eISSN 2500-0632

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

Mining Science and Technology

Горные науки и технологии

Vol. Том 9 №4
2024

https://mst.misis.ru/
https://t.me/MinSciTech

ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Mining Science and Technology (Russia)

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

eISSN 2500-0632

2024 Т. 9, № 4

https://mst.misis.ru/

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., Университет науки и технологий 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., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

Дребенштедт Карстен, проф., д-р наук, Технический университет 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., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

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

Раимжанов Бахадиржан Раимжанович, проф., д.т.н., филиал Университета науки и технологий МИСИС, г. Алмалык, 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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Агафонов Юрий Григорьевич, доц., к.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

Плащанский Леонид Александрович, проф., к.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

Разоренов Юрий Иванович, проф., д.т.н., Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

Филонов Михаил Рудольфович, проф., д.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Галушка Дарья Петровна, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, 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, ВИНИТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

OPEN ACCESS Журнал открытого доступа.

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

МИСИС Университет науки и технологий 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.

MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (Russia)
Горные науки и технологии
SCIENTIFIC AND PRACTICAL E-JOURNAL

eISSN 2500-0632
2024
Vol. 9, no. 4
https://mst.misis.ru/

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.), University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF
Oleg I. Kazanin, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation
Svetlana A. Epshtein, Dr.Sci.(Eng.), University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD
Zach Agioutantis, Prof., Ph.D., University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA
Maksim A. Bogdasarou, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Brest State A.S. Pushkin University, Brest, Belarus
Grigory Yu. Boyarko, Prof. Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Geol. and Miner.), National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
Xuan Nam Bui, Prof., Dr.Sci., Hanoi University of Mining and Geology, Duc Thang – Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam
Carsten Drebenstedt, Prof., Ph.D., Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg, Germany
Faramarz Doulati Ardejani, Prof., Ph.D., Colledge of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
Mikhail S. Ershov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation
Akper A. Feyzullaev, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Institute of Geology and Geophysics of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan
Ochir Gerel, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Geoscience Center, the Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia
Zoran Gligorić, Prof., Dr.Sci. (Mining-Underground Mining), University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia
Monika Hardygora, Prof., Ph.D., Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland
Nikolae Ilias, Prof., Dr.Sci.(Eng.), University of Petrosani, Petrosani, Romania
Vladislav Kecojevic, Prof., Ph.D., Benjamin M. Statler College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA
Aleksey A. Khoreshok, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation
Vladimir I. Klishin, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Institute of Coal, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation
Vladimir N. Koshelev, Prof., Dr.Sci.(Chem.), National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Gubkin University), Moscow, Russian Federation
Jyant Kumar, Prof., Ph.D-Geotech.Eng., Indian Institute of Science, Bengaluru, India
Vladimir A. Makarov, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation
Sergey I. Malafeev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia
Oleg S. Misnikov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Tver State Technical University, Tver, Russian Federation
Valery V. Morozov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), 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.), University of Science and Technology MISIS (branch), Almalyk, 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.), 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.), University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
Michael R. Filonov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
Leonid A. Plaschansky, Prof., Cand.Sci.(Eng.), 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, 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, ВИНИТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

FOUNDER AND PUBLISHER
MISIS UNIVERSITY University of Science and Technology MISIS

CONTACT
4 Leninsky Prospect, Moscow 119049, Russian Federation
Phone: +7 (495) 955-00-77
e-mail: send@misis.ru

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

ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ
Mining Science and Technology (Russia)
ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
eISSN 2500-0632
2024
Т. 9, № 4
https://mst.misis.ru/

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Новые достижения в области бурения в песчаниковых, сланцевых и карбонатных формациях на примере исследования пяти крупных месторождений в Месопотамском бассейне Ирака 308
А.Н. Аль-Дуджайли

ОГИС-моделирование строения кайнозойской толщи Брестской области для прогноза и оценки залежей нерудного сырья 328
М.А. Богдасаров, А.Н. Маевская, Д.О. Петров, Н.Н. Шешко

Бурение направленной разведочной скважины в мелководье Каспия 341
А.Р. Деряев

Минерально-сырьевая база меди России: состояние, возможности развития 352
Г.Ю. Боярко, А.М. Лаптева, Л.М. Болсуновская

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Влияние водопритоков на прочностные характеристики пород Ловозерского редкометалльного месторождения 387
А.И. Калашник

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Определение запыленности рабочего места оператора дробильно-щебеночного завода в целях специальной оценки условий труда 395
Е.А. Король, Е.Н. Дегаев, Д.С. Конюхов

Химико-экологические свойства почв и индекс NDVI на рекультивированных сернистоугольных отвалах бореальной зоны 406
Н.В. Митракова, Е.А. Хайрулина, А.А. Перевощикова, Н.В. Порошина, Е.Е. Малышкина, Е.С. Яковлева, Н.А. Кобелев

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Вибрационные показатели для информационного обеспечения оценки технического состояния шаровых мельниц 420
В.Ф. Борисенко, В.А. Сидоров, А.Е. Сушко, В.Н. Рыбаков

MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (Russia)
Горные науки и технологии
SCIENTIFIC AND PRACTICAL E-JOURNAL
eISSN 2500-0632
2024
Vol. 9, no. 4
https://mst.misis.ru/

CONTENTS

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

New advances in drilling operations in sandstone, shale, and carbonate formations: a case study of five giant fields in the Mesopotamia Basin, Iraq 308
A.N. Al-Dujaili

GIS modeling of a Cenozoic strata structure in Brest region for forecasting and evaluation of non-metallic deposits 328
M.A. Bogdasarov, A.N. Mayevskaya, D.O. Petrov, N.N. Sheshko

Directional drilling of an exploratory well in the shallow waters of the Caspian Sea 341
A.R. Deryaev

Mineral resource base of Russia's copper: current state and development prospects 352
G.Y. Boyarko, A.M. Lapteva, L.M. Bolsunovskaya

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Effect of water inflows on the strength characteristics of the Lovozero rare-metal deposit rocks 387
A.I. Kalashnik

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Assessing dust concentration at the workplace of a crushing and screening plant operator for special labor conditions evaluation 395
E.A. Korol, E.N. Degaev, D.S. Konyukhov

Chemical and ecological properties of soils and the NDVI analysis on reclaimed sulfide coal waste dumps in the boreal zone 406
N.V. Mitrakova, E.A. Khayrulina, A.A. Perevoshchikova, N.V. Poroshina, E.E. Malyshkina, E.S. Yakovleva, N.A. Kobelev

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Vibration metrics for informational support in assessing the technical condition of ball mills 420
V.F. Borisenko, V.A. Sidorov, A.E. Sushko, V.N. Rybakov

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обзорная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-08-146
УДК 622.24.051.553.98(567)

Новые достижения в области бурения в песчаниковых, сланцевых и карбонатных формациях на примере исследования пяти крупных месторождений в Месопотамском бассейне Ирака

Ахмед Н. Аль-Дуджайли
Технологический университет имени Амира Кабира, г. Наджаф, Ирак
ahmed.noori203@aut.ac.ir

Аннотация
Проблемы бурения в Месопотамском бассейне (нефтегазоносном бассейне Персидского залива) (южная часть Ирака) разнообразны и касаются таких вопросов, как потери бурового раствора, поломка долота и дифференциальный прихват. Цель настоящего исследования заключается в анализе указанных проблем по всему стратиграфическому разрезу в исследуемом районе. Согласно полученным результатам долота MMD65R, EQH16R и SF74R отлично проявили себя для бурения 16-дюймового профиля, а долото MSi616L показало наибольшую эффективность в 12¼-дюймовом профиле. Для 8½-дюймового профиля было успешно использовано долото MMD65R, а для остальных участков этого профиля применялось EQH12DR. Для долота MMD54 зарегистрированы отличные показатели – наибольшая механическая скорость бурения (ROP) 26,9 м/ч в горизонтальных профилях скважины. Потери бурового раствора чаще всего наблюдались в основании формаций Даммам, Рус, Танума, Мишриф, Харта, Шуайба и Зубейр. Для формаций Зубейр и Мишриф рекомендуется плотность бурового раствора 1,28 г/см^3. Кроме того, во избежание пульсации или свабирования скважины спускоподъемные операции необходимо выполнять с контролируемой скоростью. Концентрация хлористого калия должна поддерживаться в пределах от 3 до 5%. Для изоляции пластов формаций Мишриф и Зубейр следует спустить и правильно установить 7-дюймовую эксплуатационную обсадную колонну с перекрыванием для предотвращения возможного сообщения между нижними водоносными зонами и приповерхностными областями поглощения.

Ключевые слова
углеводороды, месторождение, запасы, бассейн, формация, добыча, бурение, скважина, производительность, раствор, авария, потери бурового раствора, коллектор, долото, план бурения, крутящий момент, управление, Месопотамский бассейн, Ирак

Для цитирования
Al-Dujaili A. N. New advances in drilling operations in sandstone, shale, and carbonate formations: a case study of five giant fields in the Mesopotamia Basin, Iraq. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):308–327. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-08-146

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Reviewer paper

New advances in drilling operations in sandstone, shale, and carbonate formations: a case study of five giant fields in the Mesopotamia Basin, Iraq

A. N. Al-Dujaili
Amirkabir University of Technology, Najaf, Iraq
ahmed.noori203@aut.ac.ir

Abstract
Drilling challenges in the Mesopotamian Basin, Southern Iraq, are varied and include such issues as mud loss, bit damage, and differential sticking. This study aims to analyze these problems across the stratigraphic column in the study area. The results show that the MMD65R, EQH16R, and SF74R bits were successfully used for the 16” section, while the MSi616L bit was the most efficient for the 12¼” section. The MMD65R was suitable for the 8½” section, with the EQH12DR bit being used for the remaining parts of this section. The MMD54 bit showed excellent performance, achieving the highest rate of penetration (ROP) of 26.9 m/hr in well horizontal sections. Mud losses were most commonly observed at the base of the Dam-

© Аль-Дуджайли А. Н., 2024

mam, Rus, Tanuma, Mishrif, Hartha, Shuaiba, and Zubair Formations. An appropriate drilling mud density is 1.28 sg is recommended for Zubair and Mishrif Formations. Additionally, tripping in/out operations must be conducted at controlled speed to prevent surging or swabbing the well. Potassium Chloride concentrations should be maintained between 3 to 5%. A 7" production liner must be run and properly seated to isolate the Mishrif and Zubair Formations, with overlap to prevent potential communication between lower water-bearing zones and shallow loss zones.

Keywords

hydrocarbons, field, reserves, basin, formation, extraction, drilling, well, productivity, solution, accident, mud loss, reservoir, bit, drilling program, torque, control, Mesopotamian Basin, Iraq

For citation

Al-Dujaili A. N. New advances in drilling operations in sandstone, shale, and carbonate formations: a case study of five giant fields in the Mesopotamia Basin, Iraq. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):308–327. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-08-146

Список сокращений и аббревиатур

API	Американский институт нефти
BHA	компоновка низа бурильной колонны
DD	технолог-кривильщик
ECD	эквивалентная циркуляционная плотность
GPM	галлонов в минуту
LCM	материалы для борьбы с поглощением
MD	измеренная глубина
MJ	месторождение Меджнун
MW	плотность бурового раствора
NPT	непродуктивное время
PDC	долото с поликристаллическими алмазными вставками
POOH	подъем из скважины
PV	вязкость бурового раствора
RKB	роторный вкладыш для ведущей трубы
ROP	механическая скорость бурения
RPM	число оборотов в минуту
RSS	роторная управляемая система
Ru	месторождение Румейла
SPM	число ходов в минуту
SSP	план обеспечения безопасности на промышленной площадке
TFA	суммарная площадь насадок
WOB	осевая нагрузка на долото
WQ	месторождение Западная Курна
YP	предел текучести
Zb	месторождение Зубейр

Номенклатура

HR	час
Deg.	градус
RR	повторно проходимый
In	дюйм
Ft	фут
H2S	сероводород
L	литр
M	м/с
Min.	минута
BBL	баррель
Avg.	среднее значение
ID	внутренний диаметр (дюймы)
PP	внутрипластовое давление (Psi, фунт на кв. дюйм)
FG	градиент давления гидроразрыва
KCl	хлористый калий

Введение

На процессы бурения и заканчивания скважин приходится более 40 % всех инвестиций в отрасль добычи углеводородов. Снижение числа отказов в ходе бурения является одним из ключевых способов увеличения полезного времени бурения и решения возникающих при бурении проблем и их последствий. Среди распространенных отказов в процессе бурения скважин стоит назвать прихват бурильной колонны из-за отклонения, обрушение неустойчивых пород, сужение ствола скважины вследствие осыпания пород, поглощение бурового раствора, нефтегазоводопроявления и рассолопроявления [1]. В ходе бурения весь буровой шлам должен быть удален из скважины и поднят на поверхность. Этот процесс называется очисткой ствола [2]. Однако нередко часть материала остается в скважине, что влечет за собой такие последствия, как прихват труб, преждевременный износ долота, замедление скорости бурения, повреждение пласта (гидроразрыв), чрезмерные скручивающие и осевые нагрузки, а также затруднения при проведении геофизических исследований и цементировании скважины [3].

Полная или частичная потеря бурового раствора в пласте во время бурения или несоответствие количеству извлеченного из скважины раствора количества закачанного называется потерей или поглощением бурового раствора [4]. Как правило, это характерно для высокопроницаемых, истощенных коллекторов, естественных разломов, кавернозных формаций и разорванных пластов [5]. Для борьбы с потерями циркуляции применяются различные методы, включая снижение плотности бурового раствора [6] и добавление материалов для борьбы с поглощением (LCM) с целью закупорки и герметизации участков потерь [7]. На потерю бурового раствора влияет множество факторов, в том числе петрофизические свойства (пористость, проницаемость и т.д.), характеристики самого бурового раствора (MW, ECD, YP, PV и т.д.), параметры бурения (ROP, WOB, RPM, SPM, SSP, TFA и т.д.) и условия давления (градиент порового давления, давление гидроразрыва и т.д.) [8]. 54 % расследованных происшествий в связи с прихватом труб произошли во время спускоподъемных операций и проработки ствола сква-

жины снизу вверх [9]. Риск возникновения происшествий из-за прихвата труб возрос в связи с недавним расширением масштабов буровых работ, особенно в истощенных коллекторах с повышенной степенью опасности [10]. В ряде исследований предлагается использовать статистические методы для прогнозирования происшествий в связи с прихватом труб [11].

Salih et al. (2018) изучили формации нефтеносных месторождений южной части Ирака и составили подробное описание территории от Верхнего Фарса до формации Мишриф. Степень серьезности проблем в каждой формации определялась путем выявления причин проблем или потенциальных рисков в скважинах [12]. Для месторождения Румейла в основании формации Даммам типичны потери в связи с водопроявлением в процессе бурения. Также сообщалось о потерях в формации Харта, а в формации Танума наблюдались значительные размывы. Изменчивость архитектуры коллекторов Мишриф и разнообразие типов пород могут привести к неравномерному охвату и обводнению при наличии слоев с более высокой проницаемостью. К обрушающимся формациям относятся Танума, Нахр-Умер и Верхние сланцы. Потери также могут наблюдаться в формациях Мишриф и Зубейр, кроме того, в формациях Мишриф, Нахр-Умер и Зубейр возможен прихват труб. Такая проблема, как поломка долота при бурении через ангидритовые слои (формации Нижний Фарс и Рус), в меньшей степени влияет на план бурения [13].

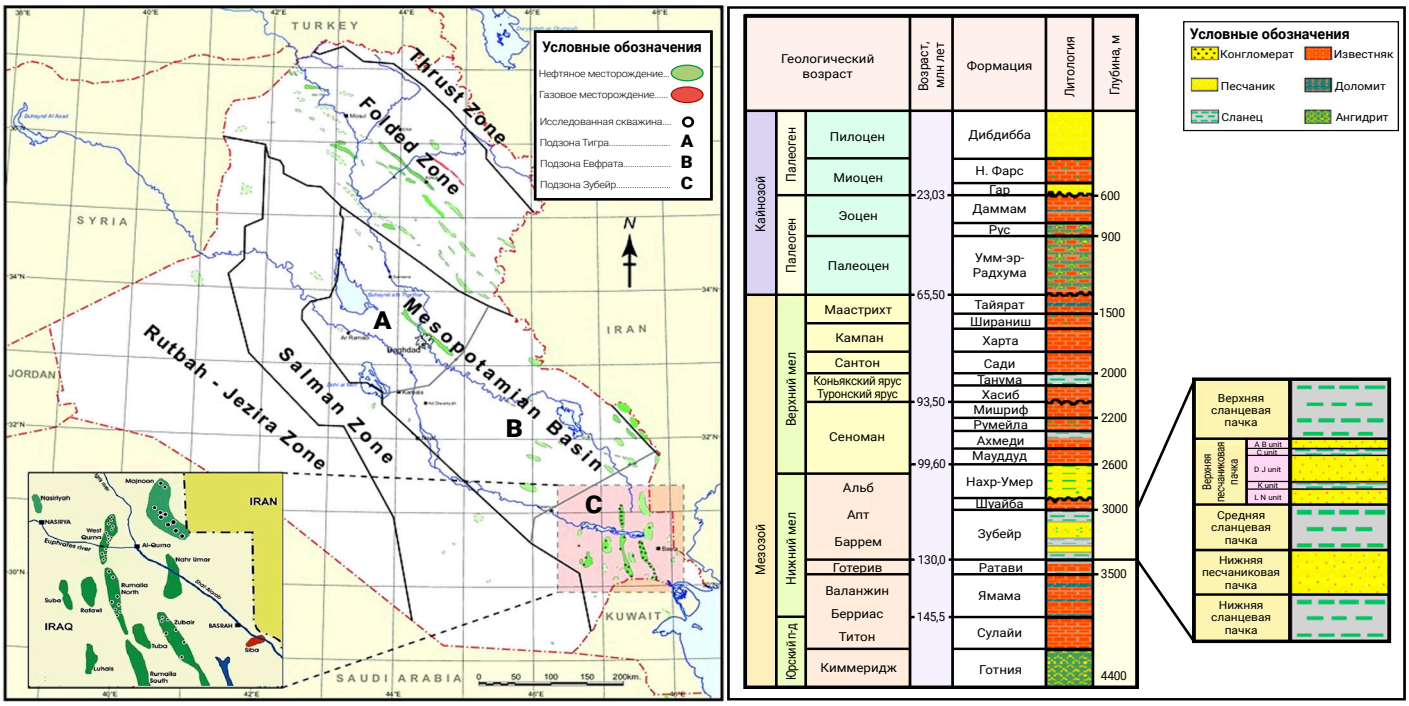
1. Геолого-физическая характеристика

Территория Ирака представлена четырьмя основными тектоническими зонами. Эти зоны можно классифицировать по ряду признаков, включая тип горных пород, возраст, толщину и структурные переходы. Выделяют следующие зоны [14]:

1. Внутренний стабильный шельф;
2. Внешний нестабильный шельф;
3. Территории Шалейр;
4. Загрос.

Внутренние и внешние регионы Аравийской плиты характеризуются отсутствием метаморфизма и вулканической деятельности. Месопотамская низменность и плато Джезира формируют основные части Месопотамского прогиба в Ираке. Данный прогиб имеет довольное простое тектоническое строение и образован четвертичными аллювиальными отложениями рек Тигр и Евфрат и их притоков, которые полностью покрывают центральную и юго-восточную части бассейна. Окруженное породами миоцена, плато Джезира выступает продолжением Месопотамской низменности на северо-запад [15]. В целом Месопотамский бассейн отличается плоским рельефом. Поверхностные структуры, возникшие в результате тектонической активности, в этом бассейне немногочисленны и включают несколько структур – разломы, складки и диапировые структуры [16].

Стратиграфическая колонка южного Ирака [17, 18] характеризуется толстой осадочной секвенцией мелового периода со значительными запасами углеводородов во многих формациях [19] (рис. 1, *а*).



а *б*

Рис. 1. Расположение исследуемых скважин и даты их бурения – *а*; стратиграфическая колонка южной части Ирака – *б* [17, 18]: Thrust Zone – зона надвига; Folded Zone – зона складчатости; Mesopotamian Basin – Месопотамский бассейн; Rutbah-Jezira Zone – Зона Рутба-Джезира; Turkey – Турция; Syria – Сирия; Iran – Иран; Iraq – Ирак; Saudi Arabia – Саудовская Аравия; Kuwait – Кувейт

1.1. Месторождение Меджнун

Месторождение Меджнун – это гребневидная антиклиналь в форме банана, простирающаяся в направлении с севера на юг [20]. Оно представляет собой складку сжатия с вероятным залеганием солевых отложений под пластом ниже уровня юрского периода. Месторождение составлено четырьмя основными и семью второстепенными коллекторами нижнемеловой/палеоценовой эпохи, охватывающими вертикальный интервал ок. 3000 м [21]. Четыре основных коллектора в порядке от поверхности вглубь: формации Харта, Мишриф-Ахмеди, Нахр-Умер и Зубейр. Самый глубокий – это карбонатный пласт высокого давления Ямама. На их долю приходится 80 % запасов углеводородов Меджнуна. Только на формации Ямама и Мишриф приходится 50% объема основных коллекторов. Из второстепенных коллекторов продуктивными могут быть формации Хасиб, Сади, Танума, Гар, Шираниш и Шуайба [22] (см. рис. 1, *а*).

1.2. Месторождение Румейла

Месторождение Румейла представляет собой супергигантское нефтяное месторождение, расположенное в 50 км к западу от города Басра в южной части Ирака [23]. Оно характеризуется многопластовыми залежами в многочисленных обломочных и карбонатных формациях. Месторождение Румейла было открыто в 1953 г., и на его долю приходится 33 % от общего объема добычи нефти в Ираке. Структурно месторождение представляет собой слабонаклонную продольную антиклиналь, простирающуюся примерно на 83 км в длину и 12 км в ширину [24]. Два разлома, Такадид-Курна и Аль-Батин, протянулись с северо-востока на юго-запад. Это реактивированные докембрийские поперечные сбросы, определяющие блок сбросов Зубейр или подзону Месопотамского бассейна [25] (см. рис. 1, *а*).

Наиболее значительной углеводородной системой в этой стратиграфической колонке является раннемеловая-миоценовая нефтегазоносная система. Нефтематеринскими породами в ней служат формации Сулайи и Ямама, флюидоупорами – формации Танума, Шираниш и Рус, а коллекторными породами – формации Ямама, Зубейр, Нахр-Умер и Мишриф [26] (рис. 1, *б*).

1.3. Месторождение Западная Курна (1 и 2)

Супергигантские нефтяные месторождения Ирака расположены в основном в южной части страны, и Западная Курна – одно из них [27, 28]. Оно расположено к северо-западу от города Басра, в подзоне Зубейр, и с точки зрения структуры представляет собой часть крупной ориентированной на север изоклинали. Извлекаемые запасы месторождения оцениваются на уровне примерно 30–40 млрд баррелей [29]. Нефтяное месторождение Западная Курна является северным продолжением супергигантского месторождения Румейла [30] (см. рис. 1, *а*).

1.4. Месторождение Зубейр

Месторождение Зубейр расположено в Месопотамской зоне, на нестабильном горизонте Аравийской платформы [31]. Зубейр – одно из нефтяных месторождений поздней стадии разработки в южной части Ирака, находящееся в 20 км к юго-западу от города Басра [32] (см. рис. 1, *а*).

Это месторождение было открыто в 1949 г. и состоит из четырех куполов (Аль-Хамар, Шуайба, Рафидья на северо-западе и Сафван к юго-востоку), соединенных водоносной формацией, простирающейся за пределы границ Ирака и Кувейта [33]. Структура месторождения включает четыре коллектора: Мишриф, Верхний сланцевый слой, а также Третий и Четвертый продуктивные пласты [34].

1.5. Продуктивные формации

Ввиду выраженного несогласного залегания пластов формации Мишриф разделена на две крупные регрессивные секвенции, особенно четко различимые на востоке Месопотамского бассейна. В обеих секвенциях присутствуют многочисленные коллекторы. На западе бассейна преобладает нижняя секвенция с относительно небольшим количеством нефтеносных горизонтов. На востоке обнаруживаются мелководные коллекторы большой толщины, свидетельствующие об относительно высокой скорости оседания во время сеномана [35]. В западной части бассейна скорость оседания была ниже, что привело к образованию более тонких и ограниченных коллекторов.

Наилучшие условия для формирования коллекторов в формации Мишриф наблюдаются в рудистоносных фациях, таких как рудстоуны и рудистидовые пакстоуны/грейнстоуны [27] (рис. 2, *а*).

