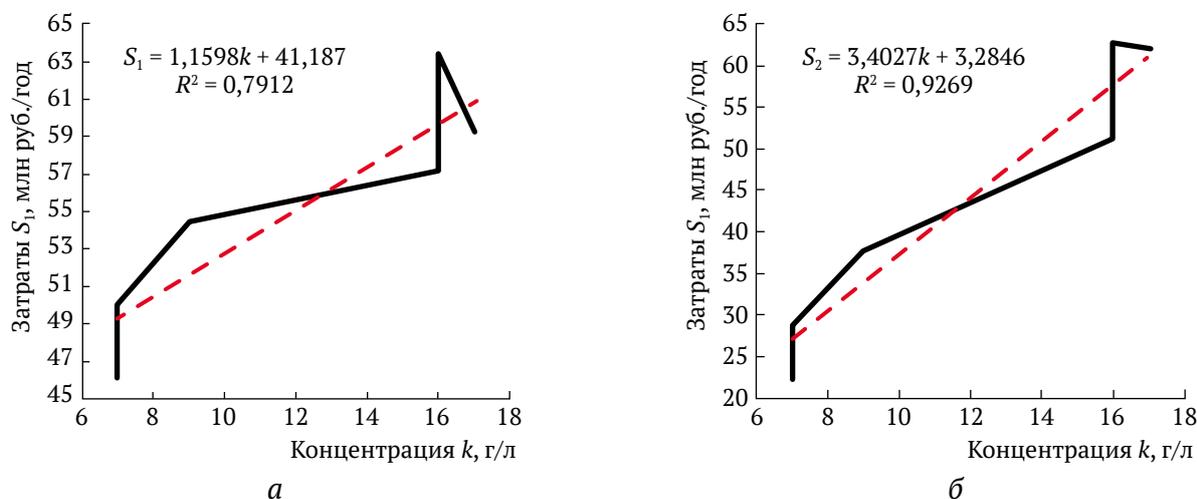


Рис. 1. Зависимости влияния усредненной концентрации k механических примесей в шахтных водах на суммарные затраты на электропотребление секционных насосов S_1 (а) и проведение их капитальных ремонтов S_2 (б)

Одним из недостатков водоотливной установки [5, 6], в структуру которой входит гидроэлеватор, является работа уплотнительных элементов центробежных насосов со стороны всасывания при давлении выше критической величины.

Практическое использование водоотливной установки с самоочищающимися водосборниками [7] и мобильной шламоборной установкой на базе погружно-доставочной машины [8] целесообразно при подземной разработке месторождений полезных ископаемых с гидрозакладкой выработанного пространства.

Недостатком технологического решения [9] в случае его использования на руднике с этажным обрушением руды является преждевременный выход из строя стальных пластин перегородки в связи с высокой агрессивностью шахтных вод к металлу.

При внедрении водоотливной установки может отмечаться большой риск закупоривания ило-шламовыми отложениями и отказа гибкого трубопровода погружного насоса, входящего в структуру установки.

Отрицательной стороной применения реактора-осветлителя [10] является использование при его работе химических реагентов, закачка которых в недра вместе с шахтными водами может привести к дополнительным финансовым затратам и ухудшению экологической обстановки в районе расположения кимберлитовой трубки. Указанные недостатки характерны также для технологического решения, описанного в [11]. Для эффективного внедрения решения [12] требуется предварительная очистка воды.

Согласно данным рис. 2 усредненная концентрация взвешенных твердых частиц, содержащихся в откачиваемых шахтных водах в условиях системы главного водоотлива рудника «Удачный», снижается с 25 до 16 г/л по мере их движения в водосборных горных выработках [13].

Таким образом, констатируем, что с увеличением емкости осветляющих резервуаров качество осветления шахтных вод должно значительно повыситься. Так как строительство водосборных горных выработок потребует существенных финансовых затрат, то для достижения наибольшей степени эффективности комплекса главного водоотлива актуальным становится разработка методики по обоснованию рабочих параметров осветляющих резервуаров. Не стоит забывать о том, что более качественное осветление шахтных вод вызовет рост объема осевшей ило-шламовой пульпы, процесс удаления которой ограничен во времени. В связи с этим дополнительно встает вопрос о создании технологии по эффективному и оперативному обезвоживанию ило-шламовых отложений.

Целью работы является разработка усовершенствованного варианта классической схемы главного водоотлива кимберлитового рудника с этажным обрушением руды, а также методики по обоснованию рабочих параметров осветляющих резервуаров для качественного осветления в них шахтных вод и дальнейшего обезвоживания осевшей ило-шламовой пульпы.

Описание усовершенствованной классической схемы главного водоотлива рудника с этажным обрушением руды

На рис. 3 изображен усовершенствованный вариант классической схемы главного водоотлива кимберлитового рудника с этажным обрушением руды. Рассмотрим более подробно принцип его работы и основные достоинства.

Стекающие в подземный рудник шахтные воды поступают в рабочий осветляющий резервуар (см. рис. 3, поз. 1). У проектных осветляющих резервуаров дальняя стенка представляет собой бетонную перемычку (см. рис. 3, поз. 2) с вмонтированными в нее металлическими трубами (см. рис. 3, поз. 3), на концах которых установлены шаровые краны для сброса осветленной воды.

В процессе заполнения осветляющего резервуара шахтными водами происходит оседание большей части содержащихся в их составе взвешенных твердых частиц. Переливающаяся через бетонную перемычку осветленная вода самотеком стекает в один из двух водосборников (см. рис. 3, поз. 4), которые так же, как и осветляющие резервуары, работают попеременно (один – в работе; один – в стадии очистки от осевшей ило-шламовой пульпы).

Осветленная вода откачивается насосным оборудованием главной водоотливной установки (см. рис. 3, поз. 5) на дневную поверхность.

При достижении сильного заиления осветляющий резервуар выводится из работы.

Практика показывает, что на момент вывода из работы заиленный осветляющий резервуар обычно разделен на следующие слои: внешний – слой исходных шахтных вод; промежуточный – нейтральный слой; нижний – слой сгущенного твердого осадка.

Внешний слой по истечении определенного времени осветляется и затем сбрасывается через трубы верхней части бетонной перемычки в рабочий водосборник.

После этого происходит более длительное отстаивание оставшейся в осветляющем резервуаре ило-шламовой пульпы, представленной промежуточным и нижним слоями.

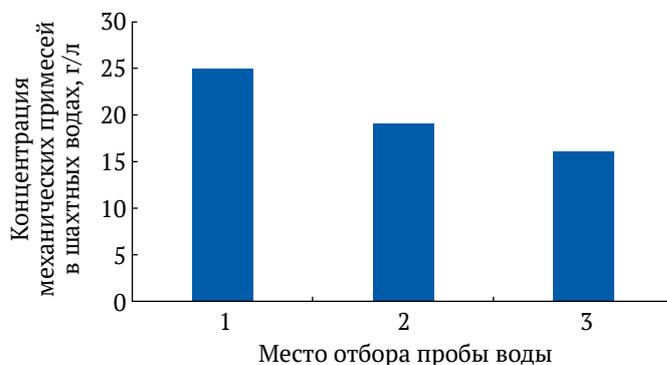


Рис. 2. Концентрация механических примесей в водосборных горных выработках:

1 – перед осветляющим резервуаром; 2 – перед водосборником; 3 – после водосборника

Выделившиеся в процессе отстаивания шахтные воды затем сбрасываются или в случае забивки труб нижней части бетонной перемычки сгущенными ило-шламовыми отложениями перекачиваются в рабочий водосборник погружным шламовым насосом (см. рис. 3, поз. 6), перемещаемым с помощью кран-балки (см. рис. 3, поз. 7).

Насос должен быть без агитатора (мешалки), так как это позволит исключить вероятность взмучивания осевшей ило-шламовой пульпы в процессе его работы.

При необходимости оперативно попасть в осветляющий резервуар можно с помощью лестницы (см. рис. 3, поз. 8), смонтированной на бетонной перемычке.

Оставшаяся обезвоженная ило-шламовая пульпа вывозится из осветляющего резервуара ковшом погрузочно-доставочной машины и в конечном итоге транспортируется на дневную поверхность через ствол.

Методика по обоснованию рабочих параметров осветляющих резервуаров

Для качественного осветления шахтных вод в осветляющем резервуаре необходимо соблюдать следующее условие:

$$t_{от} \geq t_{ос}, \quad (1)$$

где $t_{от}$ – время отстаивания воды в осветляющем резервуаре, ч; $t_{ос}$ – время осаждения большинства взвешенных твердых частиц, содержащихся в шахтных водах, ч.

При этом:

$$t_{от} = \frac{V}{q}, \quad (2)$$

где V – вместимость осветляющего резервуара, m^3 ; q – усредненный водоприток в рудник, $m^3/ч$.

Для расчета оптимальной величины параметра V необходимо знать время $t_{ос}$.

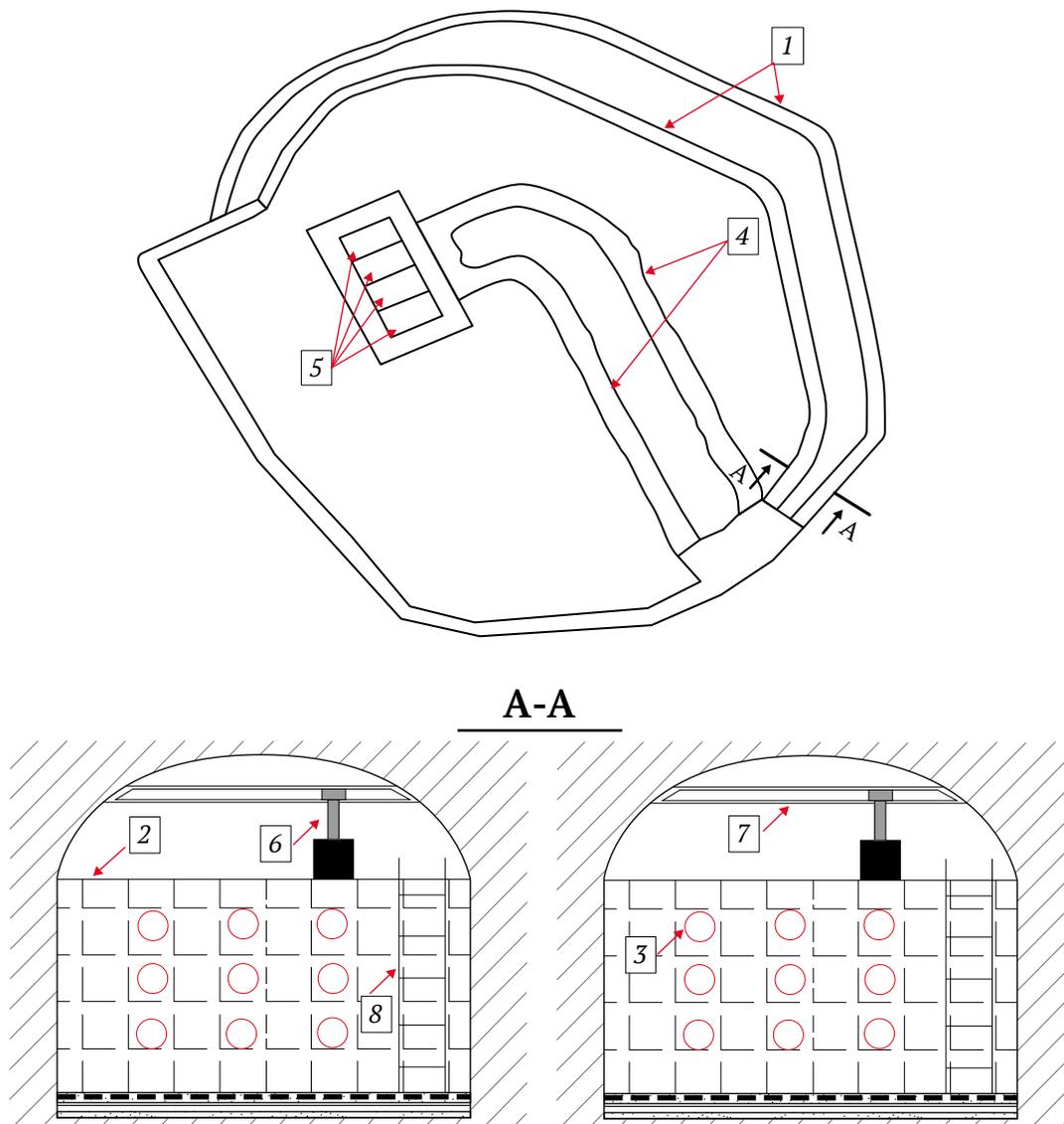


Рис. 3. Предлагаемая технологическая схема главного водоотлива:

1 – осветляющий резервуар; 2 – бетонная перемычка; 3 – трубы; 4 – водосборник; 5 – насосы водоотливной установки; 6 – погружной насос; 7 – кран-балка; 8 – лестница

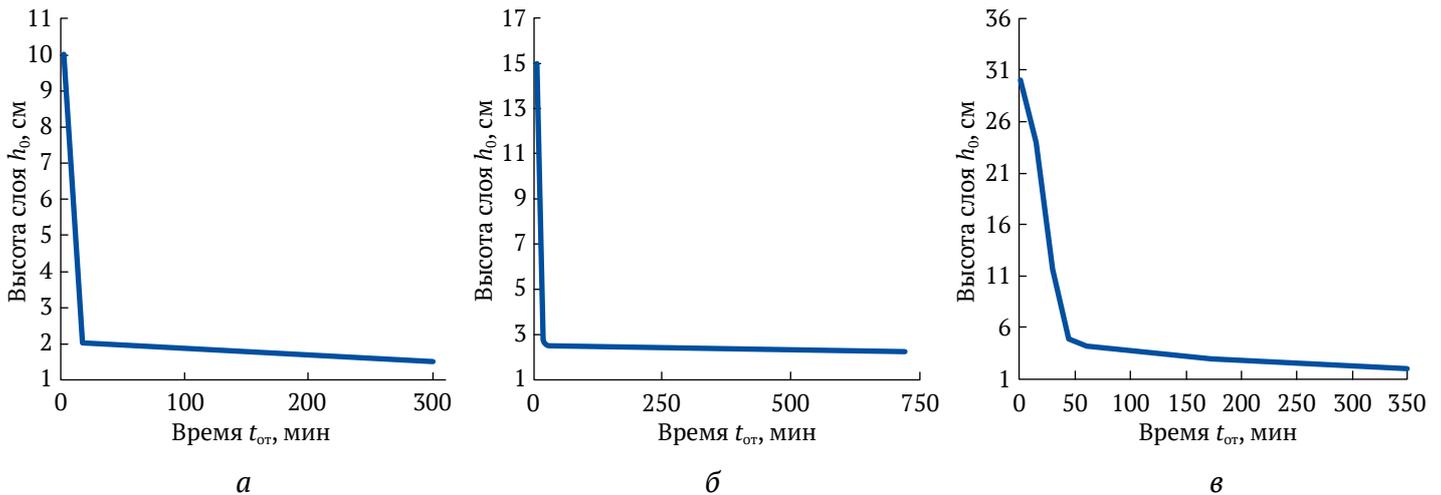


Рис. 4. Зависимости высоты слоя ило-шламовой пульпы h_0 от времени отстаивания шахтных вод $t_{от}$ при их различных рабочих уровнях h в мерных емкостях: а – 10 см; б – 15 см; в – 30 см

Установить его значение в реальных производственных условиях представляется весьма сложным. В таком случае наиболее обоснованным решением является моделирование процесса осаждения взвешенных твердых частиц в осветляющем резервуаре в лабораторных условиях.

Время $t_{ос}$ зависит от числа Рейнольдса Re , а также рабочего уровня шахтных вод h в осветляющем резервуаре [14–16].

Число Рейнольдса Re определяется как:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad (3)$$

где ρ – плотность шахтных вод, кг/м³; v – скорость движения шахтных вод в осветляющем резервуаре, м/с; D – гидравлический диаметр осветляющего резервуара, м; μ – динамическая вязкость шахтных вод, Па·с.

Здесь

$$v = \frac{q}{3600bh}, \quad (4)$$

где b – ширина горной выработки под осветляющий резервуар, м; D – диаметр (при условном прямоугольном сечении осветляющего резервуара)

$$D = \frac{4hb}{2(h+b)}. \quad (5)$$

Для установления времени $t_{от}$, необходимого для качественного осветления шахтных вод, необходимо выполнить седиментационный анализ их твердой фазы. В качестве объекта исследования выступили пробы шахтных вод, отобранные из действующих осветляющих резервуаров главной водоотливной установки рудника «Удачный».

Динамика изменения высоты ило-шламовой пульпы h_0 в зависимости от времени $t_{от}$ и рабочего уровня воды h в мерных емкостях наглядно представлена на рис. 4, а–в [13].

Установлено, что преобладающая доля взвешенных частиц (около 75–80 %), содержащихся в шахтных водах, поступающих в осветляющие резервуары главного водоотлива подземного рудника «Удачный», активно переходит в состояние шламово-иловой пульпы через 17 мин при уровне воды $h = 10$ см; через 30 мин при уровне воды $h = 15$ см; через 45 мин при уровне воды $h = 30$ см. Затем, как показывают исследования, скорость осаждения взвешенных частиц и уплотнения осадка резко падает.

На основании математической обработки полученных в результате седиментационного анализа массива данных была выведена эмпирическая формула, позволяющая рассчитать минимальное время отстаивания шахтных вод $t_{от \min}$, по истечении которого оседает большая часть взвешенных твердых частиц, применительно к осветляющим резервуарам главной водоотливной установки рудника «Удачный», исходя от рабочего уровня воды h в нем (при условии ламинарного режима течения жидкости) (рис. 5) [13].

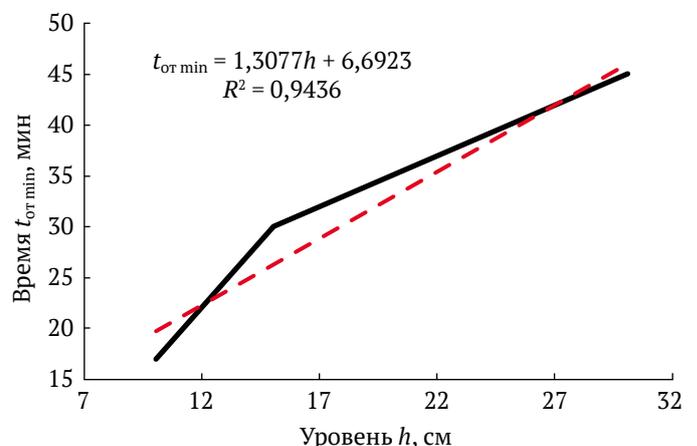


Рис. 5. Зависимость минимального времени отстаивания шахтных вод $t_{от \min}$ от их рабочего уровня h в мерной емкости



При ламинарном режиме течения жидкости время $t_{от\ min}$ кроме ее рабочего уровня h , также сильно зависит от физических свойств твердой и жидкой фаз шахтных вод:

$$t_{от\ min} = \frac{18\mu h}{d^2 \Delta g}, \quad (6)$$

где d – усредненный диаметр взвешенной твердой частицы; Δ – разница плотностей твердой и жидкой фаз шахтных вод.

В связи с этим время $t_{от\ min}$ для других отечественных кимберлитовых рудников может быть рассчитано следующим образом:

$$t_{от\ min} = \frac{\mu^* \rho^*}{\mu_0 \rho_0} (1,3077h + 6,6923), \quad (7)$$

где μ_0 и ρ_0 – динамическая вязкость и плотность шахтных вод, отобранных из осветляющих резервуаров главной водоотливной установки рудника «Удачный», соответственно; μ^* и ρ^* – динамическая вязкость и плотность шахтных вод, отобранных на других кимберлитовых рудниках, соответственно.

Для поступающих в осветляющие резервуары шахтных вод ламинарный режим течения не характерен в связи с отсутствием возможности размещения под землей горных выработок весьма большого поперечного сечения.

Согласно исследованиям [14] формула (7) может быть также справедлива в отношении переходного режима течения жидкости (где $10000 > \text{число Re} > 2300$).

В условиях подземного рудника качественного осветления шахтных вод, как и в случае их переходного режима течения, можно добиться путем повышения времени $t_{от\ min}$ на величину поправочного коэффициента k_n , представляющего собой отношение числа Re при фактическом (турбулентном) движении шахтных вод в осветляющем резервуаре (Re_r) и при переходном (где $Re_n = 2301...9999$):

$$k_n = \frac{Re_r}{Re_n}. \quad (8)$$

С учетом результатов исследований [17] заиленный объем V_3 осветляющего резервуара рассчитывается как:

$$V_3 = k_b \frac{1000GT24q}{\rho_{ТВ}}, \quad (9)$$

где k_b – коэффициент, учитывающий соотношение между высотой нейтрального слоя h_1 и высотой слоя сгущенного твердого осадка h_2 осевшей ило-шламовой пульпы; G – разница между концентрацией механических примесей на входе в осветляющий резервуар и на входе в водосборник, кг/л; T – время функционирования рабочего осветляющего резервуара, сут; $\rho_{ТВ}$ – средняя плотность механических примесей, кг/м³.

Коэффициент k_b может быть найден следующим образом:

$$k_b = 1 + \frac{h_1}{h_2}. \quad (10)$$

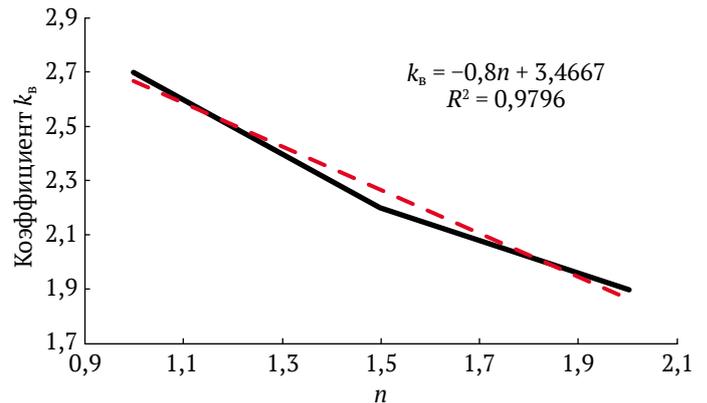


Рис. 6. Зависимость коэффициента k_b от параметра n

На основе результатов ранее выполненного седиментационного анализа твердой фазы отобранных шахтных вод с помощью метода регрессионной статистики была выведена математическая модель, позволяющая с высокой достоверностью описывать взаимосвязь между коэффициентом k_b и показателем n , представляющим собой отношение между параметрами $t_{от}$ и $t_{от\ min}$ (рис. 6).

Согласно выполненному седиментационному анализу твердой фазы отобранных шахтных вод параметр G равен:

$$G = 0,75...0,8 \cdot K, \quad (11)$$

где K – концентрация взвешенных твердых частиц в шахтных водах на входе в осветляющий резервуар, кг/л.

Практика эксплуатации водосборных горных выработок в условиях главного водоотлива кимберлитовых рудников свидетельствует, что степень заиления осветляющих резервуаров часто достигает до 90 %.

В связи с этим вместимость осветляющего резервуара с учетом заиления V^* может быть найдена как:

$$V^* = \frac{100\%}{90\%} V_3 = 1,11V_3. \quad (12)$$

На момент вывода из работы заиленный осветляющий резервуар также должен продолжать качественно осветлять поступающие в него шахтные воды.

Вместимость V может считаться оптимально подобранной только в случае выполнения следующих требований:

$$V > V^* = k_n n q t_{от\ min} > 1,11 k_b \frac{1000GT24q}{\rho_{ТВ}}; \quad (13)$$

$$V - V_3 > k_n q t_{от\ min}. \quad (14)$$

Время T (см. формулу (9)) обязательно должно быть равным или больше времени нахождения нерабочего (заиленного) осветляющего резервуара в процессе очистки T_0 от осевших ило-шламовых отложений:

$$T_0 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5, \quad (15)$$

где t_1 – время отстаивания шахтных вод после вывода из работы заиленного осветляющего резервуара,



сут; t_2 – время слива осветленных шахтных вод из осветляющего резервуара, сут; t_3 – время отстаивания ило-шламовой пульпы в осветляющем резервуаре, сут; t_4 – время слива выделившихся осветленных шахтных вод, содержащихся в ило-шламовой пульпе, или их откачки погружным шламовым насосом, сут; t_5 – время откачки обезвоженной ило-шламовой пульпы, сут.

Время t_1 находится по формуле (7). Полученное значение требуется разделить на 1440 с целью перевода в сутки.

Время t_2 определяется как:

$$t_2 = \frac{0,1V}{1440NSh_b} \sqrt{\frac{2h_b}{g}}, \quad (16)$$

где N – число задействованных труб бетонной перемишки; S – площадь поперечного проходного сечения трубы, м²; h_b – высота внешнего слоя (слой исходных шахтных вод) в осветляющем резервуаре на момент его вывода из работы, м.

Площадь S находится следующим образом:

$$S = \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad (17)$$

где d_0 – внутренний диаметр трубы бетонной перемишки, м.

Для расчета времени t_3 в зависимости от параметра h_c – суммарной высоты слоев h_1 и h_2 по результатам натуральных испытаний, была выведена следующая эмпирическая формула (рис. 7). Необходимо, отметить, что вычисленное значение времени t_3 в дальнейшем необходимо разделить на 24 с целью перевода в сутки.

В случае слива выделившихся осветленных шахтных вод время t_4 рассчитывается по формуле (16) со следующими поправками. Параметр $0,1V$ заменяется объемом осветленных выделившихся шахтных вод $V_{осв}$, а параметр h_b – высотой слоя осветленной воды $h_{осв}$.

Параметр $V_{осв}$ определяется следующим образом:

$$V_{осв} = V - 0,1V - V_{обез}, \quad (18)$$

где $V_{обез}$ – количество вывозимой ковшем ПДМ обезвоженной ило-шламовой пульпы, м³.

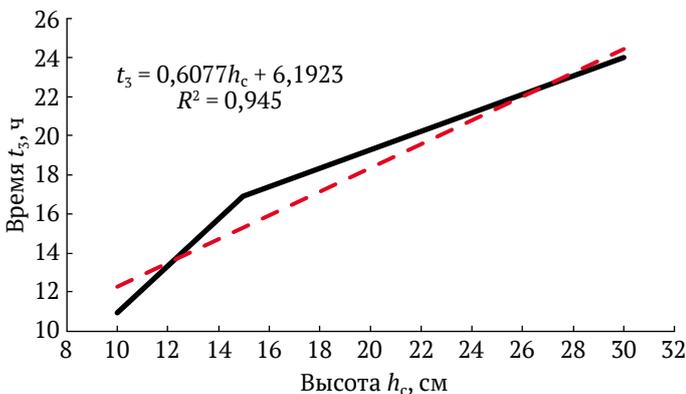


Рис. 7. Зависимость времени отстаивания ило-шламовой пульпы t_3 от суммарной высоты нейтрального слоя h_c

Параметр $h_{осв}$ находится как:

$$h_{осв} = \frac{hV_{осв}}{V}. \quad (19)$$

Объем $V_{обез}$ равен:

$$V_{обез} = k_{обез} \frac{1000GT24q}{\rho_{тв}}, \quad (20)$$

где $k_{обез}$ – коэффициент, учитывающий эффективность обезвоженности осевшей ило-шламовой пульпы ($k_{обез} = 1,1 \dots 1,2$).

В случае откачки воды погружным шламовым насосом время t_4 уже находится как:

$$t_4 = \frac{V - 0,1V - V_{обез}}{24Q}, \quad (21)$$

где Q – производительность насоса, м³/ч.

Время t_5 должно удовлетворять следующему неравенству:

$$t_5 > \frac{Q_{\max}}{V_{обез}}, \quad (22)$$

где Q_{\max} – максимальная производительность ПДМ при откачке обезвоженной ило-шламовой пульпы из осветляющего резервуара, м³/сут.

Производительность Q_{\max} :

$$Q_{\max} = k_n V_k n_0, \quad (23)$$

где k_n – коэффициент наполнения ковша ПДМ; V_k – емкость ковша ПДМ, м³; n_0 – максимальное количество рейсов ПДМ за сутки.

Параметр n_0 находится как:

$$n_0 > \frac{60t_{\text{ПДМ}}}{t_0}, \quad (24)$$

где t_0 – время одного рейса ПДМ в процессе очистки осветляющего резервуара от ило-шламовой пульпы, мин; $t_{\text{ПДМ}}$ – максимальное время работы ПДМ в процессе очистки осветляющего резервуара от ило-шламовой пульпы за сутки, ч.

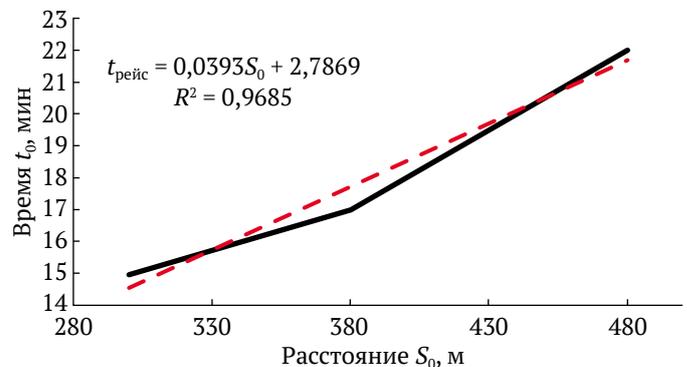


Рис. 8. Зависимость среднего времени одного рейса ПДМ при удалении ило-шламовой пульпы из осветляющего резервуара t_0 от среднего расстояния откачки ило-шламовой пульпы S_0



Время $t_{\text{ПДМ}}$ при усовершенствованном варианте классической схемы главного водоотлива равно:

$$t_{\text{ПДМ}} = 24 - t_{\text{осм}}, \quad (26)$$

где $t_{\text{осм}}$ – суммарное время технического осмотра ПДМ за сутки, ч.