Формация Мауддуд представляет собой залежи мелководного карбоната, широко распространенного в глубинных пластах Персидского залива. Она прослеживается в северной части залива (Ирак и Кувейт), в восточной части Аравийского полуострова (Саудовская Аравия, Бахрейн) и в южной части залива (Объединенные Арабские Эмираты и Оман) [36]. В южной части Ирака формация была описана на основе скважины Зубейр-3 исследователями Owen и Nasr (1958) (рис. 2, *б*). Формация Мауддуд сложена органическими, детритовыми и иногда псевдоолитовыми известняками с прожилками зеленого или синеватого сланца [37].

Формация Зубейр, датируемая раннемеловым периодом (период готерив-ранний апт), представляет собой обширную региональную секвенцию нефтеносных песчаников, обнаруживаемую в Сирии, Ираке и Иране [38]. Песчаники Зубейра экологически и генетически схожи с песчаниками Нахр-Умера в месторождениях Кувейта и сложены чистыми, хорошо отсортированными кварцевыми аренитами, принесенными с Аравийского щита и отложившимися с запада на восток в Месопотамском бассейне в раннемеловой период. Песчаные отложения Зубейра являются следствием многочисленных циклов осадконакопления и состоят из обмеляющихся вверх последовательностей темно-серого сланца, алевролита и мел-

ко- и среднезернистого песчаника [39] (рис. 2, *в*). Эти циклы трактуются как серия морских трансгрессий и регрессий в ходе более длительной трансгрессии. Типичные литофации в рамках этих циклов включают морской шельф, продельту, переднюю часть дельты и равнинную дельту [40]. Литостратиграфически формация подразделяется на пять пачек:

1. **верхняя сланцевая пачка**: содержит изолированные массивные (толщиной 10–15 м) нефтеносные песчаники. Пачку разрабатывают в нескольких скважинах (например, Zb–X7);
2. **верхняя песчаниковая пачка** (**Третий продуктивный пласт**): состоит из слоистых многопластовых песков, насыщенных нефтью с плотностью 32° API. Разработка этой пачки ведется примерно в 80 скважинах;
3. **средняя сланцевая пачка;**
4. **нижняя песчаниковая пачка** (**Четвертый продуктивный пласт**): сложена многопластовыми песками, насыщенными нефтью с плотностью 38° API. Разработка пачки ведется в восьми скважинах;
5. **нижняя сланцевая пачка**.

Каждый коллектор изолирован промежуточными сланцевыми участками. Механизм проходки в основном заключается в расширении газа со слабым или умеренным вытеснением нефти нагнетаемой водой [41].

Формация Ямама представляет собой основной карбонатный коллектор нижнемелового периода в южной части Ирака, относящийся к позднему берриасско-аптскому циклу. От берега вглубь бассейна она образована формациями Зубейр, Ратави, Ямама, Шуйаба и Сулайи [42]. Формация Ратави, как правило, залегает поверх пласта Ямама. На юго-востоке Ирака, на месторождениях Насирия, Западная Курна и Меджнун, вероятные границы секвенций определяются в формации Ямама в кровле оолитовой фации. В южной части Ирака формация Ямама проявляется наличием известняка под последним сланцевым пропластком в основании формации Ратави [43]. Формация Ямама является одним из наиболее важных нефтеносных коллекторов в южной части Месопотамской зоны (месторождения Западная Курна, Северная Румейла и Меджнун) и простирается

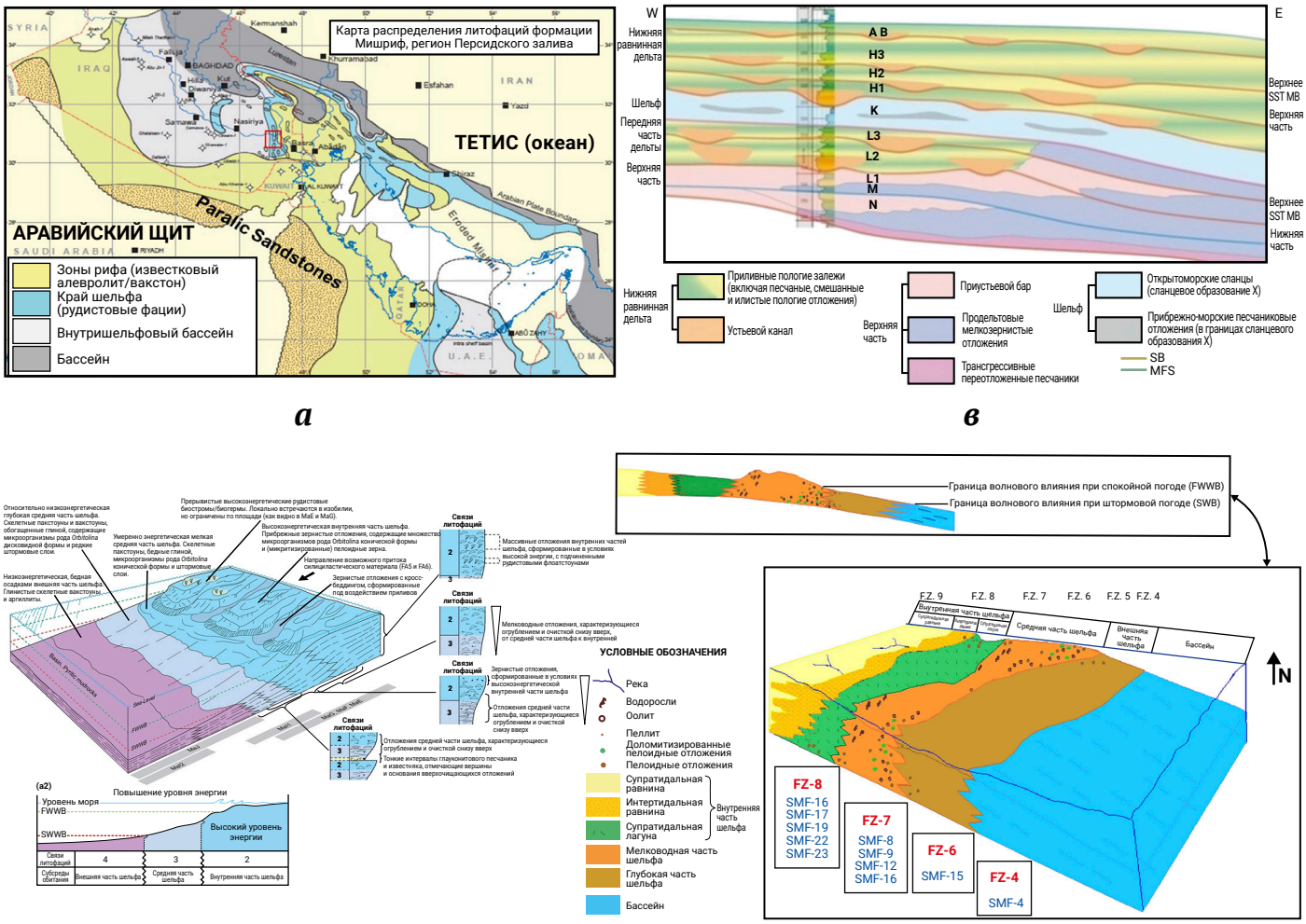


Рис. 2. Распределение литофаций формации Мишриф в регионе Персидского залива – *а* [44]; модель осадконакопления для формации Мауддуд – *б* [37]; для формации Зубейр – *в* [ZFOD, (Zubair Field Operating Division). Sedimentological and Reservoir Quality Study of the Zubair Formation. 2014. (Unpublished Study)]; для формации Ямама – *г* [45]

от валанжинского до раннего теривского яруса в пределах основного ретрогрессивного цикла осадконакопления (берриасско-аптский период) на юге Ирака [42] (рис. 2, *г*).

2. Исторический обзор буровых работ

Проблемы, возникающие при бурении в формациях на юге Ирака, в обобщенном виде представлены на рис. 3 на основе адаптированного предыдущего исследования соответствующей тематики [13]. Потери следует ожидать в основании формации Даммам, а также в формациях Хата, Мишриф и Зубейр. Значительная эрозия наблюдается в формации Танума. Изменчивость архитектуры формации Мишриф и разнообразие типов пород могут привести к неравномерному размыву и обводнению скважины. Области опускания представлены формациями Танума, Нахр-Умер и Верхние сланцы. В формациях Мишриф, Нахр-Умер и Зубейр присутствует риск прихвата труб. Поломка долота при бурении через цельные пласты ангидрита в формациях Нижний Фарс и Рус также представляет опасность, однако не настолько значительную, чтобы повлиять на план бурения. Больше всего проблем с бурением отмечалось в формации Даммам – 56,4% от всех пробуренных скважин (обрушение и потери бурового раствора), в то время как в формациях Дибдибба, Хасиб, Румейла, Ахмеди, Мауддуд и Шуайба серьезных проблем не зарегистрировано [46].

3. Методология

Скважины, анализируемые в рамках настоящего исследования, подразделяются на семь групп в зависимости от сроков бурения. На рис. 4 показаны расположение исследуемых скважин и сроки бурения.

В исследовании использовались данные по 10, 8, 12 и 6 скважинам на месторождениях Меджнун, Румейла, Западная Курна (1 и 2) и Зубейр соответственно. Кроме того, были получены данные из периферийных скважин на этих месторождениях (см. рис. 1, *а*).

3.1. Производительность долот

Выбор оптимальной техники бурения зависит от условий и оборудования, поэтому для достижения наилучших результатов может потребоваться внесение изменений в рекомендации по бурению. Влияние таких изменений на скорость бурения необходимо тщательно проанализировать, особенно если эти изменения не приводят к непосредственному увеличению скорости бурения.

	Образование каверн	Обрушивающийся пласт	Поломка долота	Прихват трубы	Потеря бурового раствора	Размыв	Приток воды при H25	Сужение ствола скважины	Затруднения при проработке ствола скважины снизу вверх	Приток воды при нагнетании	Схема разбивки работ
Дибдибба											
Н. Фарс											
Гар											
Даммам											
Рус											
Умм-эр-Радхума											
Тайярат											
Шираниш											
Харта											
Сади											
Танума											
Хасиб											
Мишриф											
Румейла											
Ахмеди											
Мауддуд											
Нахр-Умер											
Шуайба											
Зубейр											
Ямама					Закупорка бурильной колонны буровым шламом						

Условное обозначение	% проблем	Анализ		Условное обозначение	% проблем	Анализ
	0 %	Отлично			1–10 %	Очень хорошо
	11–20 %	Хорошо			21–30 %	Приемлемо
	31–40 %	Средне			41–50 %	Заметно
	51–60 %	Высокий уровень			Свыше 60 %	Серьезно

Рис. 3. Анализ проблем бурения для каждой формации месторождения Румейла [13]

3.1.1. На месторождении Румейла

В период с 2011 по 2013 г. 22 долота в конструктивном исполнении MSi616L испытывались с различными типами приводов в 24 скважинах месторождения Румейла. После этого с их помощью была выполнена проходка в скважине R-X33 в рамках экспериментальных испытаний для достижения оптимальной производительности.

3.1.2. На месторождении Меджнун

В период с 2012 по 2016 гг. 16-дюймовое долото в конструктивном исполнении SFD75D использовалось в 25 наклонно-направленных скважинах, начиная с MJ-X2. То же долото вновь тестировалось в скважинах MJ-X4 и MJ-X5, в то время как долото типа SFD76C апробировалось в скважине MJ-X7.

3.1.3. На месторождении Зубейр

Четыре новых типа долот испытывались с различными приводами в 18 скважинах месторождения Зубейр в период с 2012 по 2014 г. с целью повышения производительности за счет опыта, накопленного на предыдущих месторождениях (табл. 1).

3.1.4. На месторождении Западная Курна 1 и 2

В период с 2015 по 2018 г. на месторождении Западная Курна было пробурено несколько скважин с различными траекториями ствола, включая *S*-образные, *J*-образные и горизонтальные скважины. В формациях Даммам, Рус, Умм-Эр-Радхума, Тайярат, Шираниш, Харта и Сади использовалось долото типа SFE66DH диаметром 12¼ дюйма с ROP 15,81 м/ч.

Таблица 1

Типы долот, используемых на месторождении Зубейр

Размер	Тип	Новое или б/у	Насадки
26 дюймов	VE598	б/у	–
26 дюймов	CKL	Новое	–
16 дюймов	VGA-T318	Новое	–
8½ дюйма	HC506ZX	Новое	Без насадок
8½ дюйма	RC216	Новое	Без насадок
12¼ дюйма	GT-1	б/у	Без насадок
12¼ дюйма	Q506FX	б/у	6 x 13/32

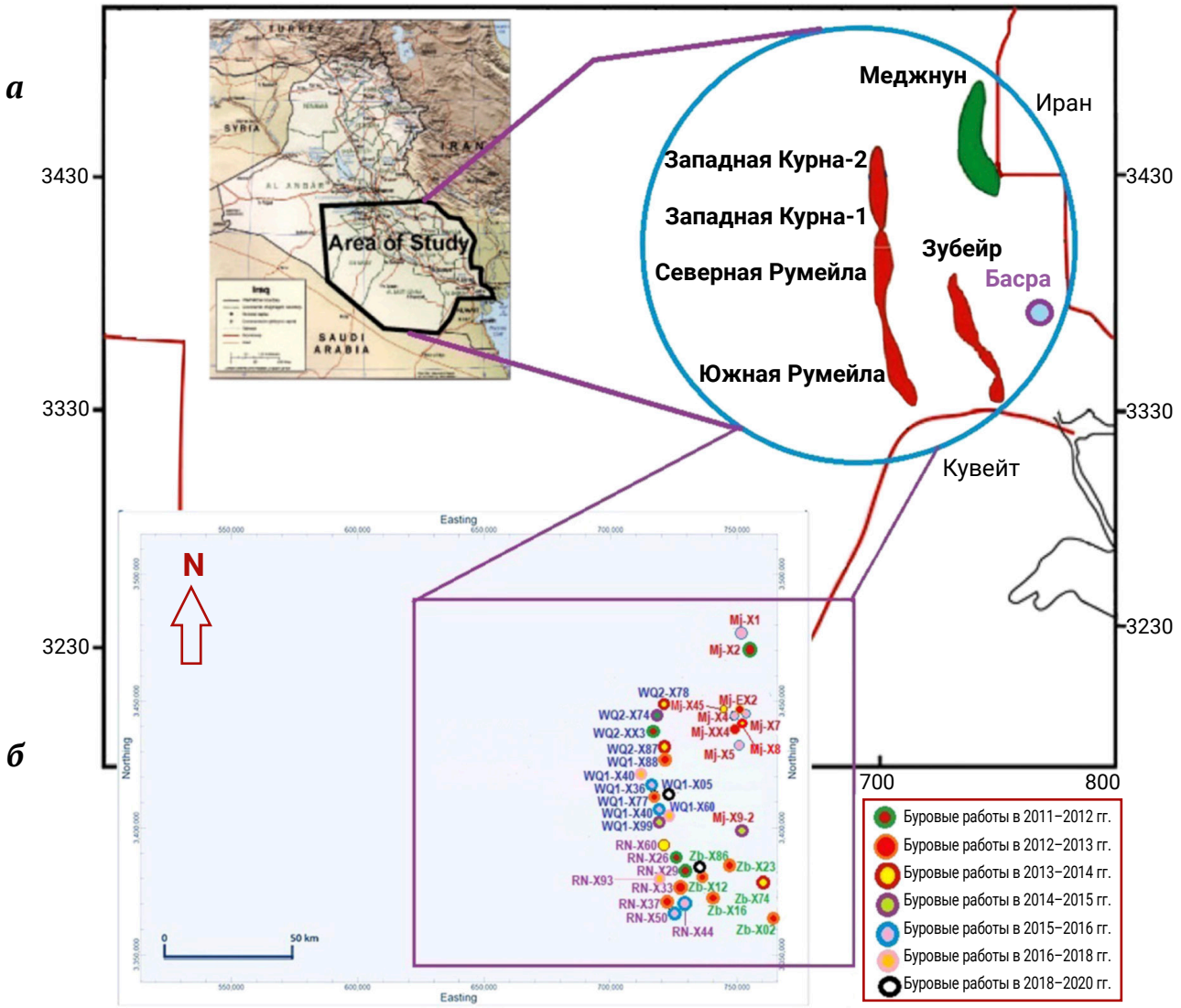


Рис. 4. Классификация скважин по срокам бурения и местоположению в Месопотамском бассейне

Скорость бурения 15,8 считается вторым лучшим показателем ROP, достигнутым по всем горизонтальным скважинам на этом месторождении. План наклонно-направленного бурения для 12¼-дюймового профиля предусматривал сохранение угла наклона на уровне 12–15° с последующим увеличением до 20° и поддержанием на уровне 20–22°.

Долото типа MME65R использовалось для бурения 8 ½-дюймового профиля из-за потерь, возникших в формации Мишриф. С помощью того же самого долота проводились работы по выбуриванию цементного моста сквозь эту формацию.

3.2. Потери циркуляции

Потери циркуляции – это распространенная проблема, возникающая при выполнении работ по бурению и цементированию. В зависимости от поглощения бурового раствора и времени нахождения буровой установки на скважине она может расцениваться и как несущественное происшествие, и как серьезный, опасный и высокозатратный инцидент. Для решения проблемы потерь циркуляции был внедрен целый ряд передовых технологий. На рис. 5 показана конструкция скважины различных типов для различных продуктивных зон.

3.2.1. В непродуктивных формациях

Потенциальные потери в формациях Даммам, Рус и Харта представляют главную сложность в процессе бурения. Для минимизации потерь в этих формациях было принято решение контролировать показатели ROP или POOH. План бурения скважин в этих формациях предусматривает использование 12¼-дюймовой BHA без стабилизаторов с большими насадками и нагнетание цементного моста на равновесии через долото.

3.3. Прочие проблемы

1. Существует риск присутствия серной воды в формациях Умм-Эр-Радхума и Тайярат.

2. Возможный выброс H_2S при бурении песчаной формации Нахр-Умер представляет серьезную опасность для здоровья людей и окружающей среды.

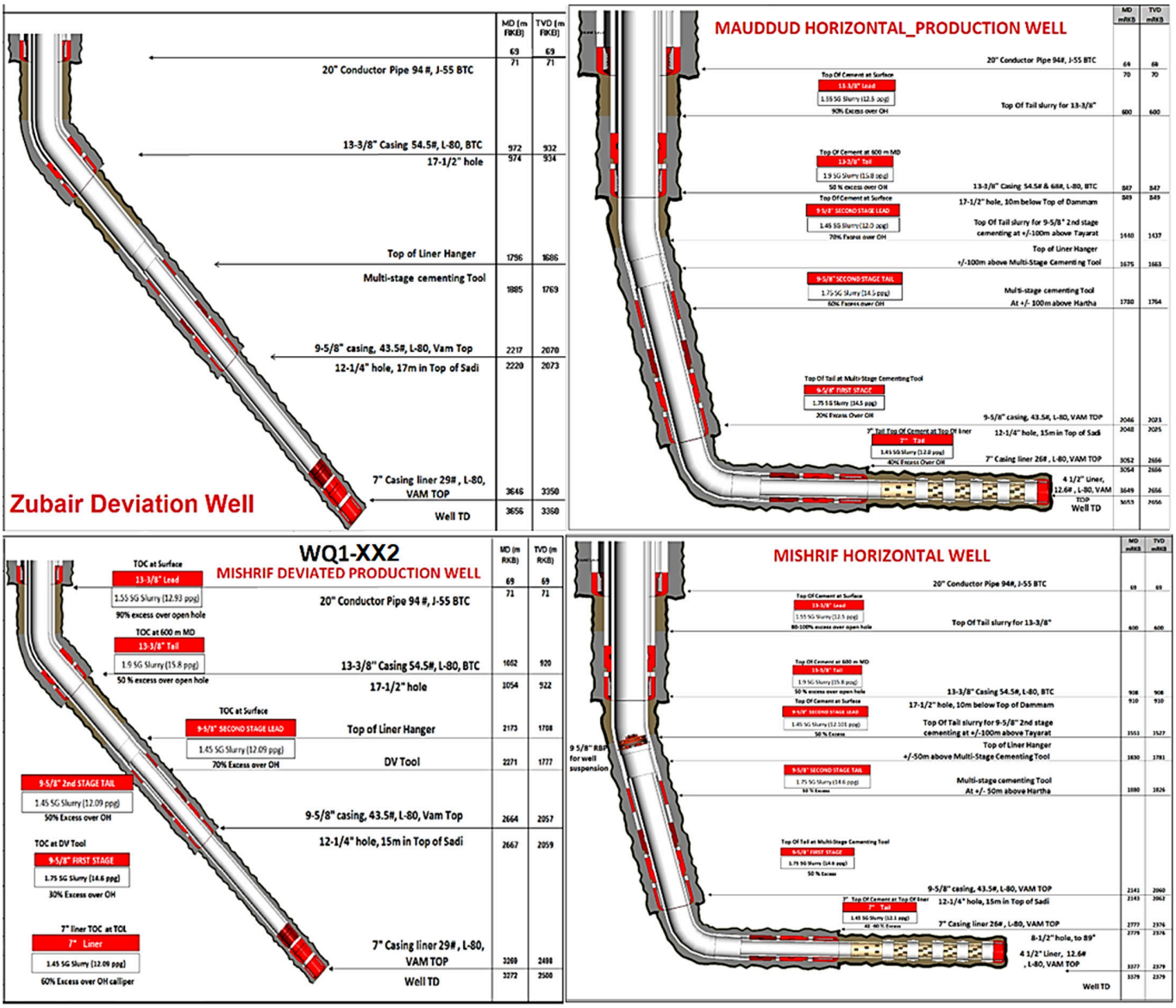


Рис. 5. Схемы проходки скважин от Powerdraw™ [46]

3. В формации Нахр-Умер могут наблюдаться проблемы с нестабильностью ствола.

4. Мишриф – это истощенный коллектор, для которого типичны потери бурового раствора и прихват труб при отсутствии надлежащего укрепления с помощью моста.

5. Набухающие сланцы в формации Нахр-Умер приводят к сверхнатягу и обрушению с риском образования каверн, что может спровоцировать прихват труб.

6. Нестабильность сланцев и образование каверн наблюдаются в зонах сланцевых слоев формации Зубейр.

7. Изменчивость архитектуры коллектора и разнообразие типов пород в формациях Мишриф, Мауддуд, Зубейр и Ямама могут привести к неравномерному охвату и обводнению при наличии слоев с более высокой проницаемостью.

4. Результаты

4.1. Производительность долота

4.1.1. Месторождение Румейла

Двадцать два долота в конструктивном исполнении MSi616L испытывались с различными типами приводов в 24 скважинах месторождения Румейла, после чего с их помощью была выполнена проходка в скважине R-X33. Сводные данные о производительности долота типа MSi616L приведены ниже (рис. 6).

Согласно полученным данным по 12¼-дюймовым долотам типа MSi616L для периферийных скважин среднее расстояние бурения составляет 1000 м на долото, а средняя ROP – 13 м/ч за рейс (см. рис. 6).

Из рис. 7 видно, что большая часть вооружения этого долота позеленела. Имеются две сломанные шарошки, одна на внешней конусной части лопасти № 1, а другая – на торце лопасти № 6.

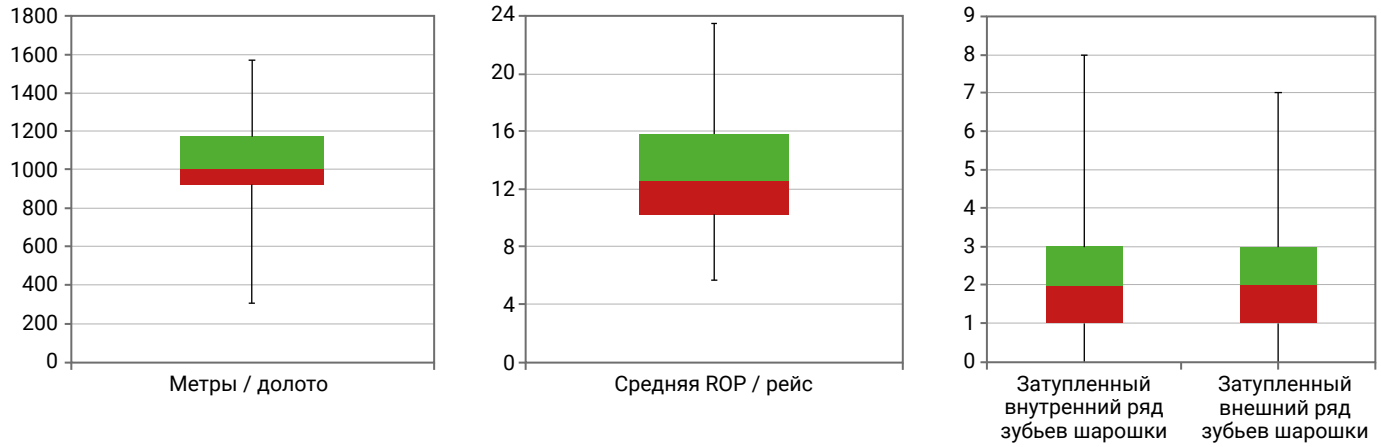


Рис. 6. Производительность долот типа MSi616L на месторождении Румейла

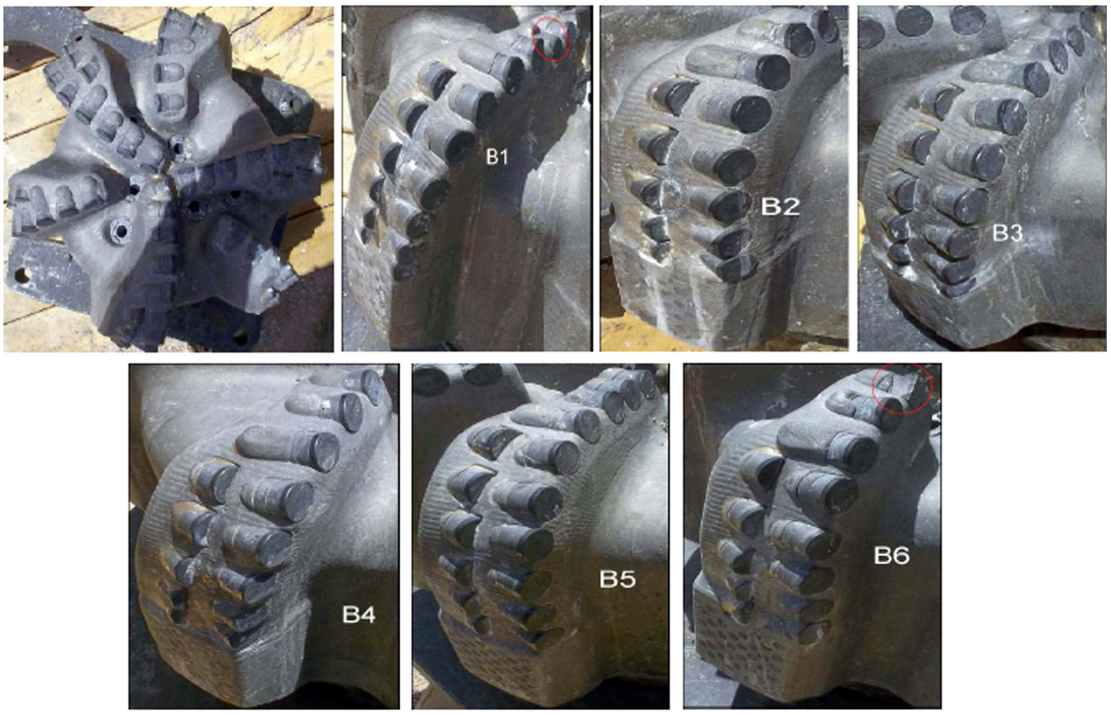


Рис. 7. 12¼-дюймовые долота MSi616LPX (JF4376) из скважин, изученных на месторождении Румейла

На рис. 8 приведено сравнение параметров бурения долотами MSi616L и QD506FX в формации Шираниш (1642–1835 м) в скважине R-X33 на месторождении Румейла. Согласно данным по использованию 12¼-дюймового долота MSi616L в периферийных скважинах среднее расстояние бурения составляет 1000 м на долото, а средняя ROP – 13 м/ч за рейс. Таким образом, 12¼-дюймовое долото в конструктивном исполнении MSi616L отлично зарекомендовало себя при использовании на месторождении Румейла.

4.1.2. Месторождение Меджнун

После работы в скважине MJ-X2 16-дюймовое долото SFD75D было использовано аналогичным образом для бурения в общей сложности 1822 м в скважинах MJ-X4 и MJ-X5. Показатель ROP в этих скважинах составил в среднем 27 м/ч. Долото режущего типа оснащено 7 лопастями с 19-миллиметровыми шарошками. На рис. 9 приведен сравнительный анализ различных видов долот, использовавшихся на месторождении Меджнун.

В скважине MJ-X3, в которой был достигнут наиболее высокий показатель ROP – 16,7 м/ч – при меньшем количестве спусков, успешно использовалось 8½-дюймовое долото MMD65R на приводной компоновке. Система привода была заменена с POOH на RSS и для заканчивания профиля было применено 8½-дюймовое долото MME74H с ROP 16 м/ч (рис. 10).

Сравнение производительности долот различных типов (на примере месторождения Меджнун) показывает, что MMD65R, EQH16R и SF74R являются оптимальными долотами для бурения 16-дюймового профиля (рис. 11).

4.1.3. Месторождение Западная Курна 1 и 2

На пробуренных горизонтальных профилях месторождения зарегистрирована стабильная производительность в части ROP и состояния долота. Наиболее высокие для данного месторождения показатели – 27,3 м/ч – были достигнуты в скважине WQ1-X54, где с помощью долота MMD64DR (6 лопастей, размер шарошек 13 мм) был пробурен 601 м. Долото MMD54 (5 лопастей, размер шарошек 13 мм) также показало отличную производительность, выйдя на максимальный для себя уровень ROP 26,9 м/ч в скважине WQ1-X55 при превосходном накопленном интервале по всему месторождению. В скважинах WQ1-X57, WQ1-X59 и WQ1-X60 (2-й рейс) с помощью долота MMD54 было пробурено в общей сложности 1340 м (рис. 12).

Из рисунка также следует, что в отношении ROP и состояния долота производительность долота в скважине WQ1-X38 формации Ямама была выше, чем в скважине WQ1-X63.

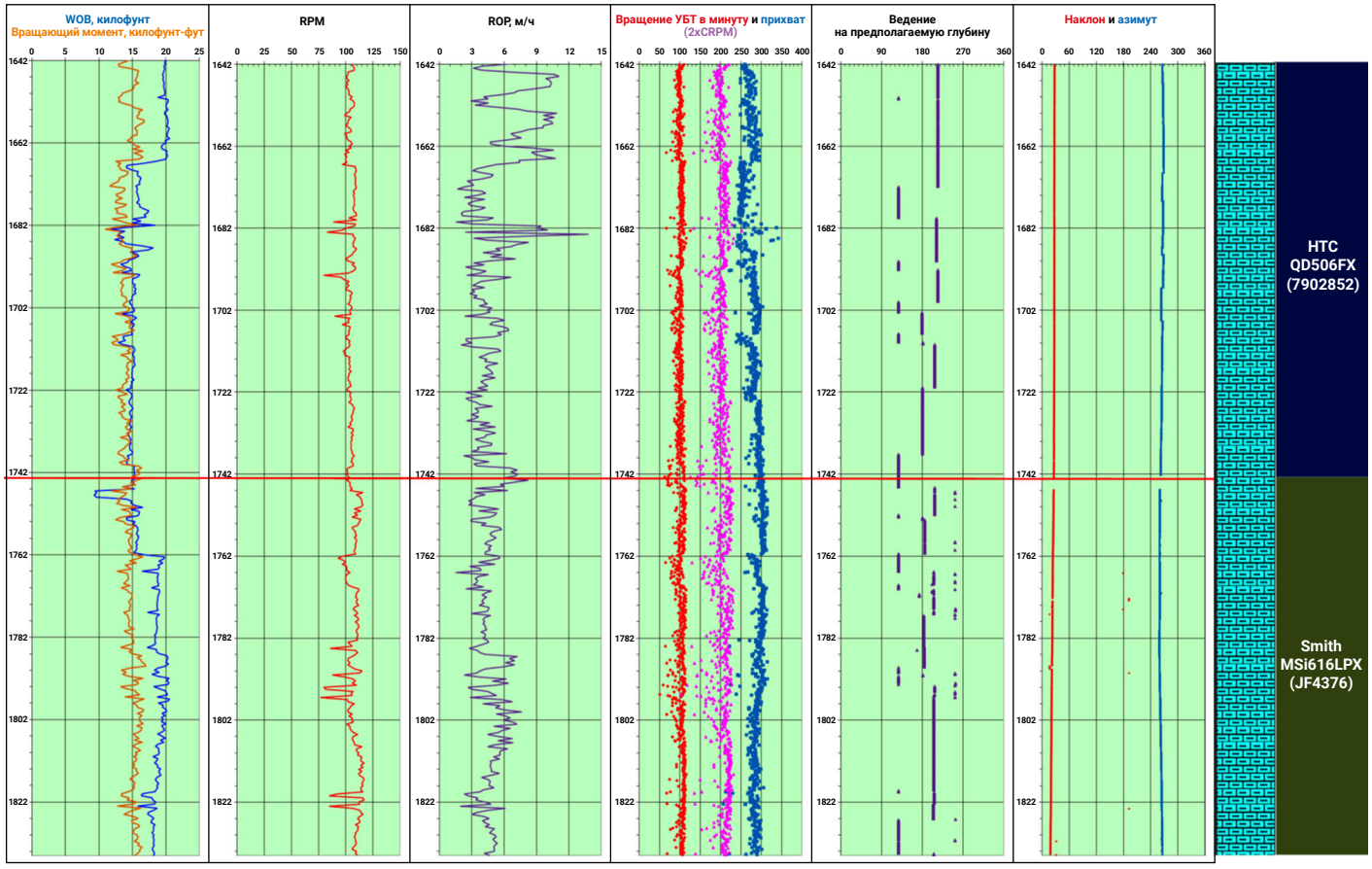


Рис. 8. Профиль бурения с помощью 12¼-дюймовых долот QD506FX и MSi616LPX в формации Шираниш (1642–1835 м) в скважине R-X33

4.1.4. Месторождение Зубейр

Данные о производительности долот в этом месторождении отсутствуют.

В некоторых скважинах, пробуренных до 2011 г. (R-XX3 и XX8), зафиксированы случаи прихвата-проскальзывания в течение двух рейсов PDC. Несмотря на различия в формациях, прочности продуктивного пласта, параметрах бурения и вооружении долота, существенных различий в уровнях прихвата-проскальзывания бурильной колонны (~2xCRPM во время обоих рейсов PDC) не наблюдалось. Колебания оборотов утяжеленной буровой трубы имели широкую амплитуду в формации Умм-эр-Радхума с уменьшением размаха в последующих формациях, при этом показатель прихвата-проскальзывания оставался неизменным (рис. 13). В исследуемых скважинах как на Румейле, так и на других месторождениях не отмечалось заметного прихвата-проскальзывания, что обусловлено характе-

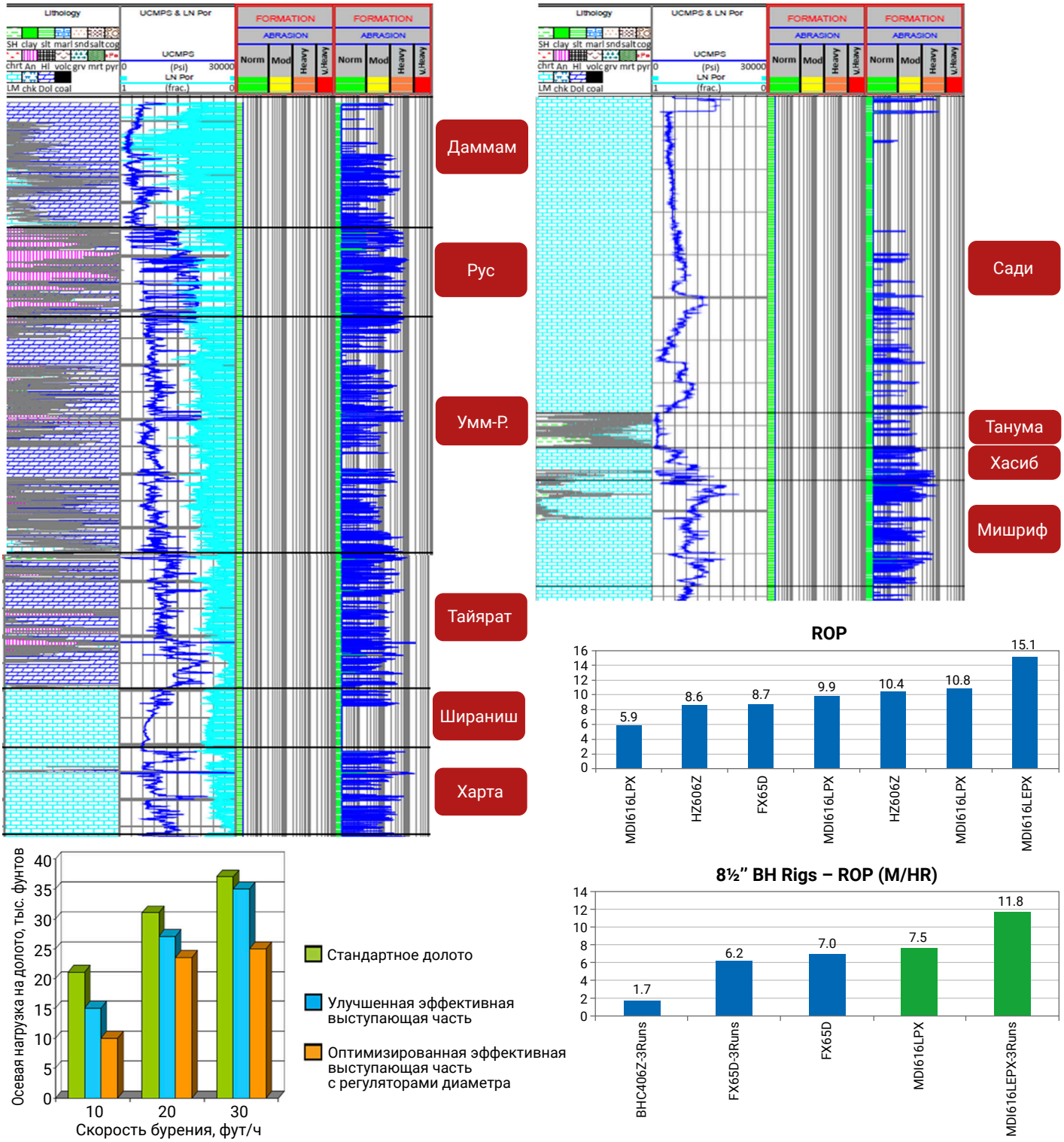
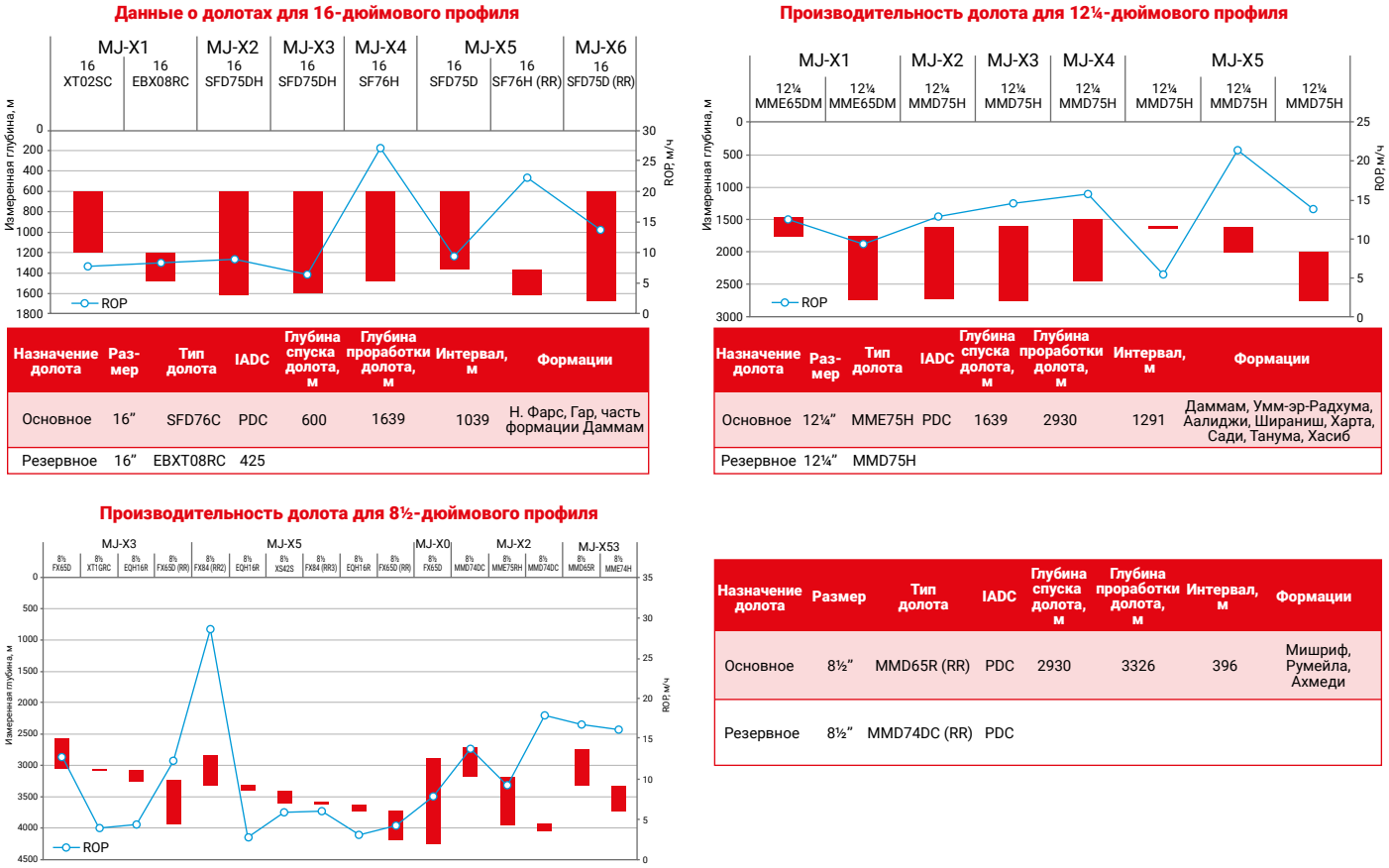


Рис. 9. Сравнение данных о производительности всех типов долот, использовавшихся на месторождении Меджнун

ристиками производительности долота MSi616LPX, на котором не было зарегистрировано сильных вибраций при работе с заданными параметрами бурения в соответствующих типах пород (рис. 14).

4.2. Потери циркуляции

В формациях Даммам и Рус имеется высокий риск значительных потерь в связи с уходом/поглощением бурового раствора. Для контроля потери циркуляции используются такие материалы, как FlexPlug, FlexPlug W, FlexPlug OBM и FlexPlug R, которые закачиваются через большинство BHA и вступают в реакцию с буровым раствором, образуя барьер на границе зоны в стволе скважины без проникания в скелетную породу или разлом. За счет этого данная методика наносит меньший вред потенциально продуктивным пластам.



Назначение долота	Раз-мер	Тип долота	IADC	Глубина спуска долота, м	Глубина проработки долота, м	Интервал, м	Формации
Основное	16″	SFD76C	PDC	600	1639	1039	Н. Фарс, Гар, часть формации Даммам
Резервное	16″	EBXT08RC	425				

Назначение долота	Раз-мер	Тип долота	IADC	Глубина спуска долота, м	Глубина проработки долота, м	Интервал, м	Формации
Основное	12¼″	MME75H	PDC	1639	2930	1291	Даммам, Умм-эр-Радхума, Аалиджи, Шираниш, Харта, Сади, Танума, Хасиб
Резервное	12¼″	MMD75H					

Назначение долота	Размер	Тип долота	IADC	Глубина спуска долота, м	Глубина проработки долота, м	Интервал, м	Формации
Основное	8½″	MMD65R (RR)	PDC	2930	3326	396	Мишриф, Румейла, Ахмеди
Резервное	8½″	MMD74DC (RR)	PDC				

Рис. 10. Производительность долот на месторождении Меджнун

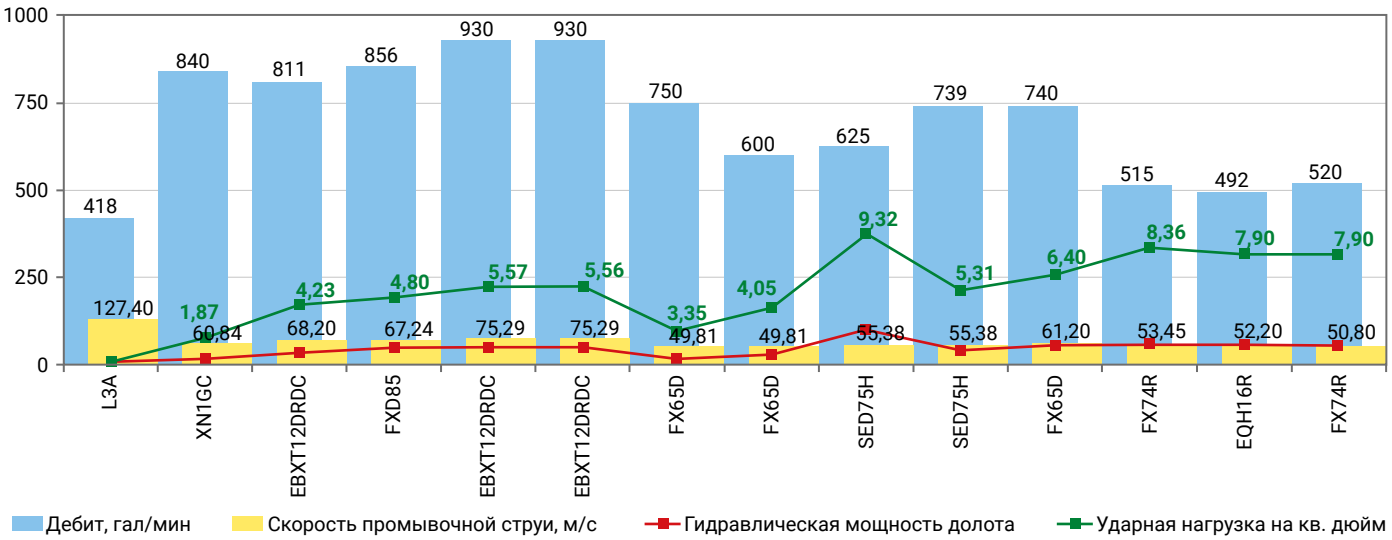


Рис. 11. Сравнение работы гидравлики 16-дюймовых долот, использовавшихся на месторождении Меджнун