На основе результатов хронометражных наблюдений за работой ПДМ в условиях главного водоотлива рудника «Удачный», обработанных методом регрессионной статистики, была выведена эмпирическая формула, позволяющая установить значение параметра t_0 в зависимости от среднего расстояния откатки ило-шламовой пульпы S_0 (рис. 8).

В отношении незаиленного участка осветляющего резервуара (см. формулу (14)) при расчете параметра $t_{\text{от min}}$ (см. формулу (7)) значение параметра h необходимо делить на 10.

Таблица 1

Результаты расчетов по установлению оптимальной вместимости проектного осветляющего резервуара № 5

n	V	k_b	V^*	ΔV_n
1	1957,9	2,667	4189,2	-2231
1,05	2055,8	2,627	4126,3	-2071
1,1	2153,6	2,587	4063,5	-1910
1,15	2251,5	2,547	4000,7	-1749
1,2	2349,4	2,507	3937,8	-1588
1,25	2447,3	2,467	3875	-1428
1,3	2545,2	2,427	3812,2	-1267
1,35	2643,1	2,387	3749,3	-1106
1,4	2741	2,347	3686,5	-945,5
1,45	2838,9	2,307	3623,7	-784,8
1,5	2936,8	2,267	3560,9	-624,1
1,55	3034,7	2,227	3498	-463,3
1,6	3132,6	2,187	3435,2	-302,6
1,65	3230,5	2,147	3372,4	-141,9
1,7	3328,4	2,107	3309,5	18,823
1,75	3426,3	2,067	3246,7	179,54
1,8	3524,1	2,027	3183,9	340,27
1,85	3622	1,987	3121,1	500,99
1,9	3719,9	1,947	3058,2	661,71
1,95	3817,8	1,907	2995,4	822,43
2	3915,7	1,867	2932,6	983,16
2,05	4013,6	1,827	2869,7	1143,9
2,1	4111,5	1,787	2806,9	1304,6
1	1957,9	2,667	4189,2	-2231
1,05	2055,8	2,627	4126,3	-2071

Таблица 2

Результаты расчетов по установлению оптимальной вместимости проектного осветляющего резервуара № 6

n	V	k_b	V^*	ΔV_n
1	1957,86	2,667	5585,54	-3627,7
1,05	2055,75	2,627	5501,76	-3446
1,1	2153,65	2,587	5417,99	-3264,3
1,15	2251,54	2,547	5334,22	-3082,7
1,2	2349,43	2,507	5250,44	-2901
1,25	2447,33	2,467	5166,67	-2719,3
1,3	2545,22	2,427	5082,9	-2537,7
1,35	2643,11	2,387	4999,13	-2356
1,4	2741	2,347	4915,35	-2174,4
1,45	2838,9	2,307	4831,58	-1992,7
1,5	2936,79	2,267	4747,81	-1811
1,55	3034,68	2,227	4664,04	-1629,4
1,6	3132,58	2,187	4580,26	-1447,7
1,65	3230,47	2,147	4496,49	-1266
1,7	3328,36	2,107	4412,72	-1084,4
1,75	3426,26	2,067	4328,95	-902,69
1,8	3524,15	2,027	4245,17	-721,03
1,85	3622,04	1,987	4161,4	-539,36
1,9	3719,93	1,947	4077,63	-357,7
1,95	3817,83	1,907	3993,86	-176,03
2	3915,72	1,867	3910,1	5,6
2,05	4013,61	1,827	3826,31	187,3
2,1	4111,51	1,787	3742,54	368,97
2,15	4209,4	1,747	3658,8	550,6
2,2	4307,29	1,707	3575	732,3



V и V^*), что, в свою очередь, положительно скажется на времени T .

С учетом того, что оба проектных осветляющих резервуара должны обладать небольшим уклоном, окончательное значение их вместимости V принимается равным 3430 и 4030 м³.

Расчет ожидаемого технико-экономического эффекта

Суммарные затраты $S_{\text{сум}}$, млн руб., связанные с откачкой шахтных вод и чисткой водосборных горных выработок от осевшей ило-шламовой пульпы в условиях главного водоотлива рудника «Удачный», определяем как [18]:

$$S_{\text{сум}} = (0,0024\Delta + 67,636) + (0,0011V_{\text{сум}} + 21,765), \quad (27)$$

где Δ – количество механических примесей, перекачанных вместе с шахтными водами насосным оборудованием главной водоотливной установки, т/год; $V_{\text{сум}}$ – суммарный объем вывозимой осевшей ило-шламовой пульпы, м³.

Для расчета показателя Δ предложена формула:

$$\Delta = \frac{Kq_g}{1000}, \quad (28)$$

где q_g – общий водоприток в рудник, м³/год.

Необходимо отметить, что в случае предлагаемой модернизации системы главного водоотлива рассматриваемого рудника объем $V_{\text{сум}}$ увеличится на V_0 :

$$V_0 = k_{\text{ПДМ}}NV_{\text{обез}}, \quad (29)$$

где $k_{\text{ПДМ}}$ – коэффициент, учитывающий степень тяжести условий эксплуатации ПДМ при чистке водосборных горных выработок от осевшей ило-шламовой пульпы; N – количество чисток проектных осветляющих резервуаров.

При условии ожидаемого суммарного водопритока в рудник $q_g = 3200000$ м³/год затраты $S_{\text{сум}}$ составят:

– при действующей системе главного водоотлива рудника:

$$S_{\text{сум}} = \left(0,0024 \frac{17 \cdot 3200000}{1000} + 67,636 \right) + (0,0011 \cdot 1730 + 21,765) = 239 \text{ млн руб.};$$

– при усовершенствованном варианте системы главного водоотлива рудника:

$$S_{\text{сум}} = \left(0,0024 \frac{4 \cdot 3200000}{1000} + 67,636 \right) + (0,0011 \cdot (1730 + 0,7 \cdot 29433,56) + 21,765) = 161,8 \text{ млн руб.}$$

Как видно, разница между ранее рассчитанными затратами ΔZ равна 77,2 млн руб.

Ожидаемый срок T_c окупаемости предлагаемого технологического решения составит 4,4 лет:

$$T_c = \frac{Z_1 + Z_2}{\Delta Z} = \frac{340,87}{77,2} = 4,4 \text{ года}, \quad (30)$$

где Z_1 – затраты на реализацию предлагаемого технологического решения, млн руб.; Z_2 – дополнительные затраты при реализации предлагаемого технологического решения, млн руб.

После истечения срока окупаемости ожидаемый ежегодный технико-экономический эффект Z_0 от практического внедрения предлагаемого технологического решения составит около 73 млн руб.:

$$Z_0 = \Delta Z - Z_2 = 77,2 - 4,5 = 72,7 \text{ млн руб.} \quad (31)$$

Таким образом, видно, что предлагаемая модернизация системы главного водоотлива рудника «Удачный» является оправданным решением с финансовой точки зрения.

Заключение

По итогам выполненных исследований в рамках настоящей работы получены следующие значимые результаты:

1. Для обеспечения качественного осветления шахтных вод в водосборных горных выработках и дальнейшего в них обезвоживания осевшей ило-шламовой пульпы предложен усовершенствованный вариант классической схемы главного водоотлива кимберлитового рудника, где применяется технология этажного обрушения руды.

2. Разработана методика по обоснованию рабочих параметров осветляющих резервуаров главного водоотлива кимберлитового рудника, где применяется технология этажного обрушения руды, учитывающая седиментационные характеристики твердой фазы шахтных вод, реологические характеристики жидкой фазы шахтных вод и продолжительность нахождения заиленного осветляющего резервуара в процессе очистки от ило-шламовых отложений.

3. Предложенная методика апробирована при выполнении хозяйственной работы «Обоснование технологии и технологического оборудования по эффективному осветлению шахтных вод и обезвоживанию содержащегося в шахтных водах шлама применительно к условиям главного водоотлива подземного рудника «Удачный»».

4. Ожидаемый технико-экономический эффект от предлагаемой модернизации системы главного водоотлива рудника «Удачный» после окупаемости вложенных средств составит около 73 млн руб.

Список литературы

1. Анисимов К.А. Геомеханические проблемы при разработке подкарьерных запасов алмазо-содержащих месторождений в условиях рудника «Удачный». *Успехи современного естествознания*. 2020;(5):29–36. <https://doi.org/10.17513/use.37388>
2. Коваленко А.А., Тишков М.В. Оценка подземного способа отработки месторождения трубки «Удачная» с применением системы с самообрушением. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(12):134–145. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2016/12/134_145_12_2016.pdf



3. Зельберг А. С., Зырянов И. В., Бондаренко И. Ф. Современные и перспективные технологии при разработке месторождений алмазов. *Горная промышленность*. 2019;(3):26–31. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-3-145-26-31>
4. Овчинников Н. П. Оценка влияния твердой фазы шахтных вод на эффективность секционных насосов при разработке месторождений кимберлитовых руд. *Горные науки и технологии*. 2022;7(2):137–147. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-150-160>
5. Тимухин С. А., Угольников А. В., Петровых Л. В. и др. *Шахтная водоотливная установка*. Патент РФ № 2472971 от 20.01.2013.
6. Тимухин С. А., Долганов А. В., Петровых Л. В. К вопросу обоснования параметров гидроэлеваторных установок насосных станций главного водоотлива шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(2):118–120. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2011/2/Timuhin_2_2011.pdf
7. Ким Ч. Х. *Разработка технологической схемы водоотливной установки с самоочищающимися водосборниками: (КНДР)*. [Автореф. дис. ... канд.-та. техн. наук]. Донецк; 1990. 20 с.
8. Корпачев В. В., Харьков А. В., Березин С. Е. Технология очистки шламоотстойников с использованием погружных насосов. *Горная промышленность*. 2013;(1):58–59.
9. Мингажев М. М. *Совершенствование технологии водоотведения при подземной разработке медно-колчеданных месторождений системами с твердеющей закладкой*. [Автореф. дис. ... канд.-та. техн. наук]. Магнитогорск; 2012. 17 с.
10. Плеханова В. А. Новая технология очистки шахтных вод. *European Research*. 2016;(4):57–60.
11. Touahria S., Hazourli S., Touahria K. et al. Clarification of industrial mining wastewater using electrocoagulation. *International Journal of Electrochemical Science*. 2016;(11):5710–5723. <https://doi.org/10.20964/2016.07.51>
12. Sunka P., Babický V., Clupek M. et al. Generation of chemically active species by electrical discharges in water. *Plasma Sources Science and Technology*. 1999;8(2):258–260. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/8/2/006>
13. Ovchinnikov N. P. Removal of mechanical admixture from the mine waters of the underground kimberlite mine “Udachy” by their deposition. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V International Workshop on Innovations in Agro and Food Technologies (WIAFT-V-2021)*. 17–18 June 2021, Volgograd, Russian Federation. 2021;848(1):012122. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012122>
14. Мазо А. Б. *Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости*. Казань: КГУ; 2007. 106 с.
15. Сенкус В. В., Стефанюк Б. М. Исследование процесса осаждения шлама в отстойниках. *Известия вузов. Горный журнал*. 2006;(5):54–62.
16. Сенкус В. В., Стефанюк Б. М., Буторин В. К. Моделирование процессов осаждения шлама в отстойниках угольных шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;(7):102–109.
17. Олизаренко В. В., Мингажев М. М. Определение времени заиливания и периодичности очистки главных водосборников подземных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(7):27–30.
18. Овчинников Н. П., Зырянов И. В. Комплексная оценка последствий влияния загрязненных шахтных вод на эффективность системы водоотведения из рудника «Удачный». *Горный журнал*. 2022;(7):95–99. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.16>

References

1. Anisimov K. A. Geomechanical problems in the development of under-pit reserves of diamondiferous deposits in the conditions of the Udachny Mine. 2020;(5):29–36. *Advances in Current Natural Sciences*. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37388>
2. Kovalenko A. A., Tishkov M. V. The evaluation of the Udachnaya pipe deposit underground mining using caving system. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(12):134–145. (In Russ.) URL: https://giab-online.ru/files/Data/2016/12/134_145_12_2016.pdf
3. Zelberg A. S., Zyrianov I. V., Bondarenko I. F. Current and emerging technologies in development of diamond deposits. *Russian Mining Industry*. 2019;(3):26–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-3-145-26-31>
4. Ovchinnikov N. P. Assessment of mine water solid phase impact on section pumps performance in the development of kimberlite ores. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):150–160. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-150-160>
5. Timukhin S. A., Ugol'nikov A. V., Petrovykh L. V. et al. *Shaft pumping plant*. Patent of the Russian Federation No. 2472971 dated 20.01.2013.
6. Timuchin S. A., Dolganov A. V., Petrovykh L. V. To a question of a background hidroelevators installations the ore's drainages stations. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(2):118–120. (In Russ.) URL: https://giab-online.ru/files/Data/2011/2/Timuhin_2_2011.pdf
7. Kim Ch. Kh. *Development of a process flow diagram for a drainage facility with self-cleaning water collectors: (DPRK)*. [Ph.D. thesis in Eng. Sci.]. Donetsk; 1990. 20 p. (In Russ.)