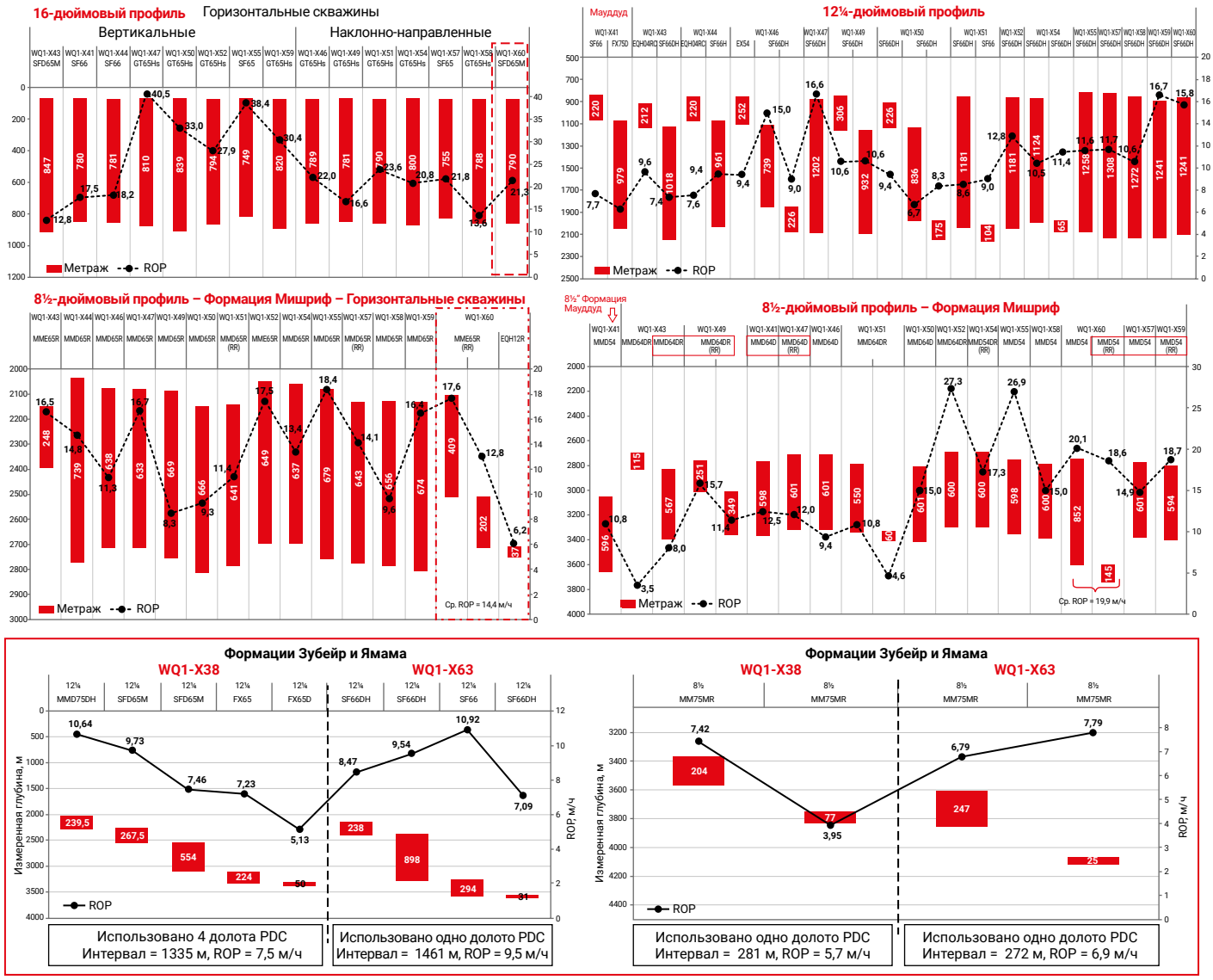
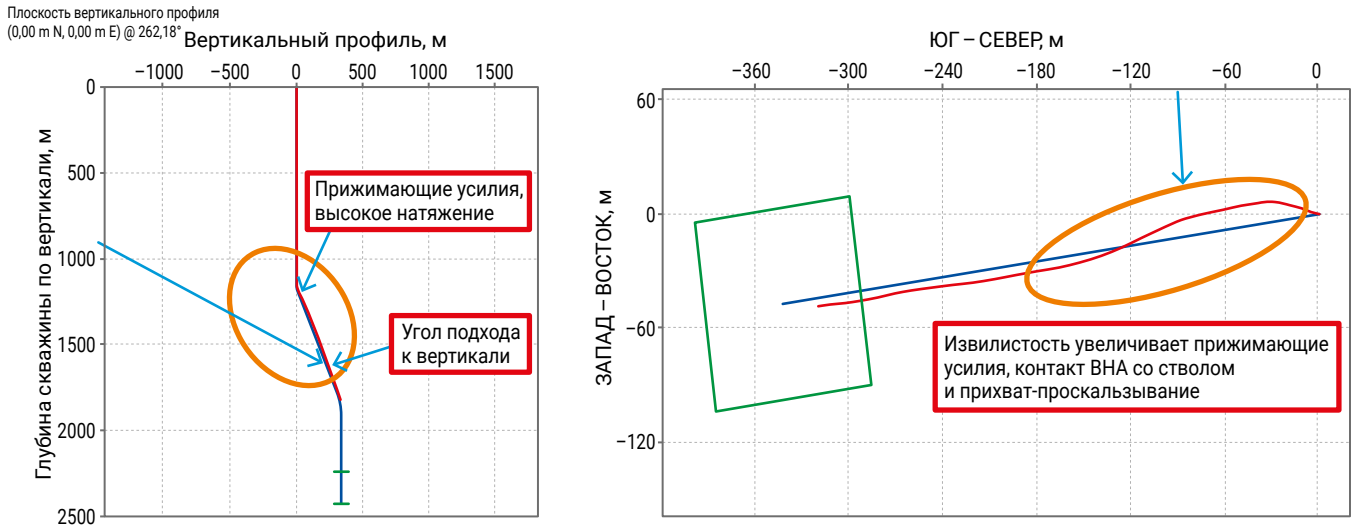


Рис. 12. Производительность долот по непродуктивным и продуктивным зонам (формации Мишриф, Мауддуд, Зубейр и Ямама) на месторождении Западная Курна



а *б*

Рис. 13. Извилистость – *а*; прижимающие усилия для скважины R-XX3 – *б*

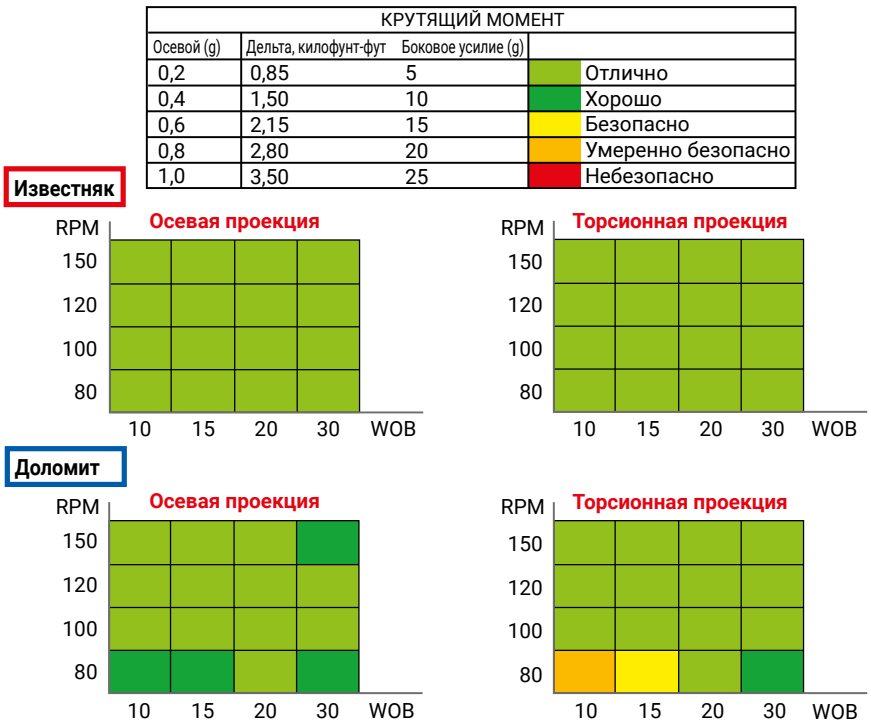


Рис. 14. Чувствительность осевого и крутящего моментов (RPM и WOB) для известняковых и доломитовых пластов на месторождении Румейла

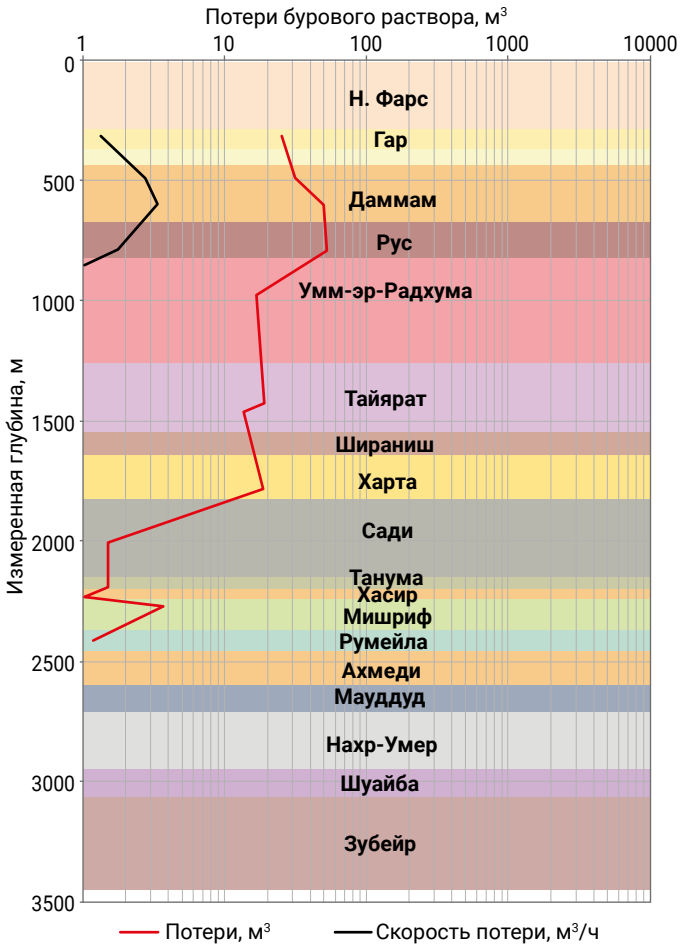


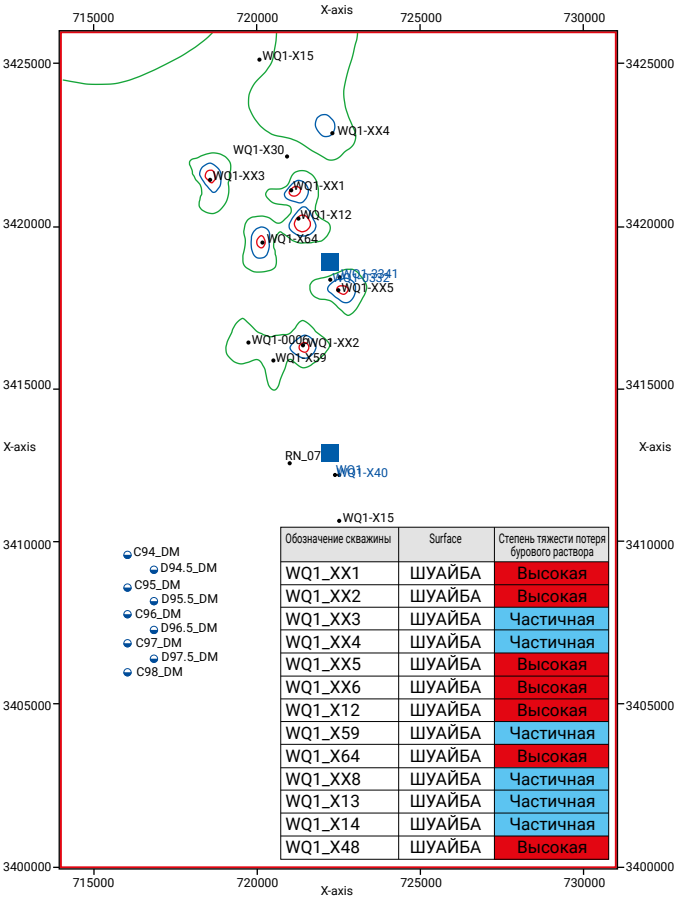
Рис. 15. Потери бурового раствора с поверхности в формацию Румейла

В плане смягчения последствий предусмотрено несколько вариантов: во-первых, если потери составляют 1–2 м³/ч, то ROP уменьшают до отметки ниже 10 м³/ч, после чего закачивают 10 м³ LCM (плотностью 45 фунтов/баррель). При превышении уровня потерь 2 м³/ч процесс бурения останавливают и опускают шарик для открывания циркуляционного переводника с последующим нагнетанием 10–20 м³ LCM (плотностью 85 фунтов/баррель). Кроме того, открывают межтрубное пространство вокруг долота. В случае тотальной потери циркуляционный переводник открывают и при отсутствии выступания бурового раствора закачивают 20 м³ LCM (плотностью 85 фунтов/баррель) (рис. 15).

По направлению вглубь от формации Мишриф в другой непродуктивной формации – Шуайба – также обнаруживаются потери бурового раствора. На рис. 16 показаны области потери бурового раствора, где красным контуром обозначена область высокой потери, а черным – частичной. Зеленым контуром произвольно обозначены области, в которых не было зафиксировано поглощения бурового раствора. Следует отметить, что указанные значения заимствованы из практических бурильных данных и могут изменяться в сторону как увеличения, так и уменьшения в зависимости от условий.

4.3. Подходы к решению прочих проблем

Во избежание заколонных перетоков и возможного сообщения между нижними водоносными зонами и приповерхностными областями потерь на этапе эксплуатации скважин формации Мишриф, Мауддуд, Зубейр и Ямама необходимо изолировать от верхней части обсадной колонны.



Обозначение скважины	Surface	Степень тяжести потеря бурового раствора
WQ1_XX1	ШУАЙБА	Высокая
WQ1_XX2	ШУАЙБА	Высокая
WQ1_XX3	ШУАЙБА	Частичная
WQ1_XX4	ШУАЙБА	Частичная
WQ1_XX5	ШУАЙБА	Высокая
WQ1_XX6	ШУАЙБА	Высокая
WQ1_X12	ШУАЙБА	Высокая
WQ1_X59	ШУАЙБА	Частичная
WQ1_X64	ШУАЙБА	Высокая
WQ1_XX8	ШУАЙБА	Частичная
WQ1_X13	ШУАЙБА	Частичная
WQ1_X14	ШУАЙБА	Частичная
WQ1_X48	ШУАЙБА	Высокая

Рис. 16. Карта потерь бурового раствора для формации Шуайба в Западной Курне (1 и 2)

Перед бурением в песчаной формации Нахр-Умур следует откалибровать датчики H_2S и проверить их на исправность. 8½-дюймовую BHA не удалось спустить в скважину в формации Нахр-Умер, и для устранения препятствия потребовалась повторная проходка с использованием наклонно-направленной BHA. В скважинах формации Зубейр наблюдались проблемы с пульсацией/свабированием скважины, сопровождающиеся прониканием газа при наращивании, фонового и попутного газа, а также дифференциальным прихватом.

8½-дюймовый интервал в формации Зубейр планируется бурить с использованием системы промывки ингибирующим полимерным буровым раствором на основе хлористого калия (KCl)/частично гидролизованного полиакриламида (PHPA) для обеспечения устойчивости ствола скважины, стабилизации глинистых сланцев и качественной очистки ствола. При необходимости будет использован гликоль (в концентрации 3% при возникновении проблем со сланцами). $CaCO_3$ добавляется для увеличения плотности бурового раствора до требуемого значения 1,28 г/см³.

В формации Ямама наилучшие результаты показало долото PDC (MMD65R). Требуемые характеристики бурового раствора: MW 1,60-1,65 г/см³ (как указано в последних двух строках табл. 2). Необходимо добавить стабилизатор сланцев GEM™ GP и полимер на основе KCl (5% KCl) при расходе 1800–2300 л/мин и отрегулировать обороты в соответствии с рекомендациями DD.

Таблица 2

Данные о периферийных скважинах в формации Ямама и выбор MW на месторождении Западная Курна

Скважина	Формация	Глубина, м, по вертикали	Фактическое PP, г/см³	PP, psi	MW (низкая), г/см³	MW (высокая), г/см³	Превышение давления (малое), psi	Превышение давления (большое), psi
WQ1-X12 (старая скважина)	Ya – A	3515	1,47	7343	1,50	1,61	150	699
WQ1-X12	Ya – A	3566	1,44	7298	1,50	1,61	304	862
WQ1-X12	Ya – A	3593	1,43	7302	1,50	1,61	357	919
WQ1-X12	Ya – B	3620	1,39	7151	1,50	1,61	566	1132
WQ1-X12	Ya – B	3685	1,37	7175	1,50	1,61	681	1257
WQ1-X38 (2018)	Ya – A	3551	1,46	7368	1,50	1,61	202	757
WQ1-X38	Ya – B	3653	1,39	7216	1,50	1,61	571	1142
WQ1-X63	Ya – A	3836	~1,42	7741	1,55	1,65	709	1254
WQ1-X63 (2019)	Ya – B	3924	~1,42	7919	1,55	1,65	725	1283
WQ1-X63 (~WQ1-X12)	Ya – A	3836	1,47	8014	1,60	1,65	709	981
WQ1-463 (~WQ1-X12)	Ya – A	3836	1,44	7850	1,60	1,65	872	1145

5. Обсуждение

При стекании циркуляционного бурового раствора вниз по рабочей колонне над долотом следует установить шламометаллоуловитель. Насадки должны быть съемными с возможностью демонтажа с долота и любого оборудования внутри бурильной колонны. Кроме того, их размер должен обеспечивать прохождение шлама при реверсировании циркуляции во время бурения. Частоту вращения долота и осевую нагрузку на долото следует оптимизировать для разрушения металлических частей и восстановления параметров внедрения долота в породу. Остановка проходки в связи с «отслеживанием долота» может потребовать подъема долота с поверхности бурения. Краткосрочный контакт с долотом и приложение осевой нагрузки без прекращения вращения могут способствовать изменению схемы работы долота и восстановлению процесса внедрения.

Наиболее вероятное место возникновения потерь в формациях Нахр-Умер, Шуайба, Верхние сланцы, Средние пески и Средние сланцы, в том числе если они сопровождаются изменением крутящего момента или проскоком (включая падение долота), – это забой ствола. Однако потери во время спускоподъемных операций или при увеличении плотности бурового раствора происходят за пределами забоя. При возникновении потерь следует избегать прихвата труб, поскольку существует риск механического налипания на трубу оседающего вокруг BHA шлама, который оказывает уплотняющее действие, усугубляя потери под ним. Труба должна постоянно находиться в движении. Необходимо также учитывать вероятность дифференциального прихвата. В скважинах WQ1-X52 и последующих скважинах формации Мишриф, пробуренных в 2017–2018 гг., была использована передовая стратегия бурения, продемонстрировавшая более высокую эффективность по сравнению с ранее применяемыми техниками бурения скважин (в среднем 30,3 дня при NPT 4,4%). В окончательный план бурения внесены коррективы, указанные на рис. 17. В ходе буровых работ в формации Мауддуд не было зафиксировано ни одного случая спирального или синусоидального выпучивания (рис. 18). Максимальный крутящий момент на столе ротора (вращение в забое – 8300 фунт-сила-футов) оставался ниже крутящего момента свинчивания для 3½-дюймовой буровой трубы (рис. 19 и 20).

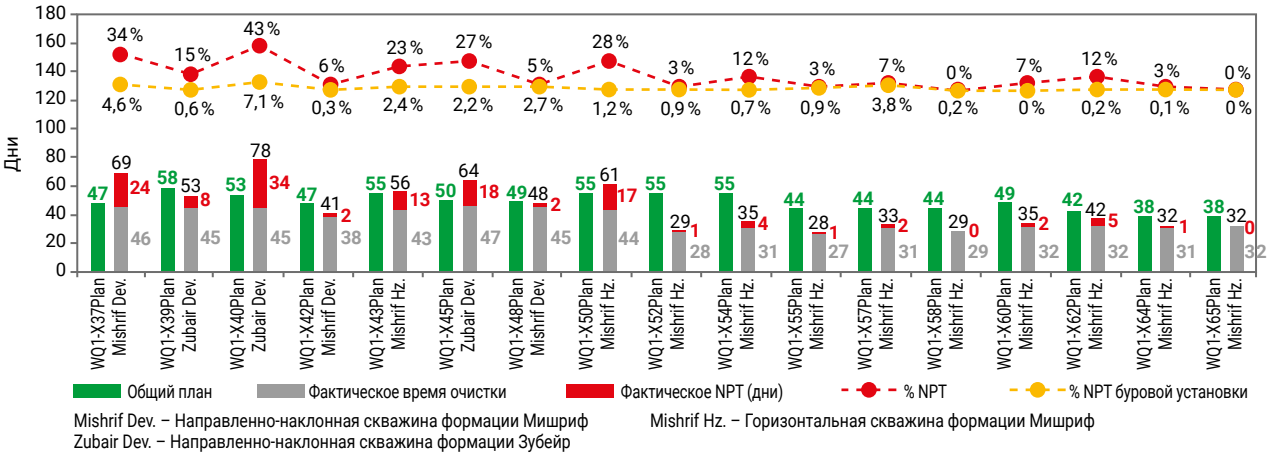


Рис. 17. Эксплуатационные характеристики скважины на месторождении Западная Курна 1 в период с 2017 по 2018 г.

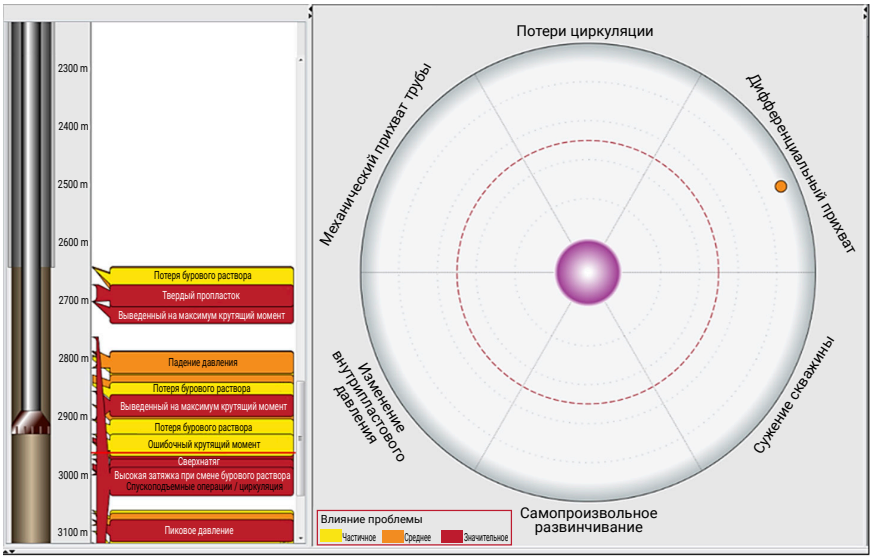


Рис. 18. Оптимизация бурения путем мониторинга проблем бурения в режиме реального времени в формациях Мишриф и Мауддуд

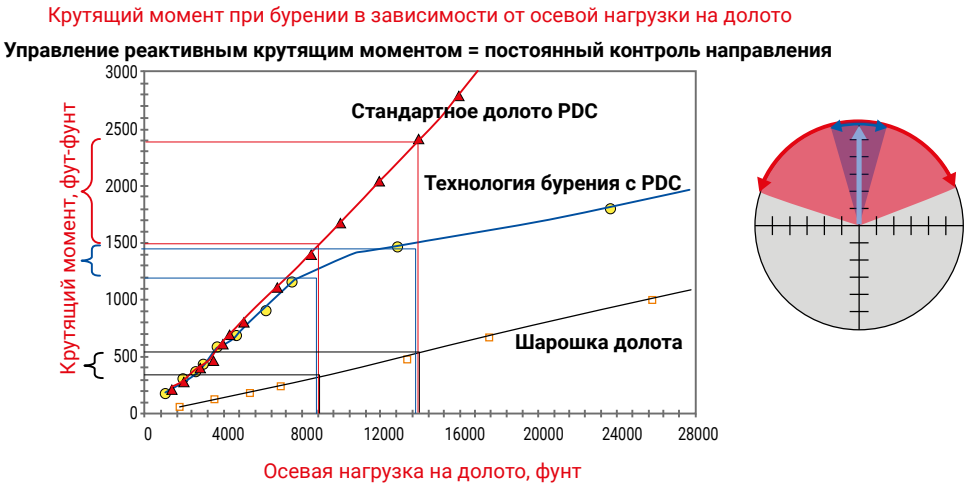
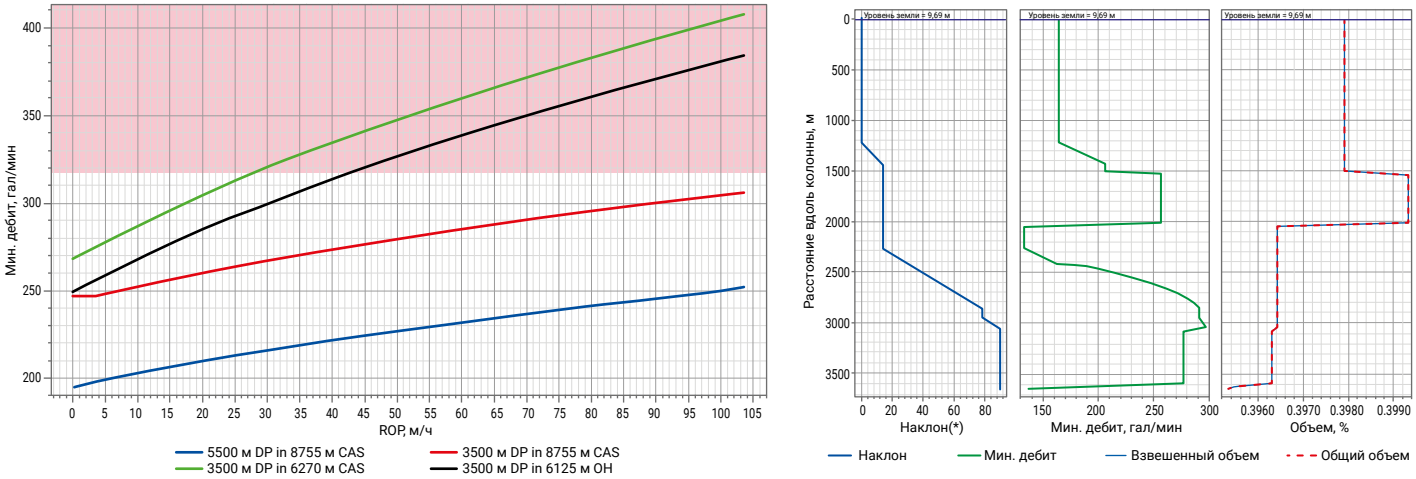


Рис. 19. Управление реактивным крутящим моментом в зависимости от осевой нагрузки на долото



а *б*

Рис. 20. Эффективность очистки скважины: минимальный дебит в сравнении с ROP – *а*; угол наклона, дебит и объем в % в формации Мауддуд на месторождении Западная Курна – *б*

Заключение

1. Для рассматриваемого профиля предпочтительным оказалось применение 16-дюймового долота SFD75D в наклонно-направленных скважинах. В контексте повышения производительности отлично проявили себя 16-дюймовые долота MMD65R, EQH16R и SF74R. Рекомендуется использовать долото MME65R PDC в качестве основного или резервного при предстоящем бурении горизонтальных скважин формации Мишриф в южной части Ирака. Долото в конструктивном исполнении MSi616L отлично показало себя при бурении 12¼-дюймовых профилей на юге Ирака, а долото типа EQH12DR использовалось при проведении недавних буровых работ по заканчиванию оставшихся участков 8½-дюймового профиля и успешно выдержало все нагрузки. При бурении горизонтальных профилей долото MMD54 (5 лопастей, размер шарошки 13 мм) продемонстрировало превосходные показатели производительности и накопленных интервалов, достигнув максимальной ROP (26,9 м/ч).

2. Изменения в плане предусматривают спуск 12¼-дюймовой ротационной BHA без стабилизаторов с большими насадками и нагнетание цементного моста на равновесии через долото для бурения до 2000 м. В случае потерь в формации Даммам будет закачан LCM, а при необходимости – цементный мост. Затем будут выполнены POOH и спуск бурильной трубы с открытым концом для установки цементного моста. Наконец, для бурения до проектной глубины будут выполнены POOH и спуск наклонно-направленной BHA. Перед внедрением в формацию Харта необходимо проверить ECD и оптимизировать MW. В целях сведения потерь к минимуму следует избегать большого превышения давления, а поглощению бурового раствора можно противодействовать с помощью LCM.

3. Несколько успешных случаев использования FlexPlug зарегистрированы на месторождениях в южной части Ирака, что позволило собрать ценный опыт по предотвращению серьезных потерь циркуляции.

4. После 10 м бурения под кровлей формации Сади требуется остановить процесс и проверить по-

тери перед продолжением буровых работ. Параметры PP/FG для нижнего интервала следует оптимизировать и обновить с учетом значений, использовавшихся для профиля кровли. Необходимо выполнить очистку скважины и проверить приток и РООН. Для бурения 12¼-дюймового профиля в формации Харта следует использовать наклонно-направленную BHA в роторном режиме с контролем параметров.

5. Необходимо отслеживать внезапные потери в формации Танума, при этом во избежание обрушения осыпающихся зон следует обеспечить постоянное наполнение ствола. Для укрепления существующих сланцевых пластов применение тампонирующего материала следует комбинировать с ингибированием глинистых сланцев.

6. Качественная очистка ствола в формации Мауддуд достигается при производительности 250–317 гал/мин в горизонтальном профиле при частоте вращения 40 об/мин, скорости оседания 10,2 фута/мин и пределе текучести 3,933 фунта/100 футов^2.

7. Рекомендуемые параметры перед началом бурения формации Нахр-Умер во избежание прихвата труб и осыпания ствола скважины: расход 2500–3500 л/мин, WOB 12–15 т, RPM 100–160 и MW 1,25 г/см^3.

8. Проблема потери бурового раствора актуальна для северной части месторождения Западная Курна 1 и южной части месторождения Западная Курна 2, при этом на юге речь идет о частичной потере в связи с поглощением бурового раствора в формации Шуайба.

9. В формациях Мишриф и Зубейр 7-дюймовую эксплуатационную обсадную колонну спускают и устанавливают с надлежащей изоляцией. Необходимо обеспечить перекрывание обсадной колонны для предотвращения возможного сообщения между нижними водоносными зонами и приповерхностными областями потерь на этапе эксплуатации скважин.

10. Плотность бурового раствора составляет 1,28 г/см^3 от кровли до подошвы формаций Зубейр и Мишриф, при этом скважины необходимо постоянно держать заполненными. Во избежание пульсации/свабирования скважины спускоподъемные операции надлежит выполнять с контролируемой скоростью. Во время перерывов в бурении необходимо регулярно проверять скважину на перелив и следить за выходом газа при наращивании, фонового и попутного газа. При бурении всех профилей формации Зубейр необходимо добавлять хлористый калий и поддерживать его концентрацию на уровне 3–5 % в соответствии с планом.

11. В формации Ямама наилучшие результаты показало долото PDC (MMD65R). Рекомендуемые параметры: MW 1,60–1,65 г/см^3, обязательное использование стабилизатора глинистых сланцев GEM™ GP/полимера KCl (5 % KCl), расход 1800–2300 л/мин, RPM в соответствии с указаниями DD. Рекомендуется использовать нейтрализатор H_2S.

12. Нагнетатели следует отключить до тех пор, пока стволы скважин в формациях Мишриф, Мауддуд, Зубейр и Ямама не будут закреплены трубами для предотвращения возможного притока.

13. Наибольшее число сложностей при бурении зафиксировано в формации Даммам, в то время как в формациях Дибдибба, Хасиб, Румейла, Ахмеди и Мауддуд значительных проблем не выявлено.

Список литературы / References

1. Алдамжаров Н.Н. Предупреждение аварий и осложнений при бурении разветвленно-горизонтальных стволов скважин. *Новости науки Казахстана*. 2017;(3):78–90. URL: https://vestnik.nauka.kz/storage/docs/2017/2017_NNK_%E2%84%963_End.pdf
Aldamzharov N. Prevention of accidents and complications during drilling of branched horizontal boreholes. *News of Science of Kazakhstan*. 2017;(3):78–90. (In Russ.) URL: https://vestnik.nauka.kz/storage/docs/2017/2017_NNK_%E2%84%963_End.pdf
2. Nazari T., Hareland G., Azar J. Review of cuttings transport in directional well drilling: systematic approach. In: *SPE Western Regional Meeting*. May 27–29, 2010, Anaheim, California, USA. https://doi.org/10.2118/132372-MS
3. Hashim J., Abdulkadir U., Alkali M., Kumar A. Basic drilling problems and optimization by general intensive knowledge. *International Journal for Advance Research and Development*. 2017;2(5):90–101. URL: https://www.ijarnd.com/manuscripts/v2i5/V2I5-1173.pdf
4. Salih A., Hussein H. Artificial intelligent models for detection and prediction of lost circulation events: a review. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering.* 2022;23(4):81–90. https://doi.org/10.31699/IJCPE.2022.4.10
5. Miranda C., Oliveira J., Cavalcante G. et al. Materials for controlling severe lost circulation-laboratory evaluation. In: *SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. May 17–19, 2017, Buenos Aires, Argentina. https://doi.org/10.2118/185582-MS
6. Caughron D., Renfrow D., Bruton J. et al. Unique crosslinking pill in tandem with fracture prediction model cures circulation losses in deepwater Gulf of Mexico. In: *IADC/SPE Drilling Conference*. February 26–28, 2002, Dallas, Texas. https://doi.org/10.2118/74518-MS
7. Toreifi H., Rostami H., Manshad A. New method for prediction and solving the problem of drilling fluid loss using modular neural network and particle swarm optimization algorithm. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2014;4:371–379. https://doi.org/10.1007/s13202-014-0102-5

8. Bloys B., Davis N., Smolen B. et al. Designing and managing drilling fluid. *Oilfield Review*. 1994;6(2):33–43.
9. Yarim G., Uchytil R., May R. et al. Stuck pipe prevention – a proactive solution to an old problem. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. November 11–14, 2007, Anaheim, California, USA. https://doi.org/10.2118/109914-MS
10. Muqeem M., Weekse A., Al-Hajji A. Stuck pipe best practices – a challenging approach to reducing stuck pipe costs. In: *SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition*. April 8–11, 2012, Al-Khobar, Saudi Arabia. https://doi.org/10.2118/160845-MS
11. Salminen K., Cheatham C., Smith M., Valiullin K. Stuck-pipe prediction by use of automated real-time modeling and data analysis. *SPE Drilling & Completion*. 2017;32(03):184–193. https://doi.org/10.2118/178888-PA
12. Saleh I., Khalaf A., Al-Jawad M. Southern Iraqi Oil fields drilling problems identification, analysis, and treatment. In: *Offshore Technology Conference Asia*. March 20–23, 2018, Kuala Lumpur, Malaysia. https://doi.org/10.4043/28597-MS
13. Al-Dujaili A.N., Sundos H. A Statistical survey for drilling problems at North Rumaila field, Southern Iraq. A review enhanced with well logs analyses. *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2023. (In press.)
14. Sissakian V. Geological evolution of the Iraqi Mesopotamia Foredeep, inner platform and near surroundings of the Arabian Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2013;72:152–163. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.09.032
15. Fouad S., Wafa'a A. Tectonic and structural evolution of Al-Jazira Area. *Iraqi Bulletin of Geology and Mining*. 2009;(3):33–48.
16. Fouad S. Tectonic and structural evolution of the Mesopotamia Foredeep, Iraq. Iraqi Bulletin of Geology and Mining. 2010;6(2):41–53.
17. Handhal A., Jawad S., Al-Abadi A. GIS-based machine learning models for mapping tar mat zones in upper part (DJ unit) of Zubair Formation in North Rumaila supergiant oil field, Southern Iraq. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019;178:559–574. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.071
18. Al-Khafaji A., Yonis S., Ibrahim R. et al. Geochemical characterization and origin of the Cretaceous Sa'di, Khasib, Mishrif, and Nahr Umr Crude Oils in Halfaya Oilfield, Southern Mesopotamian Basin, Iraq. *Petroleum Science and Technology*. 2021;39(21–22):993–1007. https://doi.org/10.1080/10916466.2021.1980587
19. Abeed Q., Leythaeuser D., Littke R. Geochemistry, origin and correlation of crude oils in Lower Cretaceous sedimentary sequences of the southern Mesopotamian Basin, southern Iraq. *Organic Geochemistry*. 2012;46:113–126. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.02.007
20. Mehenni M., Guit F. Majnoon Field, SE Iraq: A giant unique among other giants? In: *First EAGE Workshop on Iraq-Hydrocarbon Exploration and Field Development*. 2012. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20143558
21. Abbas M., Watheq J. Lithofacies classification of carbonate reservoirs using advanced machine learning: a case study from a Southern Iraqi oil field. In: *Offshore Technology Conference*. August 16–19, 2021, Virtual and Houston, Texas; 2021. https://doi.org/10.4043/31114-MS
22. Al-Ameri T., Jafar M., Janet P. Hydrocarbon generation modeling of the Basrah oil fields, Southern Iraq. In: *AAPG Annual Convention and Exhibition*. April 10-13, 2011, Houston, Texas. 2011;20116.
23. Salih T., Sahi S., AL-Dujaili A. Using different surfactants to increase oil recovery of Rumaila field (experimental work). *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2016;17(3):11–31. https://doi.org/10.31699/IJCPE.2016.3.2
24. Al-Ansari R. The petroleum geology of the upper sandstone member of the Zubair Formation in the Rumaila South. *Geological Study, Ministry of Oil, Baghdad, Iraq*. 1993.
25. Jassim S., Goff J. *Geology of Iraq*. Geological Society of London; 2006. 341 p.
26. Al-Ameri T., Jafar M., Pitman J. Hydrocarbon generation modeling of the Basrah oil fields, Southern Iraq. In: *AAPG Annual Convention and Exhibition*. March, 2012, Houston, Texas. 2012;20116:2011. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.287.1176781
27. Al-Dujaili A., Shabani M., Al-Jawad M. Characterization of flow units, rock and pore types for Mishrif Reservoir in West Qurna oilfield, Southern Iraq by using lithofacies data. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2021; 11, 4005–4018. https://doi.org/10.1007/s13202-021-01298-9
28. Al-Dujaili A., Shabani M., Al-Jawad M. Lithofacies and electrofacies models for Mishrif Formation in West Qurna Oilfield, Southern Iraq by deterministic and stochastic methods (comparison and analyzing). *Petroleum Science and Technology*. 2024;42(13):1656–1684. https://doi.org/10.1080/10916466.2023.2168282
29. Al-Dujaili A., Shabani M., Al-Jawad M. Lithofacies, deposition, and clinoforms characterization using detailed core data, nuclear magnetic resonance logs, and modular formation dynamics tests for Mishrif formation intervals in West Qurna/1 Oil Field, Iraq. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. 2023;1–13. https://doi.org/10.2118/214689-PA
30. Al-Dujaili A., Shabani M., AL-Jawad M. Effect of heterogeneity on capillary pressure and relative permeability curves in carbonate reservoirs. A case study for Mishrif Formation in West Qurna/1 Oilfield, Iraq. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2023;24(1):13–26. https://doi.org/10.31699/IJCPE.2023.1.3

31. Lazim A., Maki M., Tariq S. Detect faults of Zubair and Mishrif Formations–Zubair Oilfield by Integrate Structural Geology and Pressure Transient Analyses (PTA) to Selected Wells. *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics*. 2020;8(5):67–72. https://doi.org/10.9790/0990-0805016772
32. Al-Jaberi M., A-Jafar M. Elements distribution for the upper sandstone member of the Zubair Formation in Zubair oil field, southern Iraq. *Iraqi Geological Journal*. 2020;53(1E):55–74. https://doi.org/10.46717/igj.53.1E.5Ry-2020-07-05
33. Hussein M., Eren T., Rahman A. et al. Case Study for Curing Circulation Losses during Primary Cementing Operations Using Fiber Cement in Zubair Field/Iraq. In: *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. 29–31 January 2018, Abu Dhabi, UAE. 2018. https://doi.org/10.2118/189339-MS
34. Zainab M., Almallah I., Al-Najm F. Petrophysical properties evaluation using well logging of the upper sand member of Zubair Formation in Zubair oil Field, Southern Iraq. *Basrah Journal of Science*. 2019;37(3):456–480. URL: https://www.basjsci.net/index.php/bsj/article/view/108
35. Al-Dujaili A., Shabani M., AL-Jawad M. Identification of the best correlations of permeability anisotropy for Mishrif reservoir in West Qurna/1 oil Field, Southern Iraq. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2021;30(3):27–33. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2021.06.001
36. Sadooni F., Alsharhan A. Stratigraphy, microfacies, and petroleum potential of the Mauddud Formation (Albian–Cenomanian) in the Arabian Gulf basin. *AAPG bulletin*. 2003;87(10):1653–1680. https://doi.org/10.1306/04220301111
37. Cross N., Goodall I., Hollis C. et al. Reservoir description of a mid-Cretaceous siliciclastic-carbonate ramp reservoir: Mauddud Formation in the Raudhatain and Sabiriyah fields, North Kuwait. *GeoArabia*. 2010;15(2):17–50. https://doi.org/10.2113/geoarabia150217
38. Beydoun Z. Productive Middle East clastic oil and gas reservoirs: their depositional settings and origins of their hydrocarbons. In: *Sedimentary Facies Analysis: a Tribute to the Research and Teaching of Harold G. Reading*. Wiley; 1995. Pp. 329–354. https://doi.org/10.1002/9781444304091.ch14
39. Ibrahim M.W. Lithostratigraphy and subsurface geology of the Albian rocks of south Iraq. *Journal of Petroleum Geology*. 1981;4(2):147–162. https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1981.tb00530.x
40. Al-Zaidy A., Al-Mafraji T. Geohistory analysis and basin development of the Late Berriasian-Aptian Succession, Southern Iraq. *Iraqi Geological Journal*. 2019;52(2):36–52. https://doi.org/10.46717/igj.52.2.3Ms-2019-12-26
41. Idan R., Faisal R., Nasser M. et al. Hydrocarbon potential of Zubair Formation in the south of Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*. 2015;8:4805–4817. https://doi.org/10.1007/s12517-014-1569-6
42. Al-Ghuribawi M., Rasha F. An Integrated Microfacies and Well Logs-Based Reservoir Characterization of Yamama Formation, Southern Iraq. *Iraqi Journal of Science*. 2021;62(10):3570–3586. https://doi.org/10.24996/ijs.2021.62.10.16
43. Chafeet H. Yamama reservoir characterization in the West Qurna oil field, Southern Iraq. *Iraqi Journal of Science*. 2016;57(2A):938-947.
44. Aqrawi A., Mahdi T., Sherwani G., Horbury A. Characterization of the Mid-Cretaceous Mishrif Reservoir of the southern Mesopotamian Basin, Iraq. In: *American Association of Petroleum Geologists Conference and Exhibition*. 7–10 March 2010; Manama, Bahrain. Pp. 7–10. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.248.104
45. Al-Iessa I., Zhang W. Facies evaluation and sedimentary environments of the Yamama Formation in the Ratawi oil field, South Iraq. Scientific Reports. 2023;13(1):5305. https://doi.org/10.1038/s41598-023-32342-9
46. Al-Dujaili A.N., Shabani M., Al-Jawad M.S. The efficient and economical application of a cement slurry programme for sandstone and carbonate reservoirs. A case study of the Zubair, Mauddud, and Mishrif formations in a supergiant oilfield, in southern Iraq. *Bulletin of Geophysics & Oceanography*. 2024;65(3):439–460. https://doi.org/10.4430/bgo00450

Информация об авторе

Ахмед Н. Аль-Дуджайли – доктор наук, факультет нефтяного инжиниринга, Технологический университет имени Амира Кабира, г. Наджаф, Ирак; ORCID 0000-0003-0509-4504, Scopus ID 57224971849, ResearcherID GOH-1398-2022; e-mail ahmed.noori203@aut.ac.ir

Information about the author

Ahmed N. Al-Dujaili – PhD, Doctor, Petroleum Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Najaf, Iraq; ORCID 0000-0003-0509-4504, Scopus ID 57224971849, ResearcherID GOH-1398-2022; e-mail ahmed.noori203@aut.ac.ir

Поступила в редакцию	26.08.2023	**Received**	26.08.2023
Поступила после рецензирования	27.03.2024	**Revised**	27.03.2024
Принята к публикации	02.05.2024	**Accepted**	02.05.2024

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-230
УДК 553.048:004.942(043.3)(476.7)

ГИС-моделирование строения кайнозойской толщи Брестской области для прогноза и оценки залежей нерудного сырья

М.А. Богдасаров[1] ✉, **А.Н. Маевская**[1], **Д.О. Петров**[2], **Н.Н. Шешко**[2]
[1] *Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина, г. Брест, Республика Беларусь*
[2] *Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь*
✉ *bahdasarau@gmail.com*

Аннотация
К настоящему времени накоплен значительный опыт в решении задач прогноза и оценки полезных ископаемых, прежде всего горючих и рудных. Практически любой подобный прогноз не обходится без использования методов компьютерного моделирования, которые сегодня стали неотъемлемой составляющей геологической отрасли, оперирующей большими массивами данных. Но несмотря на столь значительные успехи в решении проблемы прогнозирования полезных ископаемых с использованием современных информационных технологий, научно-методические подходы к моделированию недр территорий, в которых сконцентрированы общераспространенные полезные ископаемые (ОПИ), все еще разработаны недостаточно. Ввиду незначительного финансирования данный вид ресурсов часто оставляют без внимания, несмотря на их важное социально-экономическое значение для развития местной промышленности регионов разного ранга. Важное значение ОПИ имеют и для территории Брестской области Беларуси. Развитие минерально-сырьевой базы данного региона в связи с особенностями его геологического строения (территория сложена мощной толщей кайнозойских отложений) связано именно с общераспространенными видами сырья. Поэтому научные исследования, направленные на моделирование геологического строения кайнозойских отложений территории Брестской области для оценки перспектив выявления новых залежей нерудных видов минерального сырья в регионе, являются весьма актуальными. *Цель* настоящей работы заключается в создании цифровой геологической модели кайнозойских отложений территории Брестской области как основы для прогноза новых наиболее доступных для освоения залежей ОПИ в регионе и оценки перспектив их освоения. *Задачи:* систематизировать сведения о геологическом строении Брестской области; создать цифровую геологическую модель кайнозойской толщи территории Брестской области; разработать подход к группировке земель региона по приемлемости к освоению залежей ОПИ; разработать схему вовлечения прогнозных залежей ОПИ территории Брестской области в разработку. *Объект:* кайнозойские отложения территории Брестской области. *Методы:* компьютерного моделирования, геоинформационный, аппроксимации, картографический, классификации, экспертных оценок. *Результаты:* предложен новый, адресный научно-методический подход к геологическому моделированию недр территории Брестской области и находящихся в них залежей нерудных полезных ископаемых. Созданная на его основе цифровая геологическая модель регионального уровня позволяет выполнить первичный прогноз на залежи ОПИ, приуроченных к толще кайнозойских отложений, а также провести оценку приемлемости вовлечения выявленных залежей в разработку.

Ключевые слова
геология, геологическая модель, кайнозой, кайнозойские отложения, общераспространенные полезные ископаемые, минерально-сырьевая база, сырье, прогноз, ГИС, ArcGIS, оценка, картосхема, Брестская область

Для цитирования
Bogdasarov M.A., Mayevskaya A.N., Petrov D.O., Sheshko N.N. GIS modeling of a Cenozoic strata structure in Brest region for forecasting and evaluation of non-metallic deposits. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):328–340. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-230

© Богдасаров М. А., Маевская А. Н., Петров Д. О., Шешко Н. Н., 2024

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

GIS modeling of a Cenozoic strata structure in Brest region for forecasting and evaluation of non-metallic deposits

M.A. Bogdasarov[1] ✉, **A.N. Mayevskaya**[1], **D.O. Petrov**[2], **N.N. Sheshko**[2]

[1] *Brest State A.S. Pushkin University, Brest, Republic of Belarus*

[2] *Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus*

✉ *bahdasarau@gmail.com*

Abstract

To date, considerable experience has been accumulated in solving the problems of forecasting and evaluation of minerals, primarily fossil fuels and ore minerals. Virtually any such forecast requires the use of computer modeling methods, which today have become an integral part of geological industry, operating with large data sets. But despite such significant successes in solving the problem of natural (mineral) resources forecasting using up-to-date information technologies, scientific and methodological approaches to modeling the subsoil of territories where commonly occurring mineral resources (COMR) are concentrated are still insufficiently developed. Due to insufficient funding, this type of resources is often overlooked, despite its important socio-economic significance for the development of local industry of various ranks in regions. COMR are also important for the territory of the Brest region of Belarus. The development of the mineral resource base of this region due to the peculiarities of its geological structure (the territory is formed by a thick strata of Cenozoic sediments) is associated with commonly occurring types of raw materials. Therefore, scientific research aimed at modeling the geological structure of Cenozoic sediments in the Brest region to assess the prospects for dicovering new deposits of non-metallic minerals in the region is very relevant. The *purpose* of this work is to create a digital geological model of the Cenozoic sediments of the Brest region as a basis for forecasting the new COMR deposits, being most accessible for development in the region, and assessing the prospects for their development. *Objectives:* to systematize data on the geological structure of the Brest region; to create a digital geological model of the Cenozoic strata in the Brest region; to develop an approach to the grouping of the region's lands according to their acceptability for the development of COMR deposits; to develop a scheme of involvement of the predicted COMR deposits of the Brest region in development. *Study subject:* Cenozoic sediments in the Brest region. *Methods:* computer modeling, geoinformation, approximation, cartographic, classification, expert review. *Results:* a new, targeted scientific and methodological approach to the geological modeling of the subsoil and non-metallic mineral deposits in the Brest region was proposed. The regional-level digital geological model created on its basis makes it possible to perform primary forecasting of COMR deposits confined to the Cenozoic sediments, as well as to assess the acceptability of involvement of the identified deposits in development.

Keywords

geology, geological model, Cenozoic, Cenozoic sediments, commonly occurring mineral resources, mineral resource base, raw material, forecast, GIS, ArcGIS, evaluation, schematic map, Brest region

For citation

Bogdasarov M.A., Mayevskaya A.N., Petrov D.O., Sheshko N.N. GIS modeling of a Cenozoic strata structure in Brest region for forecasting and evaluation of non-metallic deposits. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):328–340. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-230

Введение

К настоящему времени выполнено огромное количество исследований, нацеленных на решение задач прогнозирования и оценки нефтяных и газовых месторождений полезных ископаемых. Повышенный интерес к этим видам сырья определяется постоянным ростом спроса и цен на них. Кроме того, для таких исследований характерны большие объемы инвестирования как на государственном уровне, так и со стороны частных горнорудных компаний. В то же время общераспространенные полезные ископаемые (ОПИ)[1], имеющие важное социально-экономическое значение для развития местной промышленности регионов, достаточно часто незаслуженно обходят вниманием.