7. Korpachev V.V., Kharkov A.V., Berezin S.E. Slurry settler cleaning technique using submersible pumps. *Russian Mining Industry*. 2013;(1):58–59. (In Russ.)
9. Mingazhev M.M. *Improvement of drainage technique in the underground development of sulfide copper deposits with the use of solid stowing*. [Ph.D. thesis in Eng. Sci.]. Magnitogorsk; 2012. 17 p. (In Russ.)
10. Plekhanova V. The new technology of mine water purification. *European Research*. 2016;(4):57–60. (In Russ.)
11. Touahria S., Hazourli S., Touahria K. et al. Clarification of industrial mining wastewater using electrocoagulation. *International Journal of Electrochemical Science*. 2016;(11):5710–5723. <https://doi.org/10.20964/2016.07.51>
12. Sunka P., Babický V., Clupek M. et al. Generation of chemically active species by electrical discharges in water. *Plasma Sources Science and Technology*. 1999;8(2):258–260. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/8/2/006>
13. Ovchinnikov N.P. Removal of mechanical admixture from the mine waters of the underground kimberlite mine “Udachy” by their deposition. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V International Workshop on Innovations in Agro and Food Technologies (WIAFT-V-2021)*. 17–18 June 2021, Volgograd, Russian Federation. 2021;848(1):012122. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012122>
14. Mazo A.B. *Simulation of turbulent incompressible fluid flows*. Kazan: KGU Publ.; 2007. 106 p. (In Russ.)
15. Sencus V.V., Stefanyuk B. M. Investigation of slurry sedimentation in settling reservoirs. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2006;(5):54–62. (In Russ.)
16. Sencus V.V., Stefanyuk B.M., Butorin V.K. Simulation of slurry sedimentation processes in coal mine’s settling reservoirs. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(7):102–109. (In Russ.)
17. Olizarenko V.V., Mingazhev M.M. Determination of sludge settling time and cleaning frequency for underground mine main water collectors. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(7):27–30. (In Russ.)
18. Ovchinnikov N.P., Zyryanov I.V. Integrated assessment of mine water pollution influence on water removal efficiency in Udachny Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(7):95–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.16>

Информация об авторе

Николай Петрович Овчинников – кандидат технических наук, доцент, директор Горного института, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4355-5028](https://orcid.org/0000-0002-4355-5028), Scopus ID [57191629443](https://scopus.com/authorid/57191629443); ovchinnlar1986@mail.ru

Information about the author

Nickolay P. Ovchinnikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Mining Institute, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4355-5028](https://orcid.org/0000-0002-4355-5028), Scopus ID [57191629443](https://scopus.com/authorid/57191629443); ovchinnlar1986@mail.ru

Поступила в редакцию	09.11.2022	Received	09.11.2022
Поступила после рецензирования	03.04.2023	Revised	03.04.2023
Принята к публикации	11.04.2023	Accepted	11.04.2023



ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-68>

УДК 622:502.7



Выявление нарушений границ разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом с использованием данных Sentinel-2 MSI на примере провинций Северного Вьетнама Лао Кай и Йень Бай

С. Б. Чан¹   , Л. Х. Чинь²  , К. Л. Нгуен³  , Ю. М. Левкин⁴  ,
И. В. Зеньков⁵  , Т. Х. Тонг²  

¹ Ханойский университет природных ресурсов и окружающей среды, г. Ханой, Вьетнам

² Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам

³ Ханойский университет горного дела и геологии, г. Ханой, Вьетнам

⁴ Союз маркшейдеров России, г. Москва, Российская Федерация

⁵ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

 txbien.ph@hunre.edu.vn

Аннотация

Незаконная добыча полезных ископаемых, в том числе нарушение лицензионных границ, при разработке месторождений полезных ископаемых во Вьетнаме за последние годы резко возросли. Это приводит к значительному ухудшению состояния окружающей среды. Поскольку районы добычи полезных ископаемых часто расположены далеко от населенных пунктов, традиционными методами трудно обнаружить районы незаконной добычи. В данной работе представлена методика обнаружения нарушения лицензионной границы открытой разработки месторождений минерального сырья по спутниковым снимкам высокого разрешения Sentinel-2 MSI. В разработанной методике при наложении полученных радаром Sentinel-2 MSI снимков со спутника определяется несоответствие лицензионных границ месторождений полезных ископаемых фактическим. Район исследования расположен в богатых минеральными ресурсами Северного Вьетнама провинциях Лао Кай и Йень Бай. Полученные в ходе исследования результаты могут быть эффективно использованы для мониторинга и раннего выявления нарушений лицензированных границ горнодобывающего предприятия.

Ключевые слова

незаконная добыча полезных ископаемых, дистанционное зондирование, данные Sentinel-2B MSI, Вьетнам, провинции Лао Кай и Йень Бай

Благодарности

Научные сотрудники, проводившие исследования, благодарят заказчика проведения исследований за предоставление в полном объеме необходимых материалов, что позволило в установленные сроки выполнить поставленную задачу. Эти материалы помогли решить задачи, поставленные проектом «Мониторинг границ добычи полезных ископаемых в некоторых северных провинциях Вьетнама с использованием дистанционного зондирования и получения изображений с БПЛА». Код: SXTN.2020.08.01.

Для цитирования

Tran X. B., Trinh L. H., Nguyen Q. L., Levkin Yu. M., Zenkov I. V., Tong T. H. Detection of violations of open-pit mining lease boundaries using Sentinel-2 MSI data in the case of Lao Cai and Yen Bai provinces of North Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):173–182. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-68>



EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Research paper

Detection of violations of open-pit mining lease boundaries using Sentinel-2 MSI data in the case of Lao Cai and Yen Bai provinces of North Vietnam

X. B. Tran¹   , L. H. Trinh²  , Q. L. Nguyen³  , Yu. M. Levkin⁴  ,
I. V. Zenkov⁵  , T. H. Tong²  

¹Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam

²Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

³Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

⁴Russian Union of Surveyors, Moscow, Russian Federation

⁵Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

 txbien.ph@hunre.edu.vn

Abstract

Illegal mining, including the violation of lease boundaries during the extraction of mineral deposits in Vietnam, has witnessed a significant surge in recent years, leading to substantial environmental degradation. Due to the remote locations of mining areas in relation to settlements, the detection of illegal mining activities using conventional methods poses considerable challenges. This study presents a methodology for identifying lease boundary violations in open-pit mining of mineral deposits by utilizing high-resolution satellite images from the Sentinel-2 MSI system. The proposed methodology involves overlaying Sentinel-2 MSI radar-acquired satellite images to identify disparities between approved lease boundaries and actual boundaries of mining areas. The research focuses on the mineral-rich provinces of Lao Cai and Yen Bai in North Vietnam. The findings of this research hold great potential for effectively monitoring and promptly detecting violations of mining lease boundaries.

Keywords

illegal mining, remote sensing, Sentinel-2B MSI data, Vietnam, Lao Cai and Yen Bai provinces

Acknowledgments

The researchers express their gratitude to the research sponsor for providing all the necessary materials, enabling the timely completion of the project. These materials played a crucial role in addressing the objectives outlined in the project titled “Monitoring of the boundaries of mining areas in some northern provinces of Vietnam using remote sensing and UAV imaging”, with code: SXTN.2020.08.01.

For citation

Tran X. B., Trinh L. H., Nguyen Q. L., Levkin Yu. M., Zenkov I. V., Tong T. H. Detection of violations of open-pit mining lease boundaries using Sentinel-2 MSI data in the case of Lao Cai and Yen Bai provinces of North Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):173–182. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-68>

Введение

В государствах, осуществляющих добычу полезных ископаемых открытым способом, мониторинг лицензированных границ горных отводов обеспечивается разными способами: радиационной интерферометрией; синтезом изображений; спектральными аналоговыми методами. Реализация этих процедур позволяет вернуть в доход бюджета значительные суммы финансовых средств [1], контролировать параметры горных и земельных отводов и эффективность использования минерально-сырьевой базы.

Добыча полезных ископаемых в северных провинциях Вьетнама является одной из составляющих источников финансовых поступлений в доход бюджета государства. Утвержденные государственными структурами Вьетнама границы земельных отводов проведения горных работ по добыче полезных ископаемых открытым способом в провинциях Лао Кай и Йень Бай постоянно нарушаются. Эти нарушения оказывают

существенное негативное влияние на окружающую среду и здоровье местного населения. Сложный рельеф участков добычи полезных ископаемых дает возможность уходить от юридической ответственности владельцам горных отводов, нарушающим лицензионные границы. Современные способы дистанционного зондирования Земли космическими спутниками с использованием радара Sentinel-2 MSI обеспечивают снимками высокого разрешения большие участки местности. Постоянное обновление снимков в короткий промежуток времени дает возможность осуществлять мониторинг лицензионных границ горных отводов для выявления их нарушителей.

Дистанционное зондирование и другие формы мониторинга участков земной поверхности, используемых в незаконной добыче полезных ископаемых, как правило, удаленных от населенных пунктов на значительное расстояние, применяются во многих государствах мира [2, 3]. Так, правительство Ганы с 2015 по 2019 г.

при обработке космических снимков дистанционного зондирования радаром Sentinel-1, применяя метод пороговой оценки, обнаружило нелегальные участки добычи важных для пополнения бюджета страны полезных ископаемых площадью 102, 60 и 33 км² [4, 5].

В мониторинге также использовались спутниковые снимки Landsat, благодаря которым в Индии была прекращена незаконная добыча золота, проходящая в период с 1986 по 2002 г. и с 2007 по 2013 г. По спутниковым снимкам сравнивали фактическую площадь добычи и лицензионную, а затем оценивали площадь незаконной добычи [6]. Разработка методики радарной спутниковой интерферометрии DinSAR для получения радиолокационного изображения дистанционного зондирования земной поверхности обеспечила решение задач по созданию цифровых моделей рельефа местности. Международные исследования в области горного дела, благодаря привлечению космических спутников Земли, позволили разработать методику обнаружения участков незаконной добычи полезных ископаемых открытым способом, в том числе в гористой местности с густой растительностью [7–10].

В данной работе представлены результаты исследования снимков космических спутников Земли, сделанных радаром Sentinel-2 MSI. Исследования дали возможность разработать методику обнаружения нарушения предприятиями лицензионных границ добычи полезных ископаемых открытым способом.

Наложение снимков друг на друга позволило обнаружить и оценить масштабы фактических нарушений горнодобывающими предприятиями Северного

Вьетнама, в том числе имеющими лицензированные границы, права добычи полезных ископаемых.

Полученные информационные продукты радара Sentinel-2 MSI с коротким временным разрешением предоставляются бесплатно всем заинтересованным организациям, помогая повысить эффективность мониторинга деятельности предприятий по добыче полезных ископаемых [11–13].

Материалы и методология

Исследуемая территория

В провинциях Лао Кай (Lao Cai) и Йень Бай (Yen Bai) Северного Вьетнама, расположенных в гористой местности со сложным рельефом и неразвитой инфраструктурой, разведаны существенные запасы 35 наименований полезных ископаемых, таких как железо, медь, цинк, каолиновые глины и др. Апатитовой и медной руды разведано более 2,5 млрд т каждой, железной руды – около 200 млн т, в том числе запасы железной руды рудника Куи Са (Quy Sa) составляют более 120 млн т. Разведаны также редкоземельные полезные ископаемые, играющие стратегическую роль в развитии мировой высокотехнологичной промышленности. Перечисленные запасы полезных ископаемых разрабатываются более чем 500 небольшими горнодобывающими предприятиями, из которых 240 имеют лицензии. Отсутствие четких планов увеличения добычи полезных ископаемых и развития этих регионов дает возможность нелегальной добыче ценных полезных ископаемых.

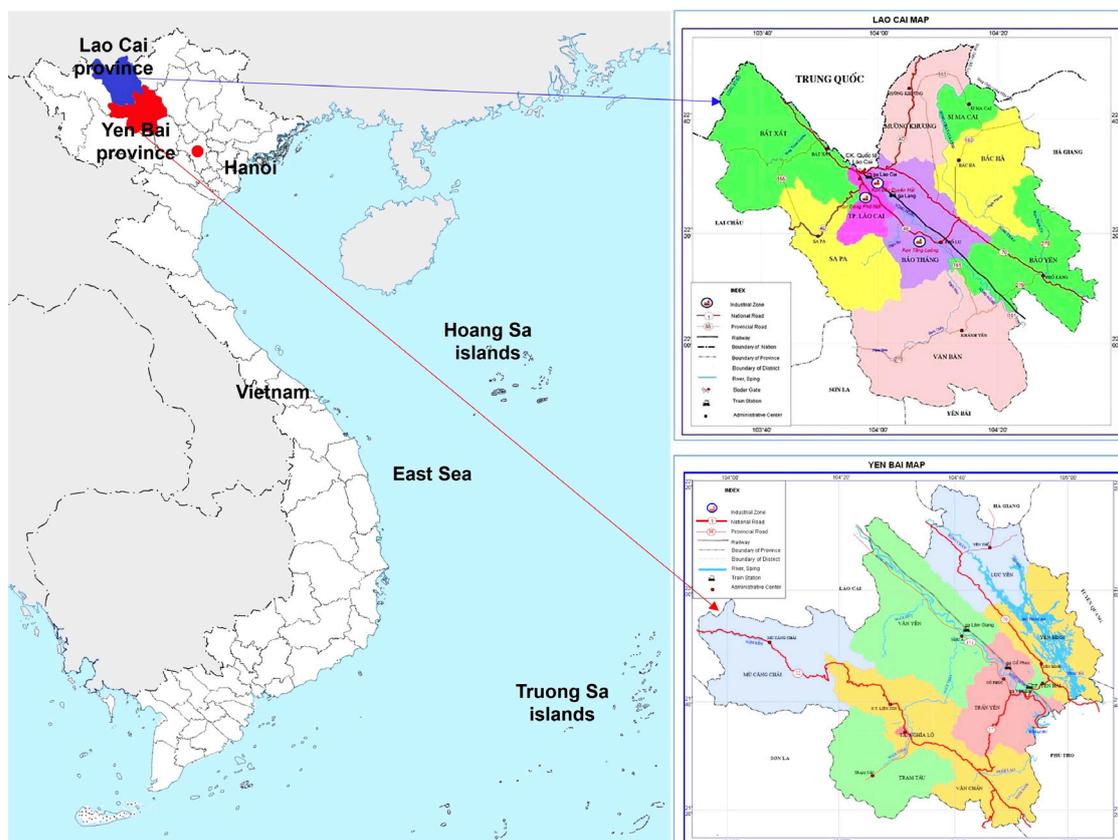


Рис. 1. Районы исследования в провинциях Лао Кай и Йень Бай, Вьетнам

Материалы

Материалы исследования мультиспектральных данных радара Sentinel-2 MSI, полученные 29 ноября 2022 г. в провинции Лао Кай и 4 ноября 2022 г. в провинции Йень Бай, использовались для выявления незаконной добычи полезных ископаемых. Применение методики наложения изображений Sentinel-2 MSI дало возможность получить 13 спектральных диапазонов – от видимого и ближнего инфракрасного (VNIR) до коротковолнового инфракрасного (SWIR) при длине волн на орбитальной полосе 290 км. Пространственное разрешение изображения Sentinel-2 MSI находилось в диапазоне от 10 до 60 м, в которых видимый (2, 3, 4) и ближний инфракрасный (8) диапазоны имеют пространственное разрешение 10 м (табл. 1).

Изображение радара Sentinel-2 MSI предварительно обработано. Удалены облака и вырезана информация по границам областей исследования (рис. 2). Это изображение представляет собой продукт уровня L2A, загруженный с вебсайта Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>), который, в свою очередь, представляет собой изображения отражательной способности нижней части атмосферы (BOA), полученные из соответствующих продуктов уровня 1C.