ОПИ призваны решать одну из значимых проблем для регионов разного ранга – обеспечение потребностей строительного комплекса местными видами сырья. Именно поэтому систематическое геологическое изучение таких ресурсов видится весьма актуальным направлением исследований на современном этапе. Важны геологические исследования сырьевой базы ОПИ и для территории Брестской области (Республика Беларусь), которая в геологическом отношении сложена мощной толщей осадочных, в первую очередь кайнозойских отложений. Именно с данной толщей генетически связаны наиболее доступные для освоения месторождения

[1] Межпарламентская Ассамблея государств – участников СНГ. Модельный кодекс о недрах и недропользовании для государств – участников СНГ. URL: https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=29299 [Доступ 29 февраля 2024].

общераспространенных видов сырья как в регионе, так и в стране в целом.

Подробные исследования кайнозойских отложений Брестской области, прежде всего четвертичной толщи, проводились с середины XIX в. и были связаны с развитием строительства железных дорог и промышленных предприятий, ввиду чего возник спрос на строительное сырье [1]. Сегодня на территории региона уже разведаны многочисленные месторождения строительных материалов (глин, суглинков, песков и песчано-гравийных пород и др.). Значимая часть таких месторождений разрабатывается. Остальные служат резервными базами для предприятий региона.

Несмотря на достигнутые успехи в формировании и развитии сырьевой базы ОПИ Брестской области проблема прогнозирования и оценки таких ресурсов продолжает оставаться здесь насущной проблемой. Обусловлено это прежде всего необходимостью актуализации накопленных предшественниками результатов с использованием последних (наиболее полных) данных геологического бурения. На современном этапе наиболее эффективно данная задача может быть решена с применением методов компьютерного моделирования. Актуализация сведений о ресурсах ОПИ в регионе позволит геологам планировать дальнейшее изучение недр для развития минерально-сырьевой (МСБ) Брестской области и создать качественную основу для обеспечения заинтересованных организаций информацией о перспективных залежах строительного сырья.

На основании вышесказанного могут быть сформулированы цель и задачи настоящего исследования.

Цель исследования – создание цифровой геологической модели кайнозойских отложений территории Брестской области как основы для прогноза новых наиболее доступных для освоения залежей ОПИ в регионе и оценки перспектив их освоения.

Задачи исследования:

– систематизировать накопленные сведения о геологическом строении Брестской области;

– сформировать цифровую геологическую модель кайнозойской толщи территории Брестской области;

– разработать подход к группировке земель территории Брестской области по приемлемости к освоению залежей ОПИ;

– разработать обоснованную схему вовлечения прогнозных залежей ОПИ территории Брестской области в разработку.

Объектом исследования выступают кайнозойские отложения территории Брестской области.

Исходные материалы

В качестве исходных данных для реализации настоящего исследования послужила база данных буровой изученности Брестской области, составленная авторами на основе материалов, предоставленных Государственным предприятием «Научно-производственный центр по геологии» и Государственным научным учреждением «Институт природопользования НАН Беларуси».

Описываемая база данных содержит информацию о более чем 5500 скважинах, которые были пробурены в разное время на территории региона. По каждому горизонту, вскрытому определенной скважиной, здесь даны более 20 характеристик. Среди них наиболее значимыми для цели реализуемого исследования являются следующие: местоположение, глубина залегания, стратиграфическое описание, литологическое описание, абсолютные отметки подошвы и кровли, мощность пород.

Характерной особенностью описываемой сети скважин является неравномерность ее распределения по территории Брестской области. Как видно на рис. 1, концентрация скважин в западной части области

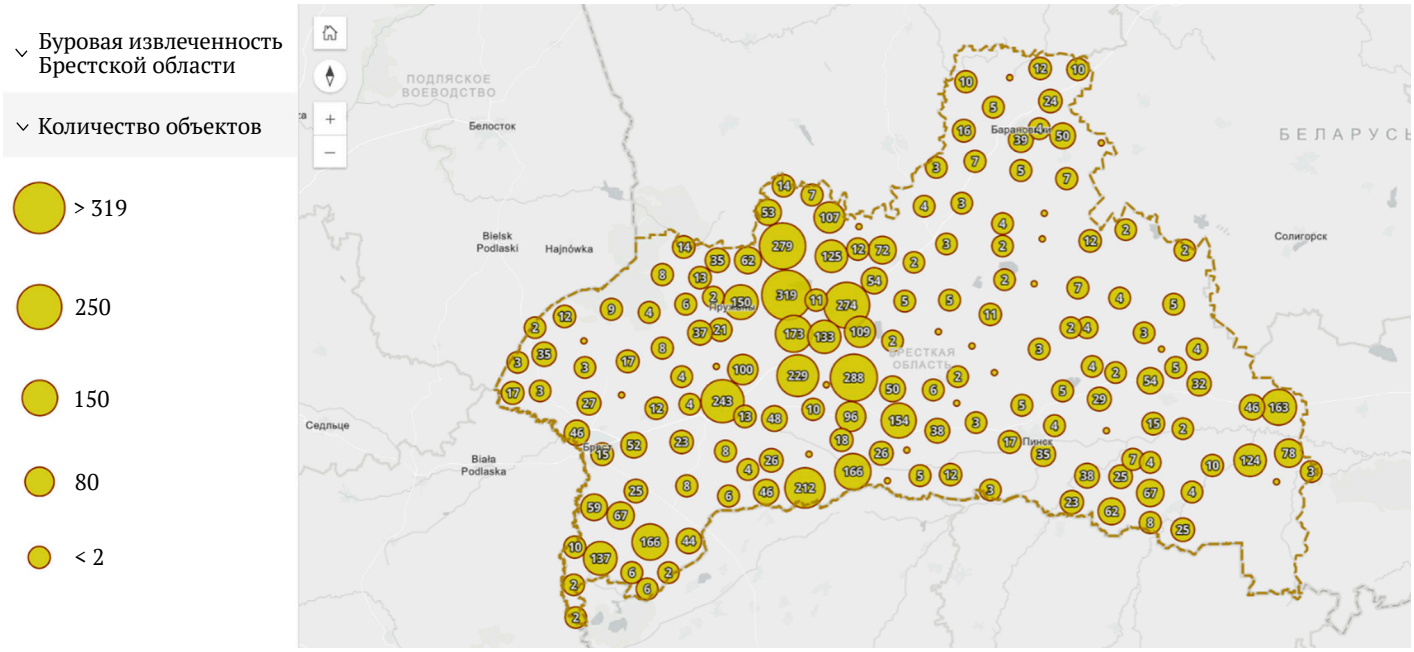


Рис. 1. Концентрация буровых скважин на территории Брестской области

весьма высока, в восточной, напротив, крайне низкая. Эта особенность оказала значимое влияние на разработку цифровой геологической модели кайнозойских отложений региона.

Методика исследования

В настоящее время существует большое количество разнообразных методик, посвященных решению задачи компьютерного геологического моделирования для прогноза полезных ископаемых. В то же время большая часть таких подходов, доказавших свою практическую эффективность, ориентированы на создание моделей применительно к прогнозу залежей горючих и рудных видов сырья. В меньшей степени эти подходы ориентированы на построение моделей недр для прогноза ОПИ. Это связано не только с меньшими объемами финансирования исследований в области прогноза общераспространенных видов сырья, но и со спецификой профильных ГИС-программ. Большое количество инструментов, представленных в таких ГИС, разрабатывались в контексте задач нефтеразведки, где сеть данных плотная и равномерная. Применение их к неоднородной и разреженной сети данных (наиболее присуща ОПИ) зачастую является невозможным. Именно поэтому создание моделей строения недр для прогноза нерудных полезных ископаемых весьма часто требует применения специально разработанных алгоритмов, методик и технологий.

Принимая во внимание вышесказанное, а также с учетом накопленного в отечественной и зарубежной практике опыта в сфере геологического моделирования [2–4] для достижения цели настоящего исследования предложена авторская методика прогноза и оценки залежей ОПИ, сконцентрированных в кайнозойских отложениях территории Брестской области [5]. Схема предполагает реализацию прогноза и оценки на основе цифровой геологической модели данной толщи. Основные блоки предложенной методики отражены на рис. 2. Далее подробнее остановимся на каждом из этих блоков.

Блок 1. Систематизация и актуализация сведений о геологическом строении Брестской области. Ввиду того что основной целью исследования является прогноз новых наиболее доступных для освоения залежей ОПИ в регионе, первой ступенью исследования, по мнению авторов, должна выступать систематизация накопленного обширного материала о геологическом строении Брестской области. Ведь именно геологическое строение выступает ключевым фактором, определяющим закономерности размещения МСБ региона и ее специфику. Кроме того, без понимания специфики геологического строения невозможно построить корректную геологическую модель.

Непосредственная реализация данного блока включала: *1* – сбор и обобщение многочисленных материалов о геологическом строении данной территории; *2* – уточнение сведений, полученных исследователями этой территории ранее, на основе авторского комплекта погоризонтных картосхем изопахит.

Блок 2. Выбор программных продуктов для создания цифровой геологической модели. Ввиду того что поставленная в работе цель наиболее эффективно может быть решена с применением информационных продуктов, значимой частью исследования стал данный блок.

Как показывает практика, в качестве программной основы для геологического моделирования применяют разнообразные ГИС-пакеты, которые могут быть объединены в две группы [6]: недропользовательские ГИС (Rock-works, GMS, Surfer, Petrel и др.) и общегеографические ГИС (ArcGIS, MapInfo, QGIS и др.).

Применительно к созданию цифровой геологической модели исследуемого региона рассматривалось использование таких программ, как ГИС Petrel и ГИС ArcGIS 10.5. Но поскольку пакет Petrel разрабатывался для использования в секторе нефтеразведки и нефтедобычи, где сеть данных бурения является весьма плотной и равномерной, его применение для создания модели с целью прогноза залежей ОПИ не представилось возможным. Поэтому предпочтение было отдано общегеографической системе ArcGIS 10.5.

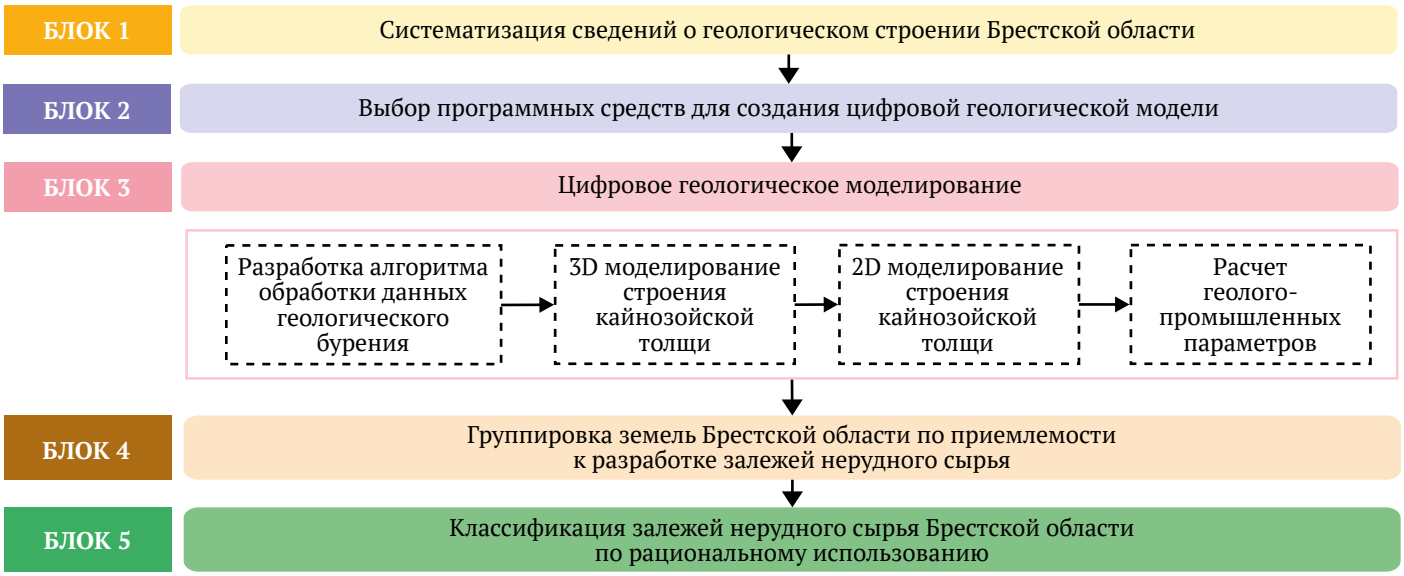


Рис. 2. Структурно-логическая схема методики прогноза и оценки залежей ОПИ Брестской области

Помимо выбора ГИС как основной платформы моделирования, данный этап включал и отбор дополнительных программных средств, расширяющих базовый функционал выбранного ГИС-пакета. В качестве таких средств обосновано использование: СУБД MS Access, табличного процессора Microsoft Excel, программного обеспечения для создания трехмерной компьютерной графики Blender, системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

Блок 3. Цифровое геологическое моделирование. Рассматриваемый блок является ключевым блоком выполняемого исследования и самым продолжительным по времени реализации. Он включал следующие шаги:

– разработку алгоритма обработки материалов, представленных в базе данных буровой изученности, с целью выявления ошибочных показателей, присутствующих в них;

– создание трехмерной цифровой геологической модели региона [7];

– преобразование трехмерной модели в двухмерный формат;

– расчет наиболее значимых для ОПИ геолого-промышленных параметров (вертикальная мощность отложений, мощность вскрышных пород, коэффициент вскрыши);

– построение набора прогнозно-минерагенических картосхем, отражающих сведения о закономерностях размещения и перспективных площадях наиболее значимых по мощности видов нерудного сырья исследуемой территории.

Блок 4. Группировка земель Брестской области по приемлемости к разработке залежей нерудного сырья. Включение в оценочную схему блока, позволяющего учитывать тип земель района размещения залежей, связано со спецификой добычи ОПИ. Разработка таких видов сырья, как правило, осуществляется открытым способом, что приводит к негативному воздействию на компоненты окружающей среды. Это, в свою очередь, влечет увеличение затрат на освоение таких ресурсов ввиду необходимости последующего возмещения ущерба, в первую очередь связанного с деградацией разных видов земель.

Применительно к территории Брестской области использование такого блока значимо еще и в связи с тем, что здесь добыча строительного сырья зачастую проводится путем разработки внутрихозяйственных карьеров, в результате чего нарушенные земли крайне проблематично вовлечь в хозяйственный оборот.

Итоговым результатом рассматриваемого блока стал предложенный авторами подход к группировке земель Брестской области по отношению к возможности открытой добычи [8].

Блок 5. Классификация залежей нерудного сырья Брестской области по рациональному использованию. Завершающим блоком предложенной методики стала классификация выявленных в ходе моделирования залежей ОПИ Брестской области по приемлемости к освоению. Процедура классификации проводилась на основе комплексирования растровых покрытий, отражающих геолого-промышленные параметры по каждой залежи, и рассчитанных весовых коэффициентов, характеризующих приемлемость выделенных на этапе 4 групп земель Брестской области к разработке ОПИ. Более подробно алгоритм классификации залежей описан в работе [9].

Результаты и их обсуждение

Выполнен комплексный анализ геологического строения территории Брестской области как ключевого фактора, определяющего закономерности формирования минерально-сырьевой базы региона и ее специфику. Ниже дана краткая характеристика основных черт геологического строения территории региона.

Территория Брестской области расположена в западной части древней Восточно-Европейской платформы. С учетом глубины залегания поверхности пород кристаллического фундамента в ее границах выделяются следующие тектонические элементы: Подлясско-Брестская впадина (восточная часть), Полесская седловина, Припятский прогиб (западная часть), Микашевичско-Житковичский выступ кристаллического фундамента, Ивацевичский погребенный выступ Белорусской антеклизы, Луковско-Ратновский горст, Волынская моноклиналь Волыно-Азовской плиты. Отложения осадочного чехла залегают повсеместно и объединяются в структурные комплексы, последовательно сменяющиеся в разрезе формационных рядов и разделенные перерывами в осадконакоплении. Данные комплексы соответствуют основным тектоническим этапам развития территории: готскому, нижнебайкальскому, верхнебайкальскому, каледонскому, герцинскому, киммерийско-альпийскому.

Наиболее широкое распространение среди пород платформенного чехла исследуемого региона получили кайнозойские отложения, в первую очередь четвертичные. Накопление кайнозойских отложений происходило на протяжении трех геологических периодов, отличающихся палеогеографическими условиями, оказавшими влияние на характер осадконакопления и современное строение осадочного чехла региона.

Отложения палеогеновой системы занимают значительные площади в границах области. Абсолютные отметки залегания их подошвы изменяются от 30–40 м на севере, северо-западе до 150 м на юге, юго-западе. Мощность на большей части региона 20–30 м.

Отложения неогеновой системы в пределах Брестской области занимают обширные площади, перекрывая палеогеновые и подстилая четвертичные. Они залегают на абсолютных отметках 30–150 м, достигая максимальных значений на юго-западе. Средняя мощность составляет 15–20 м.

Отложения четвертичной системы повсеместно распространены на исследуемой территории и сплошным чехлом перекрывают образования более древних геологических систем. Мощность их варьируется от нескольких десятков до 240 м.

Ввиду того что именно с кайнозойскими отложениями связаны наибольшие перспективы развития

МСБ региона, для уточнения особенностей их строения был выполнен комплект погоризонтных картосхем изопахит. Одна из них в качестве примера приведена на рис. 3.

Разработана цифровая геологическая модель кайнозойских отложений территории Брестской области. Она представляет собой сконцентрированную систему данных о структурных, литологических и горно-геологических особенностях строения кайнозойской толщи региона [7].

Ввиду многослойной структуры используемых для моделирования данных первоначально модель была сформирована в объемном виде. Трехмерная модель реализована на основе авторского алгоритма, исполненного с применением самостоятельно разработанного модуля на языке программирования C++. В основе данного алгоритма лежат построения на основе диаграммы Вороного. Как видно на рис. 4, объемная модель состоит из множества выпуклых многогранников в трехмерном пространстве. Смежные группы этих многогранников и представляют собой тела залежей осадочных пород, которые могут быть рассмотрены в качестве потенциальных для освоения ресурсов ОПИ в регионе.

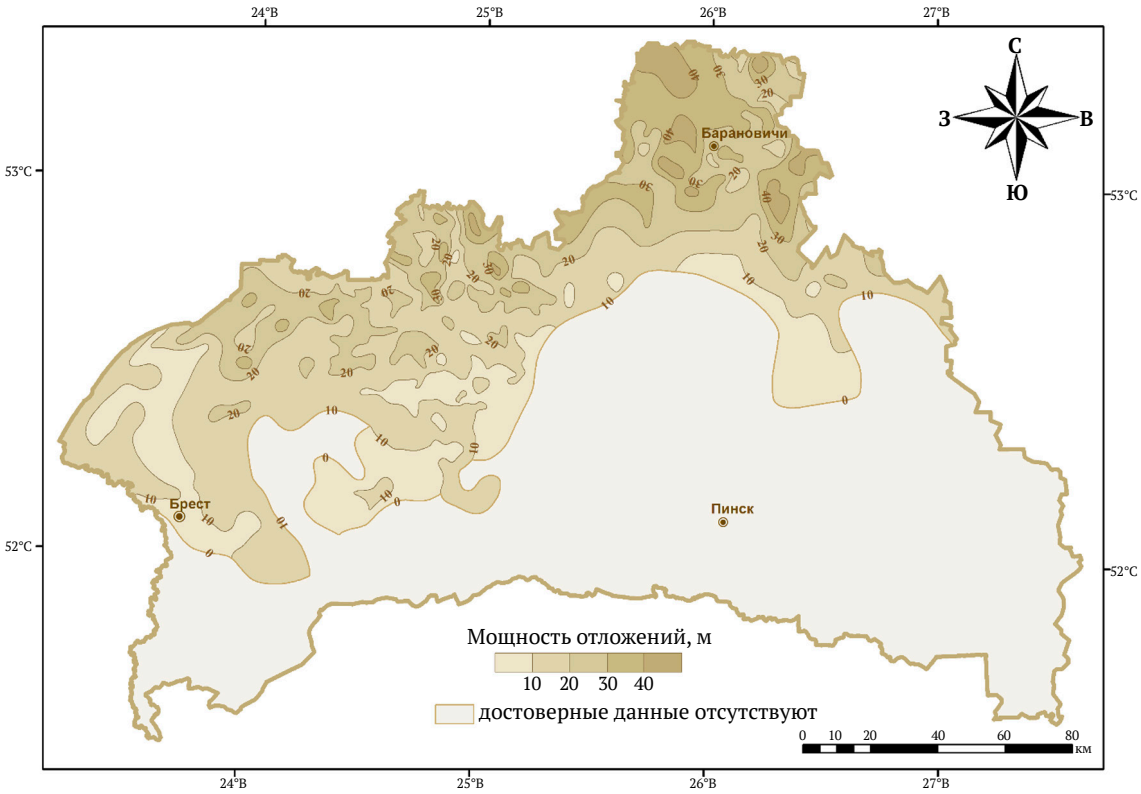


Рис. 3. Картосхема изопахит сожского подгоризонта припятского горизонта (Q_2pr_1 sz) четвертичной системы на территории Брестской области

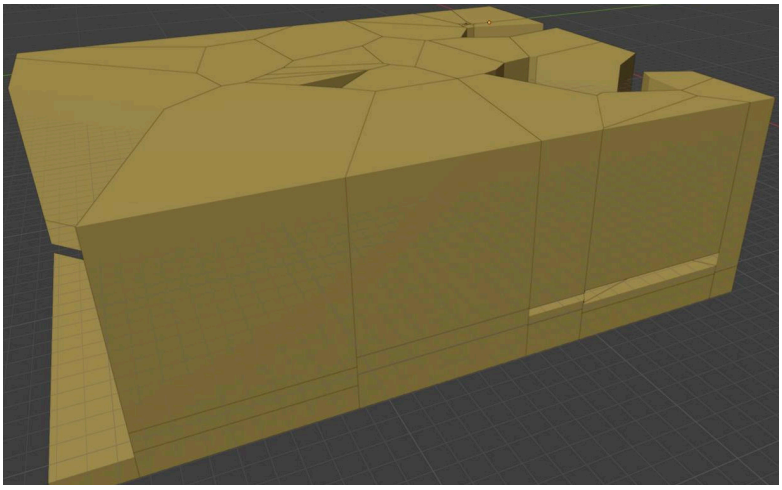


Рис. 4. Пример сформированной объемной модели, отражающей распределение залежей песка в толще четвертичных отложений на территории Жабинковского района Брестской области, авторский алгоритм

Рис. 5. Картосхема закономерностей размещения и прогноза залежей торфа в кайнозойских отложениях на территории Брестской области

Поскольку при создании трехмерной модели построения в отдельных частях базировались на редкой сети скважин, она в значительной степени отличается от классических объёмных моделей, которые представлены в научной литературе, посвященной моделированию нефтяных пластов. Это привело к необходимости проведения процедуры ее аппроксимации и формирования двухмерной модели, которая также наиболее привычна с точки зрения анализа для профильных специалистов. Алгоритм трансформации трехмерной модели в двухмерный формат подробно описан в [7].

В целом созданная двухмерная модель представляет собой структурированные в виде файловой базы геоданных ArcGIS наборы: *1* – векторных точечных слоев, полученных в ходе численной обработки «нарезанной» на слои объемной модели; *2* – растровых покрытий по каждому из 19 типов пород; *3* – классов полигональных объектов, отражающих предварительные границы распространения залежей ОПИ, их мощности, мощности перекрывающих отложений, отметки залегания.

Двухмерная модель послужила основой для создания базового набора цифровых прогнозно-минерагенических картосхем региона, который был выполнен для таких типов пород, как пески, валунно-гравийно-песчаные породы (песчано-гравийно-валунные породы), глины, суглинки и супеси, торф. Именно эти породы являются наиболее значимыми с точки зрения мощности и представительными по площади на исследуемой территории. Пример картосхемы из описываемого набора показан на рис. 5.

Предложен подход к группировке земель территории Брестской области по приемлемости к освоению залежей ОПИ. При выделении групп земель были учтены: *1* – правовые нормы, регламентирующие возможность использования земель разных видов в Республике Беларусь для разработки карьеров[2]; *2* – применяемые в работах других исследователей подходы к группировке земель по приемлемости к освоению залежей ОПИ[3] [10, 11]; *3* – подход к группировке земель по степени антропогенного воздействия на природные ландшафты, используемый в работе Б.И. Кочурова [12].