Методология

Мультиспектральная обработка снимков зондирования радаром Sentinel-2 MSI была проведена с учетом атмосферной и геометрической коррекций. Процесс коррекции геометрии снимков устраняет геометрические ошибки и преобразует координаты изображения,

Таблица 1

Изображения Sentinel-2 MSI

Каналы	Спектральный диапазон, $\mu\text{м}$	Пространственное разрешение, м
Прибрежный аэрозоль	0,421–0,457	60
Синий	0,439–0,535	10
Зеленый	0,537–0,582	10
Красный	0,646–0,685	10
Красный край растительности	0,694–0,714	20
Красный край растительности	0,731–0,749	20
Красный край растительности	0,768–0,796	20
Ближний ИК	0,767–0,908	10
Красный край растительности	0,848–0,881	20
Водяной пар	0,931–0,958	60
Коротковолновый инфракрасный – перистое облако	1,338–1,414	60
Коротковолновый инфракрасный	1,539–1,681	20
Коротковолновый инфракрасный	2,072–2,312	20

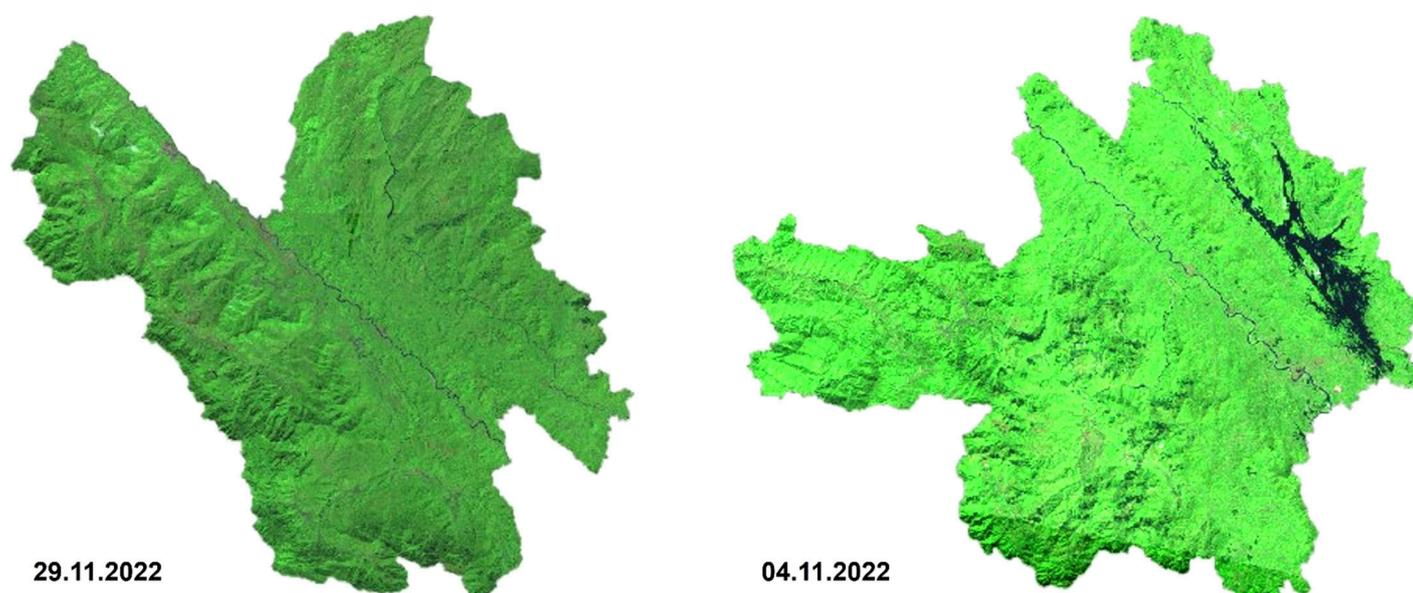


Рис. 2. Изображения Sentinel-2 MSI в провинциях Лао Кай и Йень Бай после предварительной обработки и вырезания по границам областей исследования

сделанные радаром Sentinel-2 MSI, в локальные координаты (VN-2000), которые согласуются с системой координат границы участка лицензирования.

Спектральные диапазоны с пространственным разрешением 10 м используются для обнаружения участков незаконной добычи полезных ископаемых. Эти диапазоны были выбраны из-за самого высокого пространственного разрешения среди диапазонов MSI Sentinel-2, что позволило обеспечить обнаружение участков незаконной добычи полезных ископаемых.

На следующем этапе снимки лицензионных границ месторождений полезных ископаемых накладываются на спутниковые снимки Sentinel-2 MSI, после чего производится сравнение границ лицензионных участков добычи с фактическими. Методика оцифровки используется в этом случае для оценки зоны эксплуатации за допустимой границей в соответствии со схемой методологии обнаружения незаконного расширения лицензионных участков добычи (рис. 3).

Научно-методическое обоснование решений

а) Описание общих (базовых) методов обработки мультиспектральных снимков Sentinel-2 MSI

Чтобы собрать данные изображений Sentinel-2 MSI из базы данных Copernicus Open Access Hub, необходимо выбрать координаты области исследования и другие условия (тип изображения, уровень обработки, облачность, время съемки и т.п.) для сбора изображений. На рис. 4 показан процесс выбора и загрузки изображений Sentinel-2 MSI с веб-сайта <https://scihub.copernicus.eu>.

Спектральные каналы с пространственным разрешением 10 м (2, 3, 4 и 8) используются для обнаружения незаконного расширения майнинга.

б) Модели преобразования координат изображений в локальные координаты

Изображения Sentinel-2 MSI были получены из базы данных Copernicus в системе координат WGS 84. Эти изображения были преобразованы в местную



Рис. 3. Этапы методики обнаружения незаконного расширения майнинга, по данным Sentinel-2 MSI

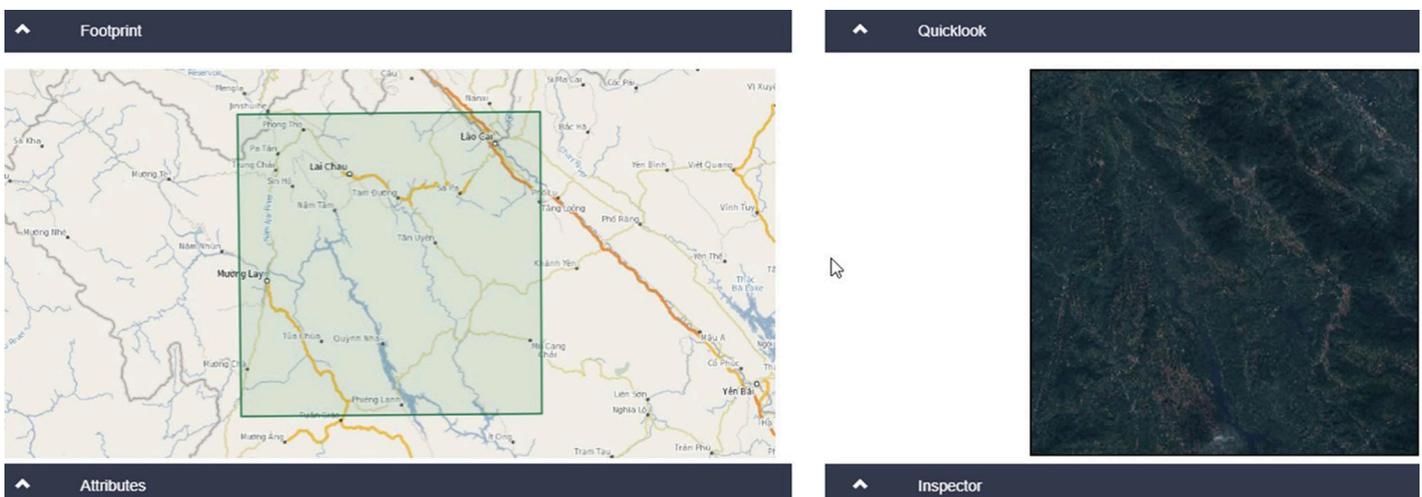


Рис. 4. Сбор данных изображений Sentinel-2 в базе данных Copernicus



систему координат (VN2000) (Департамент геодезии, карт и географической информации, Министерство природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама) на основании зависимостей:

$$X = \Delta x_0 + k(X' + \varepsilon_0 Y' - \psi_0 Z');$$

$$Y = \Delta y_0 + k(-\varepsilon_0 X' + Y' + \omega_0 Z');$$

$$Z = \Delta z_0 + k(\psi_0 X' - \omega_0 Y' + Z'),$$

где X, Y, Z – координаты в декартовой системе координат, которые необходимо преобразовать в метры; X', Y', Z' – координаты в декартовой системе координат смещения, м; $\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0$ – параметр смещения начала координат, м; $\omega_0, \psi_0, \varepsilon_0$ – представляют собой три угла поворота оси координат (поворот Элеге), соответствующие осям X, Y, Z , рад; k – коэффициент масштаба.

в) предложения по совершенствованию методики (или алгоритма) обработки изображений для повышения точности с учетом атмосферной и геометрической коррекций

Изображение Sentinel-2 MSI предварительно обработано. После геометрической коррекции и преобразования в местную систему координат (VN2000) удалены облака и вырезана информация по границам областей исследования.

Процесс фильтрации облака изображений Sentinel-2 выполняется на платформе Google Earth Engine (GEE). Google Earth Engine – это облачная платформа геопространственного анализа, которая позволяет пользователям визуализировать и анализировать спутниковые изображения Земли. В наборе данных GEE хранятся данные дистанционного зондирования спутниковых систем за последние 40 лет, а также вычислительные инструменты, необходимые для анализа и использования этого огромного хранилища данных без загрузки компьютеров. Мало того, данные из GEE можно использовать в другом

программном обеспечении (QGIS, GIS, Foris) для оптимизации данных.

Для фильтрации выборки в исследовании использовался эталонный набор изображений Sentinel-2, в котором выбранные изображения имели покрытие облачностью менее 80 %. Алгоритм cloudScore используется для проведения облачной фильтрации на платформе GEE, кроме того, алгоритм Temporal Dark Outlier Mask (TDOM) используется для идентификации пикселей теней облаков. Результаты фильтрации облака изображений Sentinel-2 MSI и обрезки по границам исследуемой области представлены на рис. 2.

з) новая методика и алгоритм

Новым в этом исследовании является использование платформы облачных вычислений GEE для обработки данных спутниковых изображений Sentinel-2 MSI. GEE работает через онлайн-интерфейс приложения JavaScript (API), называемый Code Editor. Это подходящее решение для сегодняшних условий большого объема данных дистанционного зондирования, в которых спутниковые системы дистанционного зондирования обеспечивают огромный источник данных. Использование платформы GEE также позволяет улучшить возможности мониторинга и обнаружения областей изменения на поверхности Земли по разновременным данным дистанционного зондирования.

Применяемые впервые спектральные диапазоны съемки местности с самым высоким пространственным разрешением среди диапазонов MSI Sentinel-2 – 10 м (видимый и БИК-диапазоны) – позволили подтвердить обнаружение участков незаконной добычи полезных ископаемых, скрытых в сплошных зарослях джунглей. Наличие доступных мультиспектральных изображений Sentinel-2 MSI с коротким временным разрешением (5 дн) способствовало эффективному использованию их в мониторинге территорий добычи полезных ископаемых.

Таблица 2

Сравнение лицензированных и фактических площадей добычи полезных ископаемых на отдельных рудниках в провинции Лао Кай

Горнодобывающее предприятие	Адрес	Лицензионная площадь добычи, га	Фактическая площадь добычи, га	Разница в площади добычи, га
Апатит	Коммуна Чиенг Кен (Chieng Ken), район Ван Бан (Van Ban)	4,02	9,80	5,78
Каолин	Коммуна Ланг Дзан (Lang Giang), район Ван Бан	4,33	6,4	2,07
Апатит	Коммуна Бао Ха (Bao Ha), район Бао Йен (Bao Yen)	12,55	20,41	7,86
Каолин	Коммуна Ван Хоа (Van Hoa), город Лао Кай (Lao Cai)	28,32	43,57	15,25
Апатит	Коммуна Кам Дуонг (Cam Duong), город Лао Кай	49,85	63,91	14,06
Железо	Коммуна Во Лао (Vo Lao), район Ван Бан	51,03	96,96	45,93
Апатит	Коммуна Донг Туен (Dong Tuyen), город Лао Кай	76,19	150,32	74,13
Апатит	Коммуна Та Фои (Ta Phoi), город Лао Кай	77,92	97,48	19,56
Железо	Коммуна Куи Са (Quy Xa), район Ван Бан	81,53	151,65	70,12
Апатит	Коммуна Сон Туи (Son Thuy), район Ван Бан	91,96	107,59	15,63
Медь	Коммуна Кок Мы (Coc Mu), район Бат Сат (Bat Sat)	207,78	525,76	317,98

Результаты и обсуждение

Анализ космических снимков сканирования земной поверхности радаром Sentinel-2 MSI участков добычи полезных ископаемых открытым способом на рудниках показал, что фактические площади добычи на многих рудниках превышают лицензионные (табл. 2). К примеру, на 11 рудниках происходит значительное расширение незаконной эксплуатации участков добычи, на которых фактические площади рудников превышают лицензионную площадь в 2 раза (медный рудник в коммуне Кок Мы, район Бат

Сат; апатитовый рудник в коммуне Донг Туен, город Лао Кай) (рис. 5).

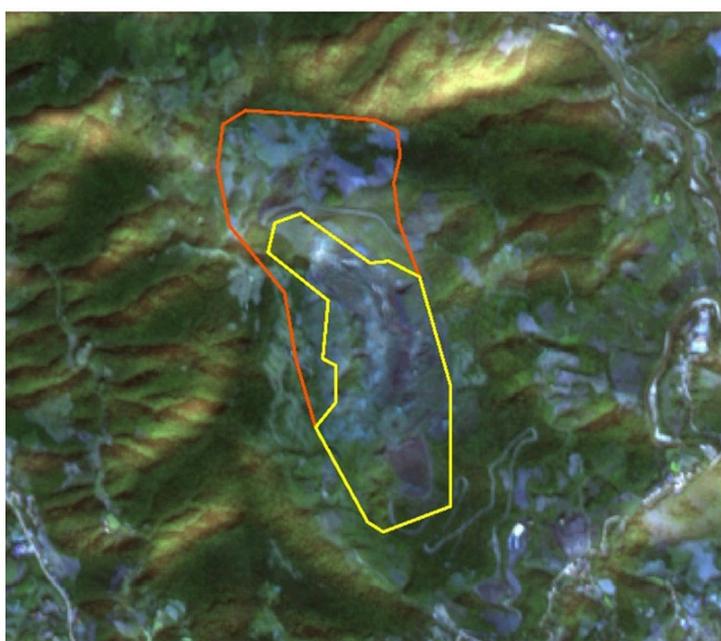
В провинции Йень Бай были проанализированы 12 участков открытых горных работ для оценки незаконного расширения зоны добычи (см. табл. 2). Анализ космических снимков фактических границ участков добычи полезных ископаемых (рис. 6) подтвердил незаконное расширение площади добычи полезных ископаемых пятью участками (см. табл. 2). Например, известняковый карьер (коммуна Йен Тханг, район Люк Йен) с лицензионной площадью 2,18 га фактически занимает площадь добычи 26,62 га (табл. 3).



Медный рудник Синь Куен



Апатитовый рудник Бао Ха



Железный рудник (Вьетнамская минерально-металлургическая компания)



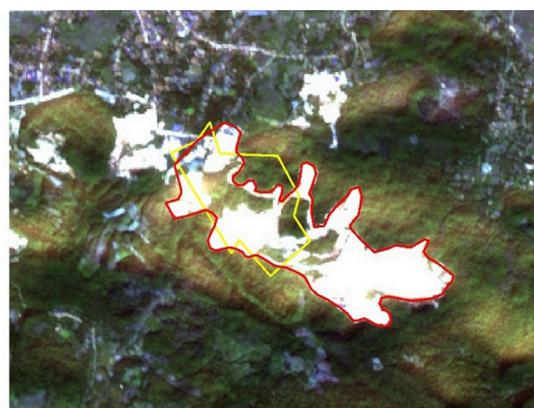
Железный рудник Ланг Винь

Рис. 5. Космические снимки фактических (красный цвет) и лицензионных (желтый цвет) границ участков добычи полезных ископаемых в провинции Лао Кай, полученные радаром Sentinel-2 MSI

Таблица 3

Сравнение лицензированных и фактических площадей добычи полезных ископаемых на отдельных рудниках в провинции Йень Бай

Горнодобывающее предприятие	Адрес	Лицензионная площадь добычи, га	Фактическая площадь добычи, га	Разница в площади добычи, га
Карьер белого мрамора	Коммуна Йен Тханг (Yen Thang), район Люк Йен (Luc Yen)	26,80	51,87	25,07
Фенспат	Коммуна Тан Лап (Tan Lap), район Люк Йен	5,01	16,25	11,24
Мраморный карьер	Коммуна Йентэ (Yen The), район Люк Йен	43,32	98,18	54,86
Мраморный карьер	Коммуна Ман Сан (Mong Son), Yen Binh район	10,01	45,85	35,84
Графит	Коммуна Йен Тай (Yen Thai), Van Yen район	11,65	24,70	13,05
Мраморный карьер	Коммуна Луи До (Lieu Do), район Люк Йен	49,80	65,88	16,08
Карьер белого мрамора	Коммуна Тан Линь (Tan Linh), район Люк Йен	5,21	16,48	11,27
Мраморный карьер	Коммуна Ан Фу (An Phu), район Люк Йен	5,91	36,84	30,93
Железо	Коммуна Хунг Хан (Hung Khanh), район Чан Йен (Tran Yen)	113,00	146,63	33,63
Известняковый карьер	Коммуна Йен Тан (Yen Thang), район Люк Йен	2,18	28,80	26,62
Карьер	Коммуна Йен Тан, район Люк Йен	2,18	9,96	7,78
Мраморный карьер	Коммуна Ан Фу, район Люк Йен	16,10	43,58	27,48


Карьер (Компания по добыче и переработке камня Да Ту)

Карьер (компания RK Marble Vietnam)

Карьер (компания Phanxipang)

Карьер (компания Thai Duong)

Карьер (компания Hung Dai)
Рис. 6. Космические снимки фактических (красный цвет) и лицензионных (желтый цвет) границ участков добычи полезных ископаемых в провинции Йень Бай, полученные радаром Sentinel-2 MSI



Выводы

В ноябре 2022 г. была проведена обработка космических снимков сканирования земной поверхности радаром Sentinel-2 MSI участков нахождения рудников в провинциях Лао Кай и Йень Бай (северный регион Вьетнама). Целью обработки являлись обнаружение и оценка площади незаконной добычи полезных ископаемых. Полученные результаты показывают, что фактическая площадь добычи полезных ископаемых на многих рудниках в изучаемых районах значительно превышает границы, указанные

в лицензии. Снимки сканирования земной поверхности радаром Sentinel-2 MSI имеют самое высокое пространственное разрешение – до 10 м. Пятидневное временное разрешение съемки контролируемой территории позволило эффективно использовать снимки для мониторинга и раннего обнаружения нарушения лицензионных границ участков добычи полезных ископаемых. Полученные результаты исследований предоставляют важную информацию, которая позволит менеджерам проводить мониторинг и надзор за добычей полезных ископаемых в границах, утвержденных лицензией.

Список литературы / References

1. Kozinska P., Gorniak-Zimroz J. A review of methods in the field of detecting illegal open-pit mining activities. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. XXI Conference of PhD Students and Young Scientists (CPSYS 2021)*. 23–25 June 2021 (virtual), Wroclaw, Poland. 2021;942:012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/942/1/012027>
2. Levkin Yu.M. The usage of modern surveying instruments in mining. In: Nguyen Q.L., Pham T.L., Nguyen V.N. et al. (Eds.) *The Proceeding of Geo-spatial Technologies and Earth Resources Conference (GTER 2017)*. 5–6 October 2017, Hanoi, Vietnam. Hanoi: Publ. House for Science and Technology; 2017. Pp. 307–311.
3. Liu Y., Zhong C., Bai B., Zhou Y. Assessment of government supervision on the loss of sea sand resource in China. *Economic Research*. 2022;35(1):2732–2746. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.1977672>
4. Forkuor G., Ullmann T., Griesbeck M. Mapping and monitoring small-scale mining activities in Ghana using Sentinel-1 time series (2015–2019). *Remote Sensing*. 2020;12(6):911. <https://doi.org/10.3390/rs12060911>
5. Owusu-Nimo F., Mantey J., Nyarko K.B., et al. Spatial distribution patterns of illegal artisanal small scale gold mining (Galamsey) operations in Ghana: A focus on the Western Region. *Heliyon*. 2018;4(2):e00534. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00534>
6. Merugu S., Jain K. Change detection and estimation of illegal mining using satellite images. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Innovations in Electronics and Communication Engineering (ICIECE-2013)*. 9–10 August 2013, Hyderabad, India. Pp. 246–251.
7. Hu Z., Ge L., Li X., Rizos C. Designing an illegal mining detection system based on DinSAR. In: *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 25–30 July 2010, Honolulu, HI, USA. Pp. 3952–3955. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5652978>
8. Xia Y., Wan Y. InSAR- and PIM-based inclined goaf determination for illegal mining detection. *Remote Sensing*. 2020;12(23):3884. <https://doi.org/10.3390/rs12233884>
9. Wang L., Yang L., Wang W. et al. Monitoring mining activities using Sentinel-1A InSAR coherence in open-pit coal mines. *Remote Sensing*. 2021;13(21):4485. <https://doi.org/10.3390/rs13214485>
10. Zhang B., Wu S., Ding X. et al. Use of multiplatform SAR imagery in mining deformation monitoring with dense vegetation coverage: A case study in the Fengfeng Mining Area, China. *Remote Sensing*. 2021;13(16):3091. <https://doi.org/10.3390/rs13163091>
11. Le M.H., Do T.P.T., Vu T.T.H. et al. Using optical satellite images to detect the signs of illegal mining in Thai Nguyen province. *Science of Natural Resources and Environment*. 2018;20:30–42. (In Vietnamese)
12. Trinh L.H., Zablotskii V.R. The application of Landsat multi-temporal thermal infrared data to identify coal fire in the Khanh Hoa coal mine, Thai Nguyen province, Vietnam. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017;53(9):1181–1188. <https://doi.org/10.1134/S0001433817090183>
13. Trinh L.H. Hydrothermal minerals mapping using based on remotely sensed data from Sentinel 2 satellite: a case study in Vinh Phuc Province, Northern Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2019;4(4):309–317. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2019-4-309-317>

Информация об авторах

Суан Бьен Чан – преподаватель, Ханойский университет природных ресурсов и окружающей среды, г. Ханой, Вьетнам; ORCID [0009-0005-1113-1545](https://orcid.org/0009-0005-1113-1545), Scopus ID [57951801800](https://scopus.com/authorid/57951801800); e-mail txbien.ph@hunre.edu.vn

Ле Хунг Чинь – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой геодезии и картографии, Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куи Дон, г. Ханой, Вьетнам; ORCID [0000-0002-2403-063X](https://orcid.org/0000-0002-2403-063X), Scopus ID [57035066200](https://scopus.com/authorid/57035066200); e-mail trinhlehung@lqdtu.edu.vn

Кюок Лонг Нгуен – кандидат технических наук (маркшейдерское дело), заведующий кафедрой маркшейдерского дела, Ханойский университет горного дела и геологии, г. Ханой, Вьетнам; ORCID [0000-0002-4792-3684](https://orcid.org/0000-0002-4792-3684), Scopus ID [57204138384](https://scopus.com/authorid/57204138384); e-mail nguyenquoclong@humg.edu.vn



Юрий Михайлович Левкин – доктор технических наук, профессор, Союз маркшейдеров России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0004-4364-0785](https://orcid.org/0009-0004-4364-0785), Scopus ID [57297910200](https://scopus.com/authorid/57297910200); e-mail lev5353@bk.ru

Игорь Владимирович Зеньков – доктор технических наук, профессор, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4427-4196](https://orcid.org/0000-0003-4427-4196), Scopus ID [57188958340](https://scopus.com/authorid/57188958340); e-mail zenkoviv@mail.ru

Ти Хань Тонг – преподаватель, Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, г. Ханой, Вьетнам; ORCID [0000-0002-6639-0318](https://orcid.org/0000-0002-6639-0318), Scopus ID [57314239400](https://scopus.com/authorid/57314239400); e-mail hankhuenam@gmail.com

Information about the authors

Xuan Bien Tran – Lecturer, Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam; ORCID [0009-0005-1113-1545](https://orcid.org/0009-0005-1113-1545), Scopus ID [57951801800](https://scopus.com/authorid/57951801800); e-mail txbien.ph@hunre.edu.vn

Le Hung Trinh – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam; ORCID [0000-0002-2403-063X](https://orcid.org/0000-0002-2403-063X), Scopus ID [57035066200](https://scopus.com/authorid/57035066200); e-mail trinhlehung@lqdtu.edu.vn

Quoc Long Nguyen – Cand. Sci. (Mine Surveying), Head of Mine Surveying Department, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam; ORCID [0000-0002-4792-3684](https://orcid.org/0000-0002-4792-3684), Scopus ID [57204138384](https://scopus.com/authorid/57204138384); e-mail nguyenquoclong@humg.edu.vn

Yuri M. Levkin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Russian Union of Surveyors, Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0004-4364-0785](https://orcid.org/0009-0004-4364-0785), Scopus ID [57297910200](https://scopus.com/authorid/57297910200); e-mail lev5353@bk.ru

Igor V. Zenkov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Ecology and Nature Management, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4427-4196](https://orcid.org/0000-0003-4427-4196), Scopus ID [57188958340](https://scopus.com/authorid/57188958340); e-mail zenkoviv@mail.ru

Thi Hanh Tong – Lecturer, Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam; ORCID [0000-0002-6639-0318](https://orcid.org/0000-0002-6639-0318), Scopus ID [57314239400](https://scopus.com/authorid/57314239400); e-mail hankhuenam@gmail.com

Поступила в редакцию	22.12.2022	Received	22.12.2022
Поступила после рецензирования	14.04.2023	Revised	14.04.2023
Принята к публикации	15.04.2023	Accepted	15.04.2023



ПОДГОТОВКА ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КАДРОВ. ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-71>

УДК 622:378

**Прикладная геология – базовое направление подготовки кадров горно-геологической отрасли**А. А. Верчеба¹   , В. А. Макаров²  ¹ *Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, Российская Федерация*² *Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация* aa_ver@mail.ru**Аннотация**

Развитие кадрового потенциала горно-геологической отрасли России – во многом задача государства и его институтов. В списке вызовов и угроз развитию минерально-сырьевой базы Российской Федерации в новой Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года, которая была разработана и принята Распоряжением Правительства Российской Федерации № 2914 от 22.12.2018 г. (далее – Стратегия), среди прочих указан дефицит квалифицированных кадров в области геологического изучения недр, а также разрыв связей в системе «образование – наука – производство». Очевидно, что решение задач, направленных на развитие геологической отрасли России и воспроизводство минерально-сырьевой базы, сформулированных в Стратегии, будет обеспечиваться главным образом геологическими знаниями и навыками, формируемыми в научно-практической деятельности нового поколения геологов. Современная модернизация геологического образования при отсутствии профессиональных стандартов направлена на сопряжение компетенций выпускников вузов и квалификации представителей профессии геологов, геофизиков, геохимиков, гидрогеологов и геологоразведчиков. Взаимодействие вузов с горными и геологическими компаниями в части совершенствования образовательных стандартов и программ обучения особенно важно в условиях развития и масштабного внедрения новых технологий изучения минерального сырья на всех стадиях геологоразведочного процесса. Воспроизводство кадрового потенциала геологоразведочной отрасли безусловно должно быть под пристальным вниманием государства и при его непосредственном управлении, так как во многом будет определять минерально-сырьевой суверенитет страны.

Ключевые слова

прикладная геология, подготовка кадров, геологическое изучение недр, системный подход, интеграция, исследования, производство, образование, стратегия

Для цитирования

Vercheba A. A., Makarov V. A. Applied geology – basic training program for mining and geological industry personnel. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):183–190. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-71>

PROFESSIONAL PERSONNEL TRAINING

Research paper

Applied geology – basic training program for mining and geological industry personnelA. A. Vercheba¹   , V. A. Makarov²  ¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation*² *Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation* aa_ver@mail.ru**Abstract**

The development of the human resources potential of the mining and geological industry in Russia is largely a task of the state and its institutions. The shortage of qualified personnel in the field of geological study of the subsurface, as well as the gap in the “education – science – production” system are indicated among other things in the list of challenges and threats to the development of the mineral resource base of the Russian Federation in the new Strategy of Development of the Mineral Resource Base of the Russian Federation



until 2035. This strategy was developed and adopted by Order of the Government of the Russian Federation No. 2914 of 22.12.2018 (hereinafter – Strategy). Obviously, the solution of the tasks aimed at developing the geological industry of Russia and reproduction of the mineral resource base, formulated in the Strategy, will be provided mainly by the geological knowledge and skills formed in the scientific and practical activities of the new generation of geologists. The current modernization of geological education in the absence of professional standards is aimed at combining the competences of university graduates and qualifications of representatives of the profession of geologists, geophysicists, geochemists, hydrogeologists and geological prospectors. Interaction of universities with mining and geological companies in terms of improving educational standards and training programs is especially important in the conditions of the development and large-scale implementation of new technologies for mineral resources study at all stages of the geological exploration process. Reproduction of the personnel potential of the exploration industry should certainly be under the close attention of the state and under its direct management, as it will largely determine the mineral resources sovereignty of the country.

Key words

applied geology, personnel training, geological study of the subsurface, system approach, integration, research, production, education, strategy

For citation

Vercheba A.A., Makarov V.A. Applied geology – basic training program for mining and geological industry personnel. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(2):183–190. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-71>

Введение

Развитие системы подготовки кадров для минерально-сырьевого комплекса страны – одно из приоритетных направлений деятельности всех государственных институтов [1–3]. При этом важно постоянно проводить анализ не только количественных характеристик системы подготовки [4–6], особенностей научно-педагогических школ, но и многих других немаловажных аспектов, которые влияют на качество и эффективность подготовки специалистов [7–9].