[2] Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Кодекс Республики Беларусь о земле. URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12200195 [Доступ 29 февраля 2024]; Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Кодекс Республики Беларусь о недрах. URL: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Hk0800406 [Доступ 29 февраля 2024]; Правовой форум Беларуси. Проект постановления Совета Министров Республики Беларусь «О порядке размещения, разработки, рекультивации и учета внутрихозяйственных карьеров». URL: https://forumpravo.by/publichnoe-obsuzhdenie-proektov-npa/forum15/16239 [Доступ 29 февраля 2024].

[3] Лютягин Д.В. Геолого-экономическое обоснование вовлечения в отработку месторождений общераспространенных полезных ископаемых. [Автореф. дисс. канд. экон. наук]. М.; 2006. 28 с.

Группы земель – результат систематизации множества подтипов земель[4] [13] базы данных земельно-информационной системы Брестской области. Всего в ходе группировки были выделены шесть групп земель (табл. 1).

Для обеспечения возможности использования разработанной классификации при проведении оценки приемлемости освоения залежей ОПИ Брестской области по каждой группы земель были рассчитаны весовые коэффициенты на основе метода анализа иерархий Т. Саати [13, 14].

По итогам группировки земель и расчета весовых коэффициентов создана цифровая растровая модель (рис. 6), отражающая приемлемость выделенных групп земель региона к освоению залежей строительного сырья.

Разработана схема вовлечения прогнозных залежей ОПИ территории Брестской области в разработку. В результате создания растровой модели, отражающей приемлемость разных групп земель территории Брестской области к освоению залежей ОПИ, стало возможным обоснование рациональной последовательности включения выделенных в результате цифрового геологического моделирования залежей строительного сырья исследуемого региона в разработку. Для этого в программном пакете ArcGIS 10.5 была проведена процедура комплексирования нескольких типов растровых поверхностей: 1 – растров мощностей выявленных перспективных площадей местных видов сырья; 2 – растров мощностей вскрышных пород над выявленными залежами; 3 – растра, показывающего доступность земель Брестской области к освоению ОПИ [9].

По результатам комплексирования были сформированы наборы картосхем двух видов:

1) картосхемы, дающие общее представление о приемлемости разработки выявленных нерудных видов сырья области. Пример такой схемы представлен на рис. 7;

2) картосхемы, дающие детальное представление о приемлемости освоения каждой отдельной залежи. Пример такой схемы представлен на рис. 8.

Как хорошо видно на обоих рисунках, все залежи на картосхемах сгруппированы в виде пяти классов:

1) наиболее приемлемые для освоения, которые характеризуются близким залеганием к поверхности, отличаются значимыми мощностями продуктивной толщи и приурочены к неиспользуемым или слабо используемым с/х и лесным землям;

2) приемлемые для освоения, вскрышной коэффициент которых преимущественно равен единице, приуроченные к с/х и лесным землям с высокой интенсивностью использования;

3) освоение которых допускается при наличии острого спроса на сырье, в основном сконцентрированные под нарушенными землями, с вскрышным коэффициентом, равным единице или превышающим ее;

[4] Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Земельно-информационная система Республики Беларусь. Порядок создания, ведения (эксплуатации и обновления). URL: https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22137315&p1=1&p5=0 [Доступ 29 февраля 2024].

Таблица 1

Группировка земель Брестской области с учетом приемлемости к освоению залежей строительного сырья

Код	Группа земель	Подтип земель
1	Земли, наиболее пригодные для отвода под разработку ОПИ	Прочие неиспользуемые земли; пески, лишенные растительности; овраги и промоины; валы; ямы; вымочки
2	Земли, пригодные для отвода под разработку ОПИ	Залежные; луговые; луговые (закустаренные); луговые (заболоченные); луговые (заболоченные, закустаренные); улучшенные луговые; не покрытые лесом; под ДКР
3	Земли, отвод которых под разработку ОПИ допускается	Пахотные; теплицы, парники; сады; ягодники; плантации; плодовые питомники; леса; посадки; под лесополосами; дороги полевые, лесные; просеки
4	Земли, отвод которых под разработку ОПИ ограничивается	Земли, нарушенные при разработке и добыче полезных ископаемых; земли, нарушенные при торфоразработках и добыче сапропелей; земли, нарушенные при ведении строительных работ; выгоревшие торфяники; бывшие с/х земли, загрязненные радионуклидами; земли, находящиеся в стадии мелиоративного строительства; земли, находящиеся в стадии восстановления плодородия; отвалы и терриконы; карьеры и иные объекты в стадии добычи полезных ископаемых; земли в стадии добычи торфа и сапропелей; действующие стройплощадки и другие объекты в стадии строительства; земли, используемые для хранения отходов; скотомогильники
5	Земли, отвод которых под разработку ОПИ крайне ограничивается	Дороги проселочные; дороги улучшенные – полотно (проезжая часть); дороги улучшенные – откосы; скотопрогоны; железные дороги – полотно; железные дороги – откосы; железные дороги – платформы; иные транспортные коммуникации; земли под трубопроводами; мосты, путепроводы, эстакады; площади; улицы и проезды; проезжие части улиц; парки, скверы, бульвары, иные озелененные территории; газоны и клумбы; курганы; кладбища; земли, предоставленные гражданам для коллективного садоводства; усадебные земли; дворы (без разделения на производственную и жилую застройку; открытые склады; загоны; здания жилые; здания нежилые; постройки легкого типа; иные строения и сооружения; силосные ямы
6	Земли, отвод которых под разработку ОПИ запрещается	Реки; каналы и канавы; озера; водохранилища и пруды; дамбы; плотины; под бровками; болота

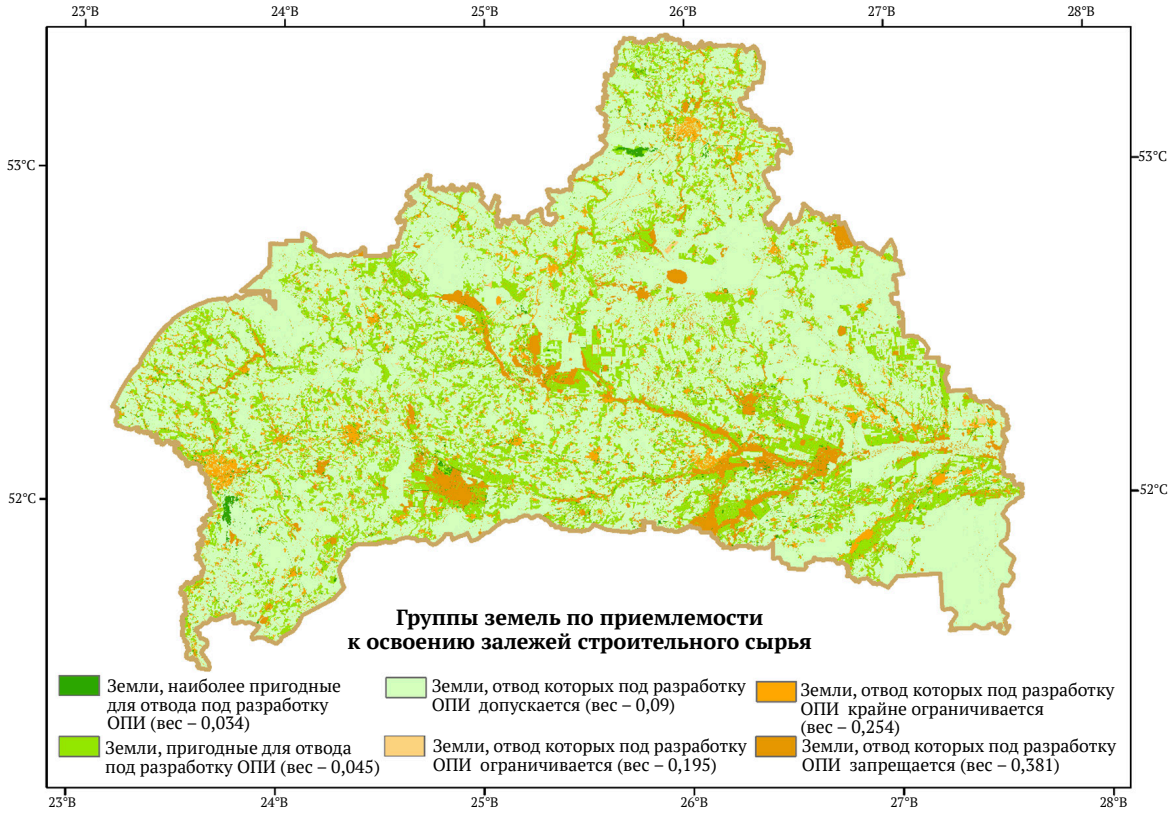


Рис. 6. Растровая модель, отражающая приемлемость различных групп земель Брестской области к освоению залежей строительного сырья

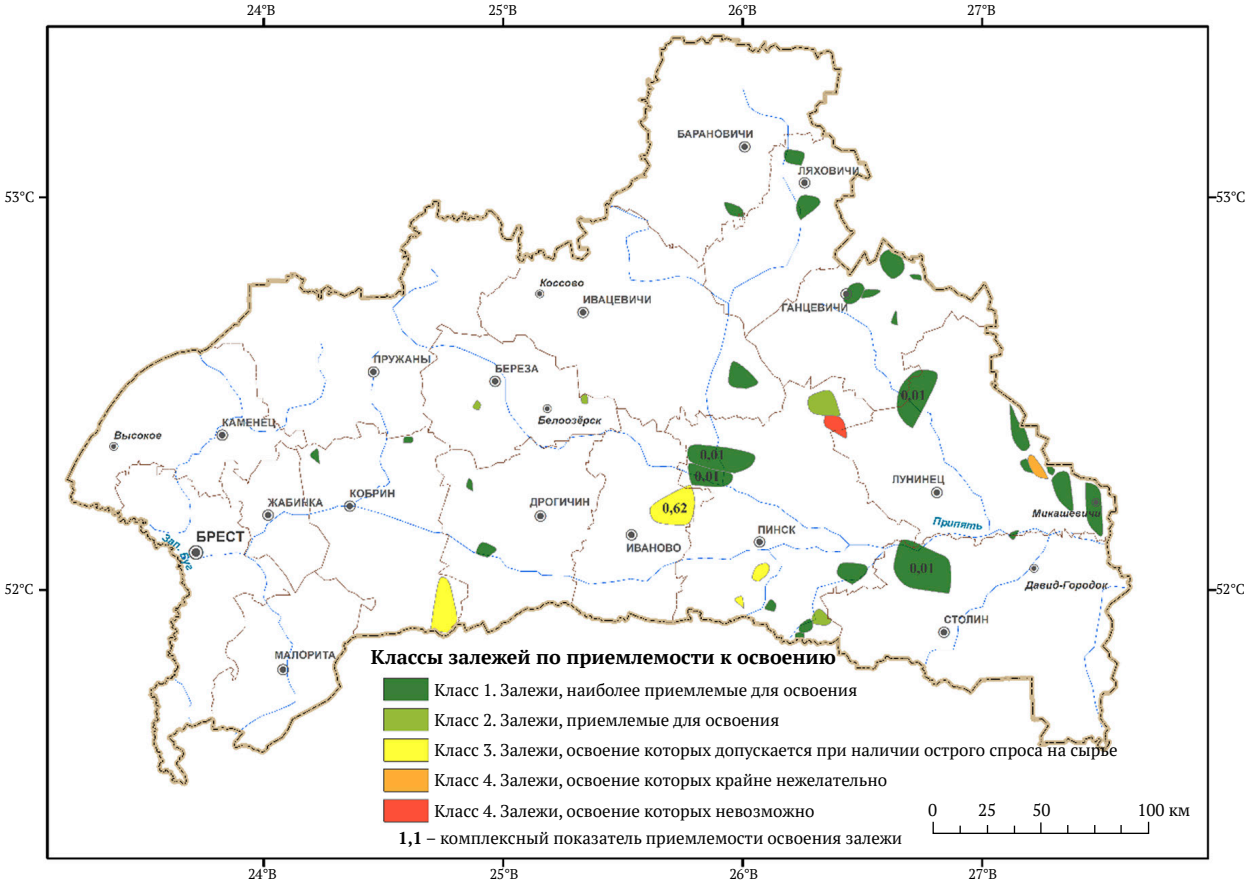


Рис. 7. Картосхема залежей торфа Брестской области по перспективности освоения

4) освоение которых крайне нежелательно, размещенные под застроенными землями с коэффициентом вскрыши, превышающим единицу;

5) освоение которых невозможно, залегающие под водными объектами и болотами, значения вскрышных пород которых значительно (в два и более раза) превышают значения мощностей продуктивной толщи.

При этом нельзя не отметить, что представленный подход к обоснованию целесообразности разработки залежей с учетом статуса земель стоит рассматривать как предварительный. Окончательное решение о приемлемости разработки конкретной залежи должно приниматься только после детального изучения района ее размещения. Это позволит более объективно оценить воздействие планируемых работ на компоненты природной среды.

Практическое применение результатов исследования

Полученные в ходе реализации исследования, описанного в настоящей статье, результаты уже нашли свое применение как в образовательном, так и в производственном процессе. В частности, разработанный алгоритм обработки данных геологических изысканий, набор инструментов, предназначенный для автоматизации его работы, используются в образовательном процессе и научно-исследовательской работе студентами кафедры городского и регионального развития факультета естествознания Брестского государственного университета имени А.С. Пушкина, а также студентами кафедры природообустройства факультета инженерных систем и экологии Брестского государственного технического университета, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Созданные наборы картосхем изопахит, прогнозно-минерагенических картосхем, картосхем приемлемости ввода залежей нерудных видов сырья территории Брестской области в освоение внедрены и используются при изучении кайнозойских отложений региона в лаборатории современной геодинамики и палеогеографии Института природопользования НАН Беларуси, а также в отделе четвертичной геологии филиала «Институт геологии» Республиканского унитарного предприятия «Научно-производственный центр по геологии».

Экономическая значимость полученных результатов может быть оценена в случае принятия соответствующих управленческих решений по освоению минерально-сырьевой базы региона и заключается в наличии актуальной и верифицируемой информации о геологическом строении территории, существенно облегчающей как задачи дальнейших поисков новых залежей минерального сырья, так и использования недр для целей, не связанных с освоением минеральных ресурсов.

Направления дальнейших исследований

Перспективы проведения дальнейших исследований по прогнозу и оценке залежей ОПИ Брестской области авторами видятся в дополнении предложенной методики блоком оценки доступности залежей.

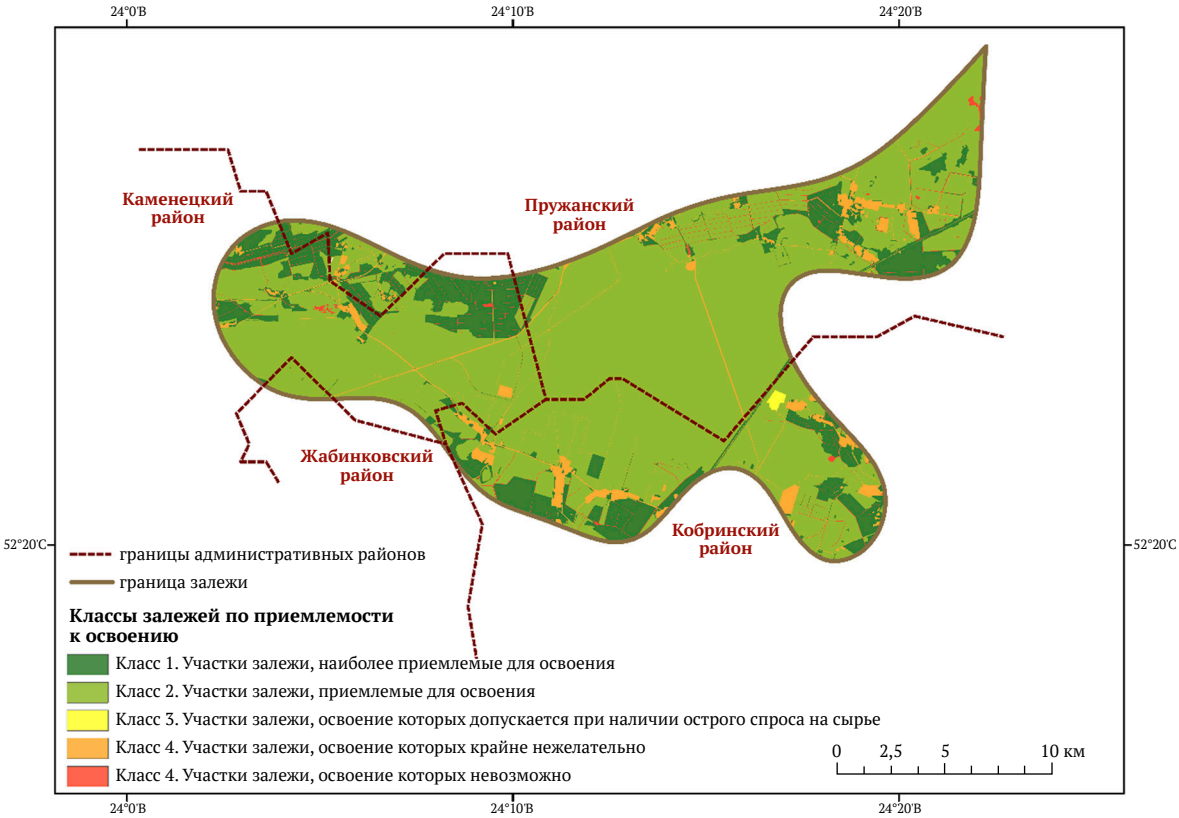


Рис. 8. Картосхема, отражающая приемлемость освоения отдельной залежи песчано-гравийных пород в пределах Брестской области

Под доступностью в данной работе предлагается понимать близость/удаленность залежей по отношению к узлам потребления сырья и по отношению к имеющейся транспортной инфраструктуре. Оценку доступности авторы предлагают проводить с использованием таких критериев, как:

– удаленность залежей по отношению к транспортным коммуникациям;

– удаленность залежей по отношению к узлам потребления [5].

Анализ последнего критерия может проводиться в двух направлениях:

– оценка удаленности относительно населенных пунктов как территорий потенциального возведения, расширения или ремонта различных строительных объектов, а также территорий, выступающих местами концентрации рабочей силы;

– оценка удаленности относительно профильных промышленных предприятий с учетом существующего с их стороны спроса на отдельные виды строительных ресурсов.

Заключение

В настоящем исследовании впервые с использованием методов компьютерного моделирования выполнены прогноз и оценка залежей минерального строительного сырья, сконцентрированных в кайнозойских отложениях территории Брестской области. Основные результаты проведенных работ могут быть обобщены в следующих выводах:

1. На основе материала, накопленного предшественниками и серии авторских цифровых погоризонтных картосхем изопахит выполнен анализ геологического строения исследуемого региона. Полученные в ходе анализа сведения обеспечили возможность проведения визуальной оценки корректности результатов, получаемых на разных этапах создания цифровой геологической модели кайнозойских отложений Брестской области.

2. Сформирована трехмерная цифровая геологическая модель кайнозойских отложений территории Брестской области. Для ее создания разработан авторский алгоритм, основанный на применении диаграммы Вороного. Ввиду того что созданная объемная модель в значительной степени отличается от классических двухмерных моделей, в алгоритме заложена возможность ее аппроксимации путем перехода к двухмерной модели. Полученная двухмерная модель дает целостное представление о геологическом устройстве кайнозойских отложений региона и послужила основой для создания серии цифровых картосхем, отражающих особенности пространственной локализации выявленных в ходе моделирования залежей ОПИ области.

3. Разработан подход к группировке земель территории Брестской области. На его основе все земли в регионе были объединены в шесть групп по приемлемости к добыче ОПИ. Для каждой группы земель были рассчитаны весовые коэффициенты и сформирована цифровая растровая модель, послужившая основой классификации залежей ОПИ Брестской области по «рациональной последовательности» ввода в освоение.

4. Предложен подход к классификации выявленных в ходе моделирования залежей ОПИ Брестской области по приемлемости ввода в разработку. Он базируется на учете таких характеристик, как мощность залежи, мощность вскрышных пород над залежью, весовое значение групп земель, под которыми расположена залежь. В результате проведенной классификации создан комплект картосхем, отражающих приемлемость ввода залежей ОПИ региона в освоение. К каждому объекту на сформированных цифровых схемах привязана атрибутивная информация. Полученные комплекты картосхем и связанные с ними базы данных атрибутивной информации могут представлять интерес для местных территориальных органов власти при разработке регионального плана действий по изучению, освоению, рациональному использованию залежей местных видов сырья.

Список литературы / References

1. Лукашев К.И. и др. *История геологических наук в Белорусской ССР*. Минск: Наука и техника; 1978. 272 с.
Lukashev K.I. et al. *History of geological sciences in the Byelorussian SSR*. Minsk: Nauka i Tekhnika Publ.; 1978. 272 p. (In Russ.)
2. Закревский К.Е. *Геологическое 3D моделирование*. М.: ООО ИПЦ Маска; 2009. 376 с.
Zakrevsky K.E. *Geological 3D modeling*. Moscow: IPTs Maska LLC Publ.; 2009. 376 p. (In Russ.)
3. Поклонов В.И., Семенов Ф.В., Иванов С.К. Создание прогнозно-математической модели закономерностей размещения кварцевых песков для строительных работ на территории республики Марий Эл. *Разведка и охрана недр*. 2015;(7):23–26.
Poklonov V.I., Semyonov F.V., Ivanov S.K. Creation of forecasting mathematical model of regularities of quartz sands placement for construction works in the territory of the Republic of Mari El. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2015;(7):23–26 (In Russ.)
4. Boissonnat J-D., Nullans S. Reconstruction of Geological Structures from Heterogeneous and Sparse Data. *The 4th ACM international workshop on Advances in geographic information systems*. 1996;3069:3–24. URL: https://inria.hal.science/inria-00073623
5. Богдасаров М.А., Маевская А.Н., Шешко Н.Н. Методические особенности прогноза и оценки общераспространенных полезных ископаемых. *Разведка и охрана недр*. 2023;(3):45–52. https://doi.org/10.53085/0034-026X_2023_03_45
Bogdasarov M.A., Maevskaya A.N., Sheshko N.N. Methodical specifics of forecasting and evaluating commonly occurring mineral resources. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2023;(3):45–52. https://doi.org/10.53085/0034-026X_2023_03_45

6. Петин А.Н., Васильев П.В. Геоинформатика в рациональном недропользовании. Белгород: БелГУ; 2011. 268 с.
Petin A.N., Vasiliev P.V. *Geoinformatics in rational subsoil use*. Belgorod: BelSU Publ.; 2011. 268 p. (In Russ.)

7. Маевская А.Н., Богдасаров М.А., Петров Д.О., Шешко Н.Н. Геолого-генетическое моделирование кайнозойских отложений Брестской области с применением информационных технологий. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2023;(1):107–118. URL: https://elib.bsu.by/handle/123456789/298810
Mayeuskaya H.M., Bahdasarau M.A., Piatrou D.A., Sheshka M.M. Geological and genetic modelling of the Cenozoic deposits of the Brest region using information technologies. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2023;(1):107–118. (In Russ.) URL: https://elib.bsu.by/handle/123456789/298810

8. Маевская А.Н., Богдасаров М.А., Шешко Н.Н. Ранжирование земельного фонда административных районов Брестской области по приемлемости к освоению залежей строительного сырья. *Природные ресурсы*. 2022;(2):45–56. URL: https://priroda.belnauka.by/jour/article/view/140
Mayevskaya A.N., Bogdasarov M.A., Sheshko N.N. Ranking of the land fund of the administrative districts of the Brest Region according to the acceptability to the development of deposits of construction raw materials. *Natural Resources*. 2022;(2):45-56. (In Russ.) URL: https://priroda.belnauka.by/jour/article/view/140

9. Маевская А.Н., Богдасаров М.А., Шешко Н.Н. Обоснование схем рационального использования залежей нерудного сырья Брестской области. *Природопользование*. 2023;(1):135–150.
Mayevskaya A.N., Bogdasarov M.A., Sheshko N.N. Justification of schemes of rational use of deposits of non-metallic raw materials in Brest region. *Prirodopol'zovanie*. 2023;(1):135–150 (In Russ.)

10. Пешкова Г.Ю. Экспресс-оценка привлекательности разработки месторождений глины на основе геолого-экономических критериев (на примере Ленинградской области). *Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: вестник научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета*. 2016;(1):121–128.
Peshkova G.Yu. Express-evaluation of clay deposits mining effectiveness on the base of economic-geological criteria (using Leningrad region as an example). *Corporate governance and innovative economic development of the North: Bulletin of the Research Center of Corporate Law, Management and Venture Capital of Syktyvkar State University*. 2016;(1):121–128.