Как область науки и образования геология в Российской Федерации проявлена в двух взаимосвязанных и дополняющих друг друга направлениях. Первое из них: фундаментальная геология – наука об истории, строении, вещественном составе Земли и её космических связях, происхождении и эволюции жизни. Это направление образует ядро геологии – классическую общую геологию в её широком смысле.

Второе направление – прикладная геология – базируется на фундаменте первого и представлено комплексом дисциплин по металлогении, прогнозу, поискам и разведке полезных ископаемых. Специалисты данного направления были и остаются ориентированными на воспроизводство минерально-сырьевой базы (МСБ) и геологическое обеспечение хозяйственной деятельности страны.

В основу высшего геологического образования в России с первых дней его основания была положена методологическая триада сопряжения геологической науки, геологического обучения и геологической практики¹ [6, 8]. Реализация этого принципа в Советском Союзе позволила сформировать сильные геологические школы в России и союзных республиках, входивших в СССР.

Краткая историческая справка

Отличительной особенностью профессиональной подготовки специалистов-геологов до проведения масштабных реформ в системе российского высшего образования была актуальность (приближенность к производству) образовательных программ и высокая унифицированность учебных планов университетов. Динамичному развитию геологического образования и геологической отрасли в целом (в так называемый «золотой век геологии») также способствовали: отлаженная система воспроизводства научно-педагогических кадров, скоординированная политика в проведении полевых учебных и производственных практик, государственное распределение выпускников горно-геологических учебных заведений на предприятия отрасли после окончания вуза [10].

Немаловажную координирующую роль при этом играло Министерство геологии СССР, участвуя в планировании набора на геологические специальности и определении их номенклатуры. Министерство оказывало помощь вузам в организации учебных и производственных геологических практик, выстраивании системы повышения квалификации и переподготовки геологических кадров. Значимыми были поддержка научных исследований в вузах, финансирование научных исследований в отраслевых НИИ и производственных подразделениях. Результатом такой политики был высокий уровень квалификации инженерных геологических кадров. К примеру, в этот период в тематических и геолого-съёмочных экспедициях Красноярского геологического управления до 20–30 % ведущих специалистов-геологов имели научные степени. Реализация четко скоординированной кадровой политики позволила создать в Советском Союзе одну из лучших в мире систем профессионального высшего геологического образования, которая обеспечила динамичное развитие отечественного минерально-сырьевого комплекса и задел запасов по большинству видов полезных ископаемых на долгие годы вперед.

¹ Концепция геологического образования в России: Материалы совместного заседания коллегий Минобразования России и МПР России. М.: НИИ-Природа; 2000. 24 с.



Не секрет, что минерально-сырьевая база твердых полезных ископаемых России во многом была сформирована в советское время. От СССР Россия унаследовала положение самой обеспеченной минерально-сырьевыми ресурсами страны. Доля ее в мировых запасах нефти составляет 13 %, газа – 32, угля – 11, свинца, цинка, кобальта, никеля, железа – от 10 до 36 %, и т.д. Валовая ценность разведанных запасов и предварительно оцененных ресурсов в недрах составляет около \$ 30 трлн [10, 11].

После распада Советского Союза проблема самообеспечения по отдельным видам минерального сырья встала и перед Россией. Образовался дефицит более чем по 15 видам твердых полезных ископаемых (марганец, хром, стронций, ртуть и др.). За границами Российской Федерации (в Казахстане) остались практически все промышленные запасы хрома, 80 % запасов урана находятся на территории Казахстана, Узбекистана и Украины. Месторождения марганца остались на Украине и в Грузии, около 40 % ресурсов золота – в Узбекистане и Казахстане и т.д. Запасы железной руды сократились на 30 % от того, что было в Союзе.

Данное обстоятельство, а также сложившиеся в последние десятилетия тренды в горно-геологической отрасли страны, а именно: сокращение темпов прироста и истощение запасов многих важнейших видов твердых полезных, снижение объемов их добычи, замедление освоения новых месторождений, определили необходимость актуализации стратегии развития минерально-сырьевой базы России в целом.

Современность

Новая Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года была разработана и принята Распоряжением Правительства Российской Федерации № 2914 от 22.12.2018 г. (далее – Стратегия)². В Стратегии отражена сложившаяся негативная ситуация с дефицитными видами полезных ископаемых, к которым отнесены уран, марганец, хром, титан, бокситы, цирконий, бериллий, литий, рений, редкие земли иттриевой группы, плавленый шпат. Показано, что воспроизводство ресурсов этих видов полезных ископаемых необходимо обеспечить открытием месторождений с качественными рудами на основе внедрения усовершенствованных прогнозно-поисковых комплексов, а также разработки новых экономически эффективных технологий обогащения и переработки низкокачественного минерального сырья и вовлечения его в освоение.

В списке вызовов и угроз развитию минерально-сырьевой базы Российской Федерации в новой Стратегии среди прочих указан дефицит квалифицированных кадров в области геологического изучения недр, а также разрыв связей в системе «образование – наука – производство». Очевидно, что решение задач,

направленных на развитие геологической отрасли России и воспроизводство минерально-сырьевой базы, сформулированных в Стратегии, будет обеспечиваться главным образом геологическими знаниями и навыками, формируемыми в научно-практической деятельности нового поколения геологов.

Для устойчивого развития научного и кадрового потенциала геологической отрасли, способного обеспечить работы по расширенному воспроизводству МСБ Российской Федерации, Стратегией предлагается ряд мероприятий, ключевыми из которых являются:

- 1) разработка и проведение мониторинга и прогнозирования (среднесрочного и долгосрочного) в отношении потребности в кадрах;
- 2) развитие и совершенствование системы отраслевых профессиональных стандартов;
- 3) создание системы непрерывного повышения квалификации, направленной на формирование новых компетенций специалистов, необходимых для обеспечения инновационного развития отрасли;
- 4) создание и развитие сети отраслевых региональных центров компетенций для осуществления координации взаимодействия образовательных организаций различного уровня и предприятий отрасли в регионах в целях обеспечения высокого качества профессиональной подготовки.

Мероприятия и задачи, определенные Стратегией в области кадровой политики геологической отрасли, в том числе по направлению подготовки инженеров-геологов в сфере «Прикладной геологии», пока далеки от реализации.

Мониторинг состояния и прогноз потребности в геологических кадрах

В последние годы отмечается большой дефицит геологов-прикладников как в профильных геологических организациях, так и в горнорудных компаниях, работающих на сопровождении горных работ. Вместе с тем увеличения контрольных цифр приема набора на направление подготовки обучающихся «Прикладная геология» нет. В некоторых ведущих вузах (Иркутск, Красноярск, Москва, Томск) в последние 5–8 лет произошло сокращение набора абитуриентов на данное направление подготовки. Координации в определении контрольных цифр приема и потребности геологической отрасли в специалистах между ведомствами Минобрнауки России и Министерства природных ресурсов России не хватает.

К сожалению, имеются серьезные проблемы с набором абитуриентов на геологические специальности. По целому ряду причин они особенно остры для региональных вузов. Как правило, это – низкая численность выпускников школ, отток абитуриентов с высоким баллом ЕГЭ в столичные вузы, сложности привлечения иностранных студентов, невысоким престижем горно-геологических и металлургических профессий у молодежи. Государственной политики в части мониторинга и прогноза потребности в геологах нет. Оставляет желать лучшего работа по профессиональной ориентации молодежи и популяризации геологических профессий.

² Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.12.2018 г., № 2914-р.



Развитие и совершенствование системы отраслевых профессиональных стандартов

Отраслевые профессиональные стандарты должны определять содержание образовательных стандартов учебных заведений, реализующих подготовку по соответствующему направлению. На сегодняшний день профессиональные стандарты, содержащие обобщенные трудовые функции и квалификационные требования для горных инженеров, не разработаны.

В этом случае вузам и факультетам дано право самостоятельно устанавливать профессиональные компетенции, реализуемые в основной образовательной программе, для специализаций своей образовательной программы.

Именно в силу этих обстоятельств в течение последних пяти лет горно-геологическими университетами и факультетами была проведена работа по модернизации федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования – специалитет (далее ФГОС ВО).

Федеральный государственный стандарт высшего образования – специалитет по специальности «Прикладная геология» был утвержден приказом Минобрнауки № 953 от 12 августа 2020 г. и введен в систему российского высшего образования с сентября 2021 года³.

Координация деятельности горно-геологических вузов по разработке образовательных стандартов осуществлялась созданным в 2016 г. Федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования (ФУМО) по укрупнённым группам специальностей и направлений подготовки «Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия».

Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению «Прикладная геология» предусмотрено формирование у выпускников по направлению подготовки «Прикладная геология» универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций. В ФГОС ВО учтены положения Постановления Минтруда России № 37 от 21.08.98, где определено, что дипломированные специалисты по направлению подготовки «Прикладная геология» должны быть подготовлены к выполнению квалификационных требований на должностях горных инженеров – геолога, минералога, геохимика и др. – в соответствии с полученной специализацией.

Независимая общественная и профессиональная экспертиза установила соответствие содержания ФГОС ВО в части реализации универсальных и общепрофессиональных компетенций выпускников приоритетным направлениям научно-технологического развития (НТР) Российской Федерации, а именно:

– переходу к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, созданию систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта;

– переходу к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышению эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формированию новых источников, способов транспортировки и хранения энергии;

– возможности эффективного ответа российского общества на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий, социальных институтов на современном этапе глобального развития.

Из-за отсутствия отраслевых профессиональных стандартов с учетом имеющегося в мировой геологической науке и практики опыта гармонизации требований к уровням квалификаций специалистов и исследователей в разных отраслях экономики следует разработать «Основной реестр квалификаций» (ОРК) в сфере горно-геологических исследований и освоения недр, а также подготовки научно-технических кадров. Для этого необходимо включить в ОРК наиболее востребованные сферы профессиональной деятельности: научно-исследовательский; проектно-испытательский; производственно-технологический; педагогический; организационно-управленческий, которые установлены в ФГОС ВО.

ОРК будет являться основой для разработки усовершенствованных образовательных программ высшего образования по соответствующим видам профессиональной деятельности и в то же время критерием для разработки функционала (должностных инструкций) конкретных должностей научно-технических работников. Это обеспечит возможность создания образовательной траектории высшего образования с учетом новых направлений геологической науки, региональных особенностей и рынка труда в организациях геологической службы России и компаниях минерально-сырьевого комплекса и в том числе развивать подготовку элитарных специалистов в области прикладной геологии.

Помимо выбора сфер профессиональной деятельности образовательная организация высшего образования в соответствии со стандартом имеет возможность выбрать специализацию образовательной программы по «Прикладной геологии» месторождений твёрдых полезных ископаемых из следующих⁴:

- геологическая съемка, поиски и разведка месторождений твердых полезных ископаемых;
- геология месторождений нефти и газа;
- поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания;
- прикладная геохимия, минералогия и геммология;
- промысловая геология;
- разведка и оценка стратегических видов полезных ископаемых.

При выборе специализации образовательная организация должна исходить из меняющейся потребности в кадрах, региональной специфики работы предприя-

³ Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – специалитет по специальности 21.05.02 Прикладная геология. М.: Минобрнауки РФ; 2020. 18 с.

⁴ Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – специалитет по специальности 21.05.02 Прикладная геология. М.: Минобрнауки РФ; 2020. 18 с.



тий минерально-сырьевого сектора. Представляется, что перечень специализаций не должен быть статичным. Так, изначально специализация «Разведка и оценка стратегических видов полезных ископаемых» была ориентирована на подготовку специалистов в области исследования месторождений редких и радиоактивных металлов. Сегодня список стратегических видов минерального сырья существенно расширен. Распоряжением Правительства РФ № 2473-р от 30 августа 2022 г. перечень увеличен с 29 до 61 позиции. В него вошли все основные виды полезных ископаемых – нефть, природный газ, цветные, черные, благородные, редкие и рассеянные металлы и другие виды сырья, важные для обеспечения экономического и оборонного суверенитета страны. Очевидно, что этот документ был принят на фоне политической турбулентности и усугубляющихся беспрецедентных санкций. Он подчеркивает важность обеспечения сырьевой независимости страны в части бесперебойного функционирования производств «критических видов» полезных ископаемых, важных для экономики и обороны.

В настоящее время некоторые ведущие вузы (Национальный исследовательский Томский политехнический университет и Российский государственный геологоразведочный университет) уже с 2019 г., еще до выхода Распоряжения Правительства № 2473-р, реализуют направление подготовки «Геология месторождений стратегических видов полезных ископаемых» по образовательной программе магистратуры.

Эксперты АО «Росгеология» пришли к мнению, что высокотехнологичная экономика требует полной уверенности в достаточном запасе редкоземельных металлов, олова, титана, марганца, хрома, вольфрама, золота и ряда других минералов (в том числе нерудных). При этом прогнозы демонстрируют умеренный рост потребления ископаемого топлива в среднесрочной перспективе несмотря на развитие «зеленой энергетики». Это означает необходимость перераспределения ресурсов и человеческого капитала в сторону ускоренного воспроизводства твердых полезных ископаемых и проведения соответствующих кадровых трансформаций.

Принцип межотраслевого баланса в минерально-сырьевом секторе твердых полезных ископаемых должен быть переориентирован в сторону существенного увеличения объема тематических, опытно-методических и научно-исследовательских геологоразведочных работ. Основное внимание следует уделить разработке новых методов и технологий ведения поисковых и оценочных работ, ориентированных на выявление слабопроявленного оруденения и потенциальных месторождений дефицитных видов полезных ископаемых. Это потребует трансформации образовательных программ вузов, ведущих подготовку специалистов по «Прикладной геологии» месторождений твердых полезных ископаемых, с учетом актуальных особенностей:

- владение фундаментальными знаниями в области геологии редких и радиоактивных металлов, физико-химической геотехнологии и смежных дисциплин на мировом уровне;

- понимание правил создания проектных документов на разведку и разработку месторождений

с учётом современных международных стандартов и правил;

- способность к аналитической научно-технической и производственно-технологической работе и принятию нестандартных творческих решений;

- использование современных компьютерных технологий и программных комплексов в горно-геологической практике;

- мобильность и умение работать в команде.

Для формирования отмеченных качеств молодого специалиста в период его обучения предусмотрено формирование общепрофессиональных и профессиональных компетенций как сочетания знаний и навыков теоретической подготовки и практической деятельности:

- способность применять основные положения фундаментальных естественных наук и научных теорий при проведении научно-исследовательских работ по изучению и воспроизводству минерально-сырьевой базы;

- способность применять правовые основы геологического изучения недр и недропользования, обеспечения экологической и промышленной безопасности и умение их учитывать при поисках, разведке и эксплуатации месторождений;

- способность изучать и анализировать вещественный состав горных пород и руд и геолого-промышленные и генетические типы месторождений полезных ископаемых при решении задач по рациональному и комплексному освоению минерально-сырьевой базы;

- способность работать с программным обеспечением общего, специального назначения, в том числе моделировать горные и геологические объекты;

- способность проводить технические расчеты по проекту, технико-экономический и функционально-стоимостной анализ эффективности проектов;

- способность планировать и выполнять аналитические, имитационные и экспериментальные исследования, критически оценивать результаты исследований и делать выводы;

- способность проводить оценку прогнозных ресурсов и подсчет запасов месторождений твердых полезных ископаемых.

По мнению экспертного сообщества, подготовка таких специалистов должна базироваться на формировании у них не только универсальных и профессиональных компетенций, установленных в ФГОС ВО «Прикладная геология», но и специализированных профессиональных. Эти компетенции разрабатываются вузом с учетом мнения работодателей и ведущих специалистов научно-исследовательских институтов (ИМГРЭ, ВИМС и ЦНИГРИ), институтов Российской академии наук (ИГЕМ РАН, ИФЗ РАН) и структурных подразделений АО «Росгеология».

Основанием будущей успешной научно-производственной деятельности выпускников служит то, что в процессе обучения по направлению подготовки «Прикладная геология» они имеют возможность совершенствования научного прогноза, поиска и оценки месторождений твердых полезных ископаемых и основ минералогических, аналитических, техноло-



гических методов изучения и оценки востребованных видов сырья.

Мотивацией подготовки высококвалифицированных специалистов по разведке и оценке твердых полезных ископаемых должно быть предоставление студентам материальной поддержки в виде стипендий и грантов за счет средств ведущих горно-геологических компаний для практического освоения современных методов изучения руд полезных ископаемых и геотехнологии их комплексной переработки [12].

Нельзя не забывать об учебно-методическом обеспечении системы подготовки горных инженеров и геологов. Важное значение имеют сейчас издание научно-популярной и учебной литературы по геологии месторождений стратегических видов минерального сырья и создание электронных учебных пособий, а также научно-справочной литературы, учитывающих современное состояние минерально-сырьевой базы минерального сырья и особенностей маркетинга дефицитных металлов.

Наукоемкость российской отраслевой науки, концентрация в ней передовых конкурентных разработок обуславливают необходимость уже сейчас опережающих инвестиций в подготовку кадров, научно-техническое совершенствование этого кластера минерально-сырьевого комплекса с целью сохранения ее высокого технологического потенциала.

Непрерывное образование и инновационное развитие геологической отрасли

Стремительное развитие технологий в минерально-сырьевом секторе экономики определяет необходимость постоянного повышения квалификации и переподготовки персонала. Зачастую производству требуются специалисты, не вписывающиеся в рамки образовательных программ отдельных специализаций. Для прикладной геологии, куда активно приходят цифровые технологии (внедрение компьютерного моделирования месторождений, технологии дистанционного зондирования, использование нейросетевого анализа и искусственного интеллекта в работе с большими массивами данных при прогнозировании и др.), актуальным становится повышение квалификации в области геоинформатики. В горнопромышленной (рудничной) геологии в мире и в России оформляется новое направление – геометаллургия, объединяющее в себе компетенции рудничного геолога, горняка, обогатителя и металлурга. В условиях глобального потепления для строительных и горно-металлургических компаний, работающих в зоне многолетней мерзлоты, для геологов-прикладников специализации «Поиск и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» актуальными становятся компетенции по геокриологии.

В целом в Российской Федерации система непрерывного повышения квалификации и переподготовки, а также получения дополнительного образования выстраивается на разных уровнях. Это курсы повышения квалификации, магистратура, аспирантура. Реализация дополнительного образования и пере-

подготовки геологических кадров осуществляется как в корпоративных центрах и учебных заведениях, так и государственных университетах, в том числе с использованием удаленных и сетевых технологий. Примером успешного внедрения и активного развития дистанционных технологий в России является образовательная платформа – Геовебинары. Платформа создана при участии специалистов из авторитетных горнодобывающих компаний, научных и образовательных учреждений. На этой платформе на постоянной основе проводятся онлайн-конференции и лекции, а также ведется прием на курсы повышения квалификации по отраслевым специальностям⁵.

В области подготовки геологических кадров высшей квалификации – кандидатов и докторов наук – в Российской Федерации отмечаются определенные негативные тенденции. По сведениям ВАК РФ в России 363 тыс. кандидатов наук и 79 тыс. докторов наук. Среди докторов наук более 50 % старше 60 лет. По естественным наукам, включая научную специальность «Науки о Земле», ученые степени присуждены 21 % от общего числа ученых, из них только 1 % по геолого-минералогическим наукам.

По геолого-минералогическим наукам число присужденных степеней снизилось в 5 раз по сравнению с 2010 г. за счет ликвидации большого количества отраслевых научно-исследовательских геологических институтов, сокращения количества диссертационных советов, снижения интереса молодежи к научным исследованиям и, как следствие, утраты научных школ в ряде центров подготовки.

Решение данной проблемы требует комплексного государственного подхода, который бы включал: стимулирование работодателями работников, повышающих квалификацию через соискательство, аспирантуру и докторантуру; увеличение объемов целевого финансирования геологических НИР по линии Минобрнауки и Минприроды, включая поддержку грантами молодых исследователей.

Создание и развитие сети отраслевых региональных центров компетенций для осуществления координации взаимодействия образовательных организаций различного уровня и предприятий отрасли в регионах в целях обеспечения высокого качества профессиональной подготовки становится актуальным в условиях сокращения отраслевых геологических НИИ, тематических партий при крупных экспедициях. Опыт создания таких центров появляется в отдельных регионах в качестве субъектов различных организационно-правовых форм. Так, на базе Иркутского научно-исследовательского института создана Сибирская школа геонаук как исследовательский институт в составе ИРНИТУ и одновременно – крупная геологическая корпорация в отрасли рудной геологоразведки. Исследовательская программа данного центра направлена на оптимизацию методологии и технологии развития минерально-сырьевой базы по рудным полезным ископаемым в сложных условиях. Сибирской школой геонаук ведутся научные исследования и реализуются ориги-

⁵ Геовебинары. Платформа знаний по геологии и горному делу. URL: <https://geowebinar.com>



нальные образовательные программы, направленные на создание комплекса новых технологий геологоразведочных работ со сверхнизкой себестоимостью и высокой производительностью, и на их базе – осуществление перехода Университета в позицию активного субъекта горно-геологической индустрии⁶.

Другим примером формирования регионального центра компетенций как результата взаимодействия университета и крупной компании может служить R&D Центр НорНикель в институте Горного дела геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета⁷. Созданный в 2017 г. при содействии компании ПАО «ГМК Норильский Никель» как «Научно-технологический центр по разработке системы управления и контроля качества добычи и переработки минерального сырья на основе моделирования месторождений и управления рудопотоками». Центр развивает компетенции в области компьютерного моделирования месторождений и календарного планирования отработки, совершенствования методик технологического картирования и контроля качества руд и их обогащения. Перспективной задачей центра является реализация научных проектов и образовательных программ по направлениям «Геометаллургия» и «Горнопромышленная геология».

К успешно действующим центрам компетенций относятся базовые кафедры отраслевых научно-исследовательских институтов: ВИМС, ЦНИГРИ, ИМГРЭ, которые на протяжении последних лет реализуют подготовку высококвалифицированных специалистов по твердым полезным ископаемым и формируют контингент кадров высшей квалификации геологоразведочной отрасли.

Примером сетевого центра компетенций, находящегося на стадии формирования, является Инженерно-технический центр изучения литиевого сырья,

⁶ Siberian School of Geosciences. URL: <https://www.istu.edu/deyatelnost/obrazovanie/>

⁷ R&D центр НН – Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. URL: <https://rdcnnsfu.ru/>

формируемый на базе ПАО «Химико-металлургический завод» в г. Красноярске. В задачи Центра будут входить вопросы геологии, разведки, обогащения и переработки высоко востребованного на мировом рынке батарейного литиевого сырья. Предполагается, что создаваемый центр компетенций будет основой научно-производственного кластера редкоземельных металлов «Литий», который объединит компании, владеющие лицензиями на месторождения литиевых руд, производственные возможности АО «Химико-металлургический завод», лабораторные и экспертные возможности отраслевого геологического института ВИМС, а также образовательные и экспериментальные возможности университетов МИСиС и СФУ. Кластерный подход позволит обеспечить не только разработку новых технологий, но и подготовку специалистов в важной для народного хозяйства области поисков добычи и переработки стратегически важного минерального сырья.

Заключение

Решение кадровых проблем геологической отрасли – как текущих, так и в долгосрочной перспективе, невозможно без решения задачи улучшения имиджа минерально-сырьевой отрасли и популяризации горно-геологических профессий. Здесь необходимо объединение усилий профильного министерства, вузов и бизнеса в реализации долгосрочных комплексных мероприятий, включающих: разработку совместных профориентационных программ вузами и горно-металлургическими компаниями в регионах присутствия; создание положительных информационных поводов в части науки и инноваций, положительных экологических решений. Требуется объединение усилий вузов и компаний в пропаганде горно-геологических знаний: создание научно-популярных (художественных) фильмов, статей, телевизионных передач, интернет-ресурсов (Первый геологический канал), которые бы раскрывали существо геологических профессий, новых горных проектов, их социальную и экономическую значимость.

Список литературы

1. Казанин О.И., Дребенштедт К. Горное образование в XXI веке: глобальные вызовы и перспективы. *Записки Горного института*. 2017;225:369–375. <https://doi.org/10.18454/pmi.2017.3.369>
2. Puchkov L.A., Petrov V.L. The system of higher mining education in Russia. *Eurasian Mining*. 2017;(2):57–60. <https://doi.org/10.17580/em.2017.02.14>
3. Мартынов В.Г., Кошелев В.Н., Майер В.В., Туманов А.А. Нефтегазовое образование в России: вчера, сегодня, завтра. *Высшее образование в России*. 2021;30(8–9):144–157. <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2021-30-8-9-144-157>
4. Петров В.Л. Аналитический обзор системы подготовки горных инженеров в России. *Горные науки и технологии*. 2022;7(3):240–259. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-240-259>
5. Казанин О.И., Сергеев И.Б. Подготовка современного горного инженера: задачи университетов и профессиональных сообществ. *Горный журнал*. 2017;(10):75–80. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.10.16>
6. Верчеба А.А. Подготовка кадров для горно-геологической отрасли России. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):144–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153>
7. Черникова А.А., Петров В.Л. Подготовка горных инженеров в российских университетах исследовательского типа. *Горный журнал*. 2015;(8):103–106. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.08.22>
8. Верчеба А.А., Оганесян Л.В. Пути совершенствования высшего геологического образования. *Разведка и охрана недр*. 2016;(12):3–8.



9. Климов И. Ю. Анализ эффективности реализации компетентностного подхода в программе опережающего обучения горнодобывающей компании. *Горные науки и технологии*. 2020;5(1):56–68. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-56-68>
10. Оганесян Л. В. *Магистральные пути и узкие тропы геологической службы России*. М.: ВНИИгеосистем; 2012. 264 с.
11. Козловский Е. А. О проблемах реорганизации системы геологических исследований в свете минерально-сырьевой безопасности страны. *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2016;(6):4–12.
12. Бойцов В. Е., Верчеба А. А. Подготовка кадров по созданию минерально-сырьевой базы ядерной энергетики. *Известия вузов. Геология и разведка*. 2008;(2):12–17.

References

1. Kazanin O. I., Drebenshtedt K. Mining education in the XXI century: global challenges and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2017;225:369–375. <https://doi.org/10.18454/pmi.2017.3.369>
2. Puchkov L. A., Petrov V. L. The system of higher mining education in Russia. *Eurasian Mining*. 2017;(2):57–60. <https://doi.org/10.17580/em.2017.02.14>
3. Martynov V. G., Koshelev V. N., Mayer V. V., Tumanov A. A. Oil and gas education in Russia: yesterday, today, tomorrow. *Vysshiee Obrazovanie v Rossii*. 2021;30(8–9):144–157. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2021-30-8-9-144-157>
4. Petrov V. L. Analytical review of the training system for mining engineers in Russia. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(3):240–259. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-3-240-259>
5. Kazanin O. I., Sergeev I. B. Training a modern mining engineer: Objectives of universities and professional communities. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(10):75–80. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.10.16>
6. Vercheba A. A. Personnel training for the mining and geological sector of Russia. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):144–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153>
7. Chernikova A. A., Petrov V. L. Training of mining engineers at the Russian research universities. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(8):103–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.08.22>
8. Vercheba A. A., Oganesyanyan L. V. Ways of improving the higher geological education. *Razvedka i Okhrana Nedr*. 2016;(12):3–8. (In Russ.)
9. Klimov I. Yu. Analysis of soft skills-based approach effectiveness in advanced training program for mining company. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):56–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-56-68>
10. Oganesyanyan L. V. *Main routes and narrow paths of the Russian Geological Survey*. Moscow: VNIIGeosistem; 2012. 264 p. (In Russ.)
11. Kozlovsky E. A. Problems of reorganization of geological research system in the light of mineral resources security of the country. *Problems of Economics and Management of Oil and Gas Complex*. 2016;(6):4–12. (In Russ.)
12. Boytsov V. Ye., Vercheba A. A. Personnel training for creating mineral and raw material base of nuclear power engineering. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 2008;(2):12–17. (In Russ.)

Информация об авторах

Александр Александрович Верчеба – доктор геолого-минералогических наук, профессор, помощник проректора по учебной работе, профессор кафедры геологии месторождений полезных ископаемых, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе «МГРИ», г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0002-1785-4216](https://orcid.org/0009-0002-1785-4216), Scopus ID [57205211946](https://scopus.com/authorid/57205211946); e-mail aa_ver@mail.ru

Владимир Александрович Макаров – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии месторождений и методики разведки, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация; ORCID [0009-0005-5971-8070](https://orcid.org/0009-0005-5971-8070), Scopus ID [57188966055](https://scopus.com/authorid/57188966055)

Information about the authors

Alexander A. Vercheba – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Assistant Vice Rector, Professor of the Department of Geology of Mineral Deposits, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting “MGRI”, Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0002-1785-4216](https://orcid.org/0009-0002-1785-4216), Scopus ID [57205211946](https://scopus.com/authorid/57205211946); e-mail aa_ver@mail.ru

Vladimir A. Makarov – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Head of Geology and exploration techniques, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation; ORCID [0009-0005-5971-8070](https://orcid.org/0009-0005-5971-8070), Scopus ID [57188966055](https://scopus.com/authorid/57188966055)

Поступила в редакцию 13.01.2023
Поступила после рецензирования 03.05.2023
Принята к публикации 05.05.2023

Received 13.01.2023
Revised 03.05.2023
Accepted 05.05.2023