11. Черемисина Е.Н., Никитин А.А. Геоинформационные системы в природопользовании. *Геоинформатика*. 2006;(3):5–20.
Cheremisina E.N., Nikitin A.A. Applying geoinformation systems in nature use. *Geoinformatika*. 2006;(3):5–20. (In Russ.)

12. Кочуров Б.И. *Экодиагностика и сбалансированное развитие*. М.: ИНФРА-М; 2016. 362 с.
Kochurov B.I. *Ecodiagnosis and sustainable development*. Moscow: INFRA-M Publ.; 2016. 362 p. (In Russ.)

13. Саати Т. *Аналитическое планирование. Организация систем*. М.: Радио и связь; 1991. 224 с.
Saati T. *Analytical Planning. Systems Organization*. Moscow: Radio i Svyaz' Publ.; 1991. 224 p. (In Russ.)

14. Саати Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. М.: Радио и связь; 1993. 278 с.
Saaty T. *Decision Making. Hierarchy Analysis Method*. Moscow: Radio i Svyaz' Publ.; 1993. 278 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Максим Альбертович Богдасаров – доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, проректор по научной работе, профессор кафедры городского и регионального развития, профессор кафедры биологических и химических технологий, Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина, г. Брест, Республика Беларусь; ORCID 0000-0002-2039-679X, Scopus ID 57191968270; ResearcherID: HPG-0293-2023, e-mail bahdasarau@gmail.com

Анна Николаевна Маевская – кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры городского и регионального развития, Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина, г. Брест, Республика Беларусь; ORCID 0009-0006-0448-450X; e-mail maevskaya.anna@inbox.ru

Дмитрий Олегович Петров – кандидат технических наук, доцент кафедры ЭВМ и систем факультета электронно-информационных систем, Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь; ORCID 0000-0001-6164-9936; e-mail polegdo@gmail.com

Николай Николаевич Шешко – кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской части, доцент кафедры природообустройства факультета инженерных систем и экологии, Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь; ORCID 0000-0001-6373-8166, Scopus ID 57214638269; e-mail optimum@tut.by

Information about the authors

Maksim A. Bogdasarov – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Dr.Sci. (Geol. and Mineral.), Vice-Rector for Science, Professor of the Department of Urban and Regional Development, Professor of the Department of Biological and Chemical Technologies, Brest State A.S. Pushkin University, Brest, Republic of Belarus; ORCID 0000-0002-2039-679X, Scopus ID 57191968270, ResearcherID HPG-0293-2023; e-mail bahdasarau@gmail.com

Anna N. Mayevskaya – Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Lecturer at the Department of urban and regional development, Brest State A.S. Pushkin University, Brest, Republic of Belarus; ORCID 0009-0006-0448-450X; e-mail maevskaya.anna@inbox.ru

Dmitry O. Petrov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electronic Computing Machines and Systems, Faculty of Electronic Information Systems, Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus; ORCID 0000-0001-6164-9936; e-mail polegdo@gmail.com

Nikolay N. Sheshko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Research Department, Associate Professor of the Department of Environmental Management, Faculty of Engineering Systems and Ecology; Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus; ORCID 0000-0001-6373-8166, Scopus ID 57214638269; e-mail optimum@tut.by

Поступила в редакцию	12.03.2024	**Received**	12.03.2024
Поступила после рецензирования	12.04.2024	**Revised**	12.04.2024
Принята к публикации	20.05.2024	**Accepted**	20.05.2024

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-217
УДК 622.243.2:622.143:553.98(26)(575.4)

Бурение направленной разведочной скважины в мелководье Каспия

А.Р. Деряев
Научно-исследовательский институт природного газа ГК «Туркменгаз», г. Ашгабат, Туркменистан
✉ *annagulyderyayew@gmail.com*

Аннотация
В условиях быстро меняющейся энергетической ситуации важной задачей становится не только достижение экономической выгоды, но и обеспечение энергетической стабильности в регионе и на мировом рынке энергоресурсов. Целью проведенного исследования являлось совершенствование процессов наклонно-направленного бурения разведочных скважин в акватории Каспийского моря в Туркменистане для повышения эффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Среди использованных методов следует отметить аналитический метод, метод классификации, функциональный метод, статистический метод, метод синтеза и другие. В рамках исследования был проведен анализ процессов наклонно-направленного бурения разведочных скважин в акватории Каспийского моря в Туркменистане. Были разработаны и успешно внедрены инновационные технологии, направленные на рационализацию производственных процессов с учетом экологических аспектов. Такой комплексный подход не только повышает техническую готовность энергетических проектов в регионе, но также содействует соблюдению высоких стандартов экологической устойчивости, что является важным элементом в современном энергетическом управлении. Таким образом, изучение этих процессов неотъемлемо связано с формированием устойчивой и эффективной энергетической стратегии для Каспийского региона. Проблематика данного исследования сосредоточена на необходимости эффективного изучения и совершенствования процессов наклонно-направленного бурения разведочных скважин в акватории Каспийского моря в Туркменистане. Основные аспекты включают в себя не только стремление к повышению добычи углеводородов, но и сбалансированное внимание к экологическим аспектам производства. Результаты исследования подтвердили эффективность новых методов, способствующих увеличению добычи углеводородов, сокращению временных затрат и снижению негативного воздействия на природную среду. Это исследование подчеркивает не только важность современных технологических решений в энергетической отрасли, но и их существенный вклад в устойчивое развитие региона и обеспечение энергетической безопасности. Практическое значение данного исследования заключается в предоставлении инновационных решений для совершенствования процессов наклонно-направленного бурения разведочных скважин в акватории Каспийского моря в Туркменистане.

Ключевые слова
энергетическая безопасность, бурение, эффективность, разведка, инновационная технология, скважина, морская среда, Каспий

Для цитирования
Deryaev A.R. Directional drilling of an exploratory well in the shallow waters of the Caspian Sea. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):341–351. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-217

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

Directional drilling of an exploratory well in the shallow waters of the Caspian Sea

A.R. Deryaev
Natural Gas Research Institute, Turkmengaz State Concern, Ashgabat, Turkmenistan
✉ *annagulyderyayew@gmail.com*

Abstract
In the rapidly evolving energy landscape, achieving not only economic benefits but also ensuring energy stability for the region and the global energy resource market has become a key objective. This study aims to optimize the processes of directional and inclined drilling of exploratory wells in the Caspian Sea offshore area in Turkmenistan, focusing on enhancing efficiency and reducing environmental impact. Among the methods used, the analytical method, classification method, functional method, statistical method, synthesis method, and others should be noted. The study involved an analysis of directional drilling processes in exploratory wells in the

© Деряев А. Р., 2024

Caspian Sea offshore area of Turkmenistan. Innovative technologies were developed and successfully implemented to streamline production processes with an emphasis on environmental considerations. This comprehensive approach not only improves the technical readiness of energy projects in the region but also supports adherence to high standards of environmental sustainability, which is a critical component of modern energy management. Thus, the exploration of these processes is inherently connected with the formation of a sustainable and efficient energy strategy for the Caspian region. The study's focus centers on the need for effective analysis and refinement of directional drilling processes for exploratory wells in the Caspian Sea offshore area in Turkmenistan. Key considerations include not only the goal of enhancing hydrocarbon extraction but also maintaining a balanced focus on the environmental aspects of production. The research results confirmed the effectiveness of new methods that support increased hydrocarbon production, reduce time costs, and minimize adverse environmental impacts. This study highlights not only the importance of modern technological solutions in the energy sector but also their substantial contribution to the region's sustainable development and energy security. The practical significance of this study lies in providing innovative solutions to improve directional drilling processes for exploratory wells in the Caspian Sea offshore area of Turkmenistan.

Keywords
energy security, drilling, efficiency, exploration, innovative technology, well, marine environment, Caspian Sea

For citation
Deryaev A.R. Directional drilling of an exploratory well in the shallow waters of the Caspian Sea. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):341–351. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-217

Введение

Изучение процессов наклонно-направленного бурения разведочных скважин в акватории Каспийского моря в Туркменистане является неотъемлемой частью стратегического планирования в энергетической сфере. Эта исследование обретает критическое значение в свете постоянных изменений в энергетической индустрии и необходимости обеспечения устойчивости поставок энергоносителей. Разработка инновационных технологий и рационализация процессов бурения способствуют повышению эффективности добычи углеводородов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Понимание этих процессов обеспечивает экономическую выгоду, а также играет ключевую роль в обеспечении энергетической безопасности региона и мирового рынка энергоносителей в условиях постоянно меняющейся энергетической парадигмы. Такой комплексный подход повышает техническую готовность энергетических проектов в регионе и содействует соблюдению высоких стандартов экологической устойчивости, что является важным элементом в современном энергетическом управлении. Таким образом, изучение этих процессов неотъемлемо связано с формированием устойчивой и эффективной энергетической стратегии для Каспийского региона.

В работе [1] подчеркивается применение инновационных методов наклонно-направленного бурения для повышения эффективности добычи углеводородов в акватории Каспийского моря. Исследование не затрагивает вопросы развития интегрированных систем управления, которые могли бы обеспечить устойчивость нефтегазовой деятельности в долгосрочной перспективе.

В исследовании [2] рассматривается проблема разработки устойчивых методов наклонно-направленного бурения с учётом экологических аспектов, однако в работе не уделяется должного внимания экологическим аспектам и возможным последствиям применения этих методов для морской среды.

Исследование [3] подчеркивает важность использования аналитических методов для оценки воздействия бурения на разнообразие морской жизни, но не рассматривает классификационные методы, которые могли бы помочь адаптироваться к геологическим изменениям и снизить риски.

В работе [4] автор обращает внимание на прогрессивность методов синтеза в наклонно-направленном бурении (ННС), что улучшает добычу углеводородов. Однако детально не представлены расчеты при бурении наклонно-направленных скважин для одновременно-раздельной эксплуатации (ОРЭ).

В исследовании [5] подчеркивается необходимость классификационных методов для эффективного управления процессами наклонно-направленного бурения, но не рассматриваются долгосрочные последствия синтетических подходов и их влияние на экосистему морской среды.

В статье [6] выдвигается ключевой вопрос об эффективности статистических методов при анализе результативности наклонно-направленного бурения, проведенного в рамках аналитического подхода. Исследование не углубляется в вопросы, касающиеся социальной приемлемости статистических методов и их влияния на общественное мнение.

Материалы и методы

Аналитический метод помог в более глубоком понимании сложных взаимосвязей и динамики процессов наклонно-направленного бурения разведочных скважин в акватории Каспийского моря. Этот метод позволил выявить факторы, влияющие на эффективность бурения, и провести системный осмотр данных, что существенно обогатило знание о физических и геологических параметрах, влияющих на успех операций по добыче углеводородов.

С помощью статистического метода были выделены ключевые закономерности и тренды, характеризующие процессы наклонно-направленного бурения разведочных скважин в акватории Каспийского моря. Этот метод позволил исследовать большие объемы данных, полученных в ходе эксплуатации скважин, и выделить статистически значимые параметры, влия-

ющие на эффективность бурения. Статистический метод также предоставил возможность оценить степень надежности и предсказуемости результатов бурения, что является критическим фактором при принятии решений в энергетической индустрии. Полученные статистические данные об общей эффективности бурения, временных затратах и других параметрах стали фундаментальной основой для дальнейшего совершенствования стратегий и тактик, используемых в процессах бурения в данной акватории.

Фукциональный метод позволил выделить основные функциональные зависимости между различными параметрами и процессами, связанными с наклонно-направленным бурением разведочных скважин в акватории Каспийского моря. Этот метод позволил выявить влияние различных переменных на общую эффективность бурения, выявить выгодные значения параметров и определить ключевые факторы, влияющие на успех операций по добыче углеводородов.

Метод дедукции позволил сделать в логическом выводе относительно процессов наклонно-направленного бурения разведочных скважин в акватории Каспийского моря. Применение этого метода позволило выявить причинно-следственные связи между различными аспектами бурения, определить основные принципы и законы, лежащие в основе эффективных технологий. Таким образом, применение метода дедукции обогатило понимание принципов функционирования и управления процессами наклонно-направленного бурения.

Применение метода синтеза позволило разработать инновационные решения и технологии, направленные на рационализацию процессов наклонно-направленного бурения разведочных скважин в акватории Каспийского моря. Этот метод обеспечил системное объединение различных компонентов и переменных, чтобы создать эффективные стратегии, сочетающие в себе техническую эффективность и учет экологических аспектов. Синтетический метод позволил интегрировать передовые технологии, учитывая множество переменных, влияющих на процессы бурения. Разработанные в ходе метода синтеза инновации способствуют не только повышению производительности, но и снижению негативного воздействия на морскую среду. Полученные решения представляют собой комплексный набор мер, включающий технические усовершенствования, управление рисками и соблюдение высоких стандартов экологической устойчивости. Таким образом, метод синтеза выступил важным инструментом в создании комплексных и инновационных подходов к рационализации бурения в данной акватории.

Метод классификации помог в систематизации различных типов геологических формаций и условий, влияющих на процессы наклонно-направленного бурения разведочных скважин в акватории Каспийского моря. Применение этого метода позволило выделить характеристики и особенности различных зон бурения, что существенно облегчило адаптацию стратегий бурения к разнообразным геологическим условиям. Метод классификации также способствовал созданию системы определения эффективных параметров бурения в зависимости от конкретных геологических характеристик. Это позволило улучшить точность и эффективность процессов бурения, снизив возможные риски и улучшив общую эффективность. Полученные результаты классификации являются основой для разработки более точных и адаптивных стратегий наклонно-направленного бурения в условиях акватории Каспийского моря в Туркменистане.

Результаты

В последние десятилетия активность в области разведки и добычи нефти и газа в мировом масштабе неуклонно растет, при этом страны, расположенные вблизи богатых природными ресурсами регионов, играют ключевую роль в этом процессе. Одной из таких стран является Туркменистан, занимающий стратегическое положение на берегах Каспийского моря. Бурение наклонно-направленных разведочных скважин в акватории этого уникального внутреннего моря представляет собой сложную инженерную и экологическую задачу, но также открывает перед страной широкие перспективы в области энергетики [7].

Одним из ключевых аспектов бурения в Каспийском море является использование технологии наклонно-направленных скважин. Эта инновационная методика позволяет бурителям добывать углеводороды из различных точек подводного месторождения, максимизируя эффективность и увеличивая объем добычи. Туркменистан, обладая богатыми запасами природных ресурсов, стремится использовать передовые технологии, чтобы эффективно извлекать и максимизировать потенциал своих месторождений.

Однако, несмотря на перспективы, связанные с бурением наклонно-направленных разведочных скважин в Каспийском море, существуют и трудности. Экологический аспект занимает центральное место, так как даже самые передовые технологии могут представлять угрозу для морской экосистемы. Сбросы буровых жидкостей, выбросы паров и возможные несчастные случаи могут иметь серьезные последствия для окружающей среды и здоровья местных сообществ [8].

Поэтому страны, осуществляющие бурение в акватории Каспийского моря, должны строго соблюдать международные стандарты безопасности и экологии. Разработка и внедрение интегрированных систем контроля, постоянный мониторинг воздействия на окружающую среду, а также активное взаимодействие с научными исследовательскими организациями являются неотъемлемой частью устойчивого развития в этой области [9].

Одной из ключевых задач для нефтегазовой индустрии Туркменистана является увеличение запасов углеводородного сырья. Президент Туркменистана Сердар Бердымухамедов подчеркивает необходимость увеличения добычи углеводородных ресурсов в нефтегазовом секторе, считая это важным фактором для обеспечения стабильности и экономической независимости страны. На современном этапе развития нефтяной промышленности с учетом совершенствова-

ния технологий бурения, разработки нового бурового оборудования и химических реагентов появились возможности использования ранее неизвестных методов и типов при строительстве скважин [10].

Традиционно все разведочные скважины бурились вертикально, однако теперь имеется обоснование для изменения этой стандартной практики. Опыт, полученный при строительстве X1 горизонтальной наклонно-направленной скважины на месторождении Северный Готурдепе в сотрудничестве с компанией «Schlumberger», свидетельствует о возможности проведения разведочного бурения с использованием горизонтальных наклонно-направленных скважин в мелководной части Каспийского моря. Бурение таких скважин разных направлений на существующих искусственных островах позволяет существенно снизить расходы на геологические исследования в полевых условиях, как отмечено в исследовании [11]. В Готурдепинском управлении буровых работ Туркменистана успешно проведен первый опыт бурения горизонтально-направленных скважин. Специалисты Готурдепинского УБР совместно с компанией «Schlumberger» пробурили наклонно-направленную скважину X2 на месторождении Северный Готурдепе, смещенную от вертикального положения на глубине более 1000 м. Собственные силы использовались для бурения до глубины 3000 м, а наклонно-направленная часть колонны была пробурена с участием специалистов Schlumberger на специальном оборудовании.

Скважина успешно достигла заданной глубины в 4850 м (по стволу). Процесс бурения этой скважины на глубину 3000 м соответствует техническому проекту и аналогичен методам, используемым при бурении других скважин в стране. Стартовая точка бурения была установлена на глубине 3000 м для достижения зенитного угла с азимутальным углом 270°. Заданные параметры включают в себя проектный зенитный угол в 45°, максимальную интенсивность набора угла 3,5° на каждые 30 м и смещение забоя скважины на величину 1046,58 м.

Перед началом бурения наклонно-направленного участка на глубине 3000 м произведена замена прежнего бурового раствора на водной основе на систему углеводородного бурового раствора под названием Версадрил. Этот углеводородный состав, разработанный с применением специализированных химических веществ, содержит до 80 % углеводородов и 20 % воды. Главным преимуществом таких растворов является их высокая устойчивость к воде, что приводит к образованию тонких и гибких корок [12]. При этом сохраняются природные коллекторские свойства продуктивной части разреза, происходит существенное снижение перемешивания глинистых веществ в растворе, а также имеются другие благоприятные характеристики.

Применение углеводородных растворов может вызывать сложности при укреплении скважин цементными растворами [13]. Эта проблема возникает при смешивании цементных растворов с углеводородными растворами из-за процесса коагуляции, что приводит к увеличению текучести и уплотнению смеси. Для предотвращения подобных проблем в институте «Небитгазылмытаслама» разработана специальная буферная жидкость на основе углеводородов, успешно примененная при бурении X2 скважины в Северном Готурдепе.

В ходе бурения данной скважины систематически проводились геолого-технологические испытания с использованием новой станции ГТБ «Геотест-5». Прибор «Геотест» автоматически собирает, обрабатывает и визуализирует геологические, геохимические и технологические данные о процессе бурения [14]. Этот инструмент контролирует параметры бурения, оценивает общую ситуацию, выбирает коллекторы в разрезе и определяет их насыщение, предотвращая возможные осложнения и аварии.

Станция представляет собой комплекс из трех основных модулей: технологического, газового каротажа и геологического [15]. Технологический модуль ответственен за управление процессом бурения в режиме реального времени, обеспечивая эффективное и точное управление операциями бурения. Модуль газового каротажа осуществляет запись общей загазованности и проводит анализ состава газовой смеси, что играет важную роль в оценке безопасности и эффективности процесса. Геологический модуль проводит оперативный анализ керна, шлама, бурового раствора и пластовых флюидов, предоставляя ценную информацию для оценки геологических характеристик и состава скважинного материала [16].

Рис. 1 демонстрирует сегмент диаграммы, отражающий технологические параметры в период набора кривизны в процессе бурения, а на рис. 2 представлен фрагмент интервала прямолинейного бурения в наклонной части скважины.

Бурение на глубине 3000 м осуществлялось с использованием следующего оборудования: забойного винтового двигателя диаметром 295,3 мм модели A800M 4553 XP-8,92 м, затем шел колебратор со спиральными лопастями (КЛС) диаметром 269 мм, немагнитный, далее – переводник с обратным клапаном диаметром 206 мм и утяжеленная бурильная труба (УБТ) диаметром 204 мм на протяжении 8,93 м. После этого была установлена телесистема «Telescope-825NF» на 8,06 м, последовательно следовала еще одна утяжеленная бурильная труба диаметром 203 мм на 37,15 м, гидравлический ясс на 10,07 м, еще одна утяжеленная бурильная труба диаметром 203 мм на 9,19 м, переводник, еще один переводник и утяжеленная бурильная труба диаметром 172 мм на 9,34 м. Весь этот комплекс завершался бурильными трубами до устья скважины.

Для поддержания установленных значений интенсивности набора зенитного угла в процессе набора угла применялась следующая методика: на определенном азимуте выполнялось бурение на глубину 4–5 м с закрытым ротором для набора угла, затем производилось бурение еще 4–5 м с вращением ротора и компоновкой низа бурильных колонн для стабилизации зенитного угла. Этот процесс наглядно представлен в столбце 3 на рис. 1 по кривым, отображающим частоту вращения ротора и положение талевого блока.

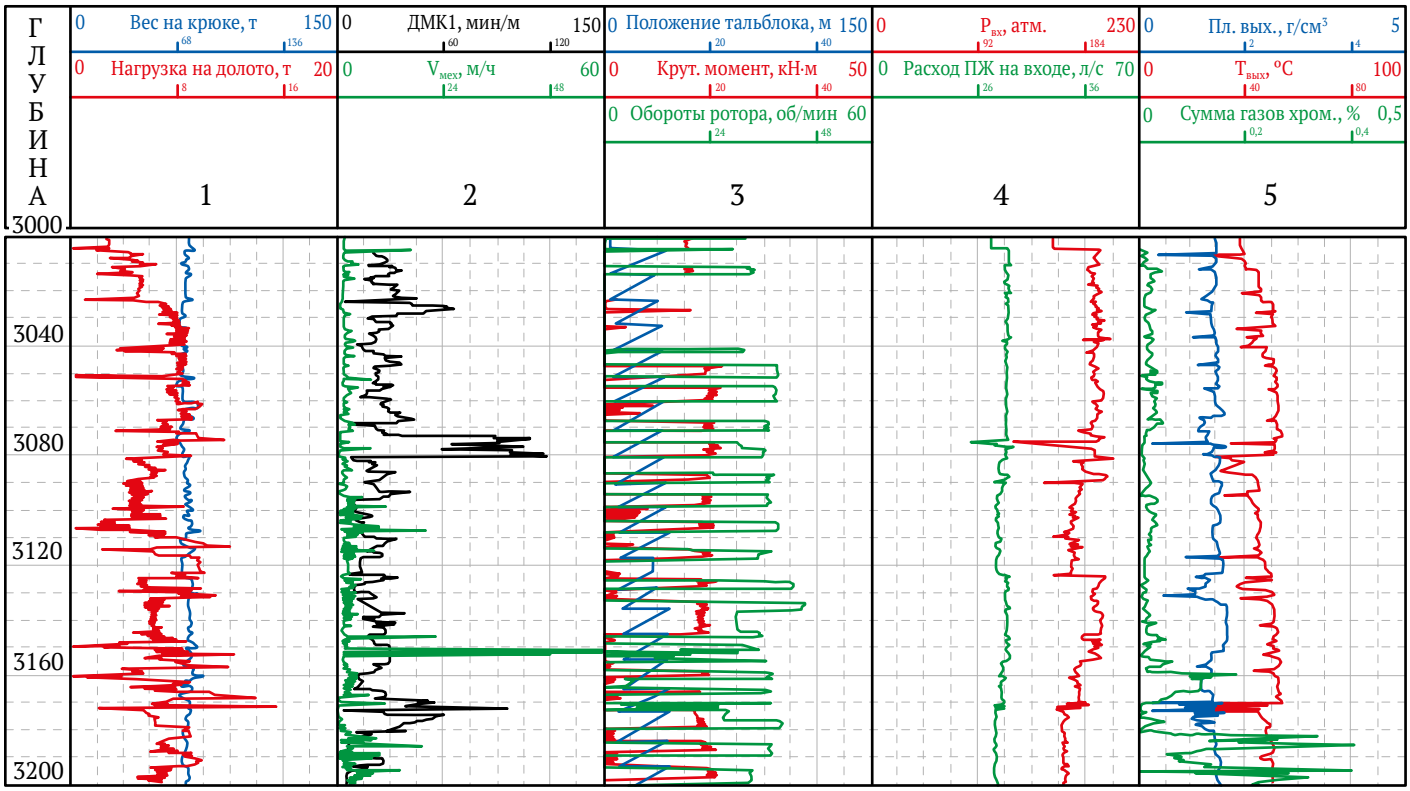


Рис. 1. Параметры процесса углубления скважины в период формирования кривизны [составлено автором]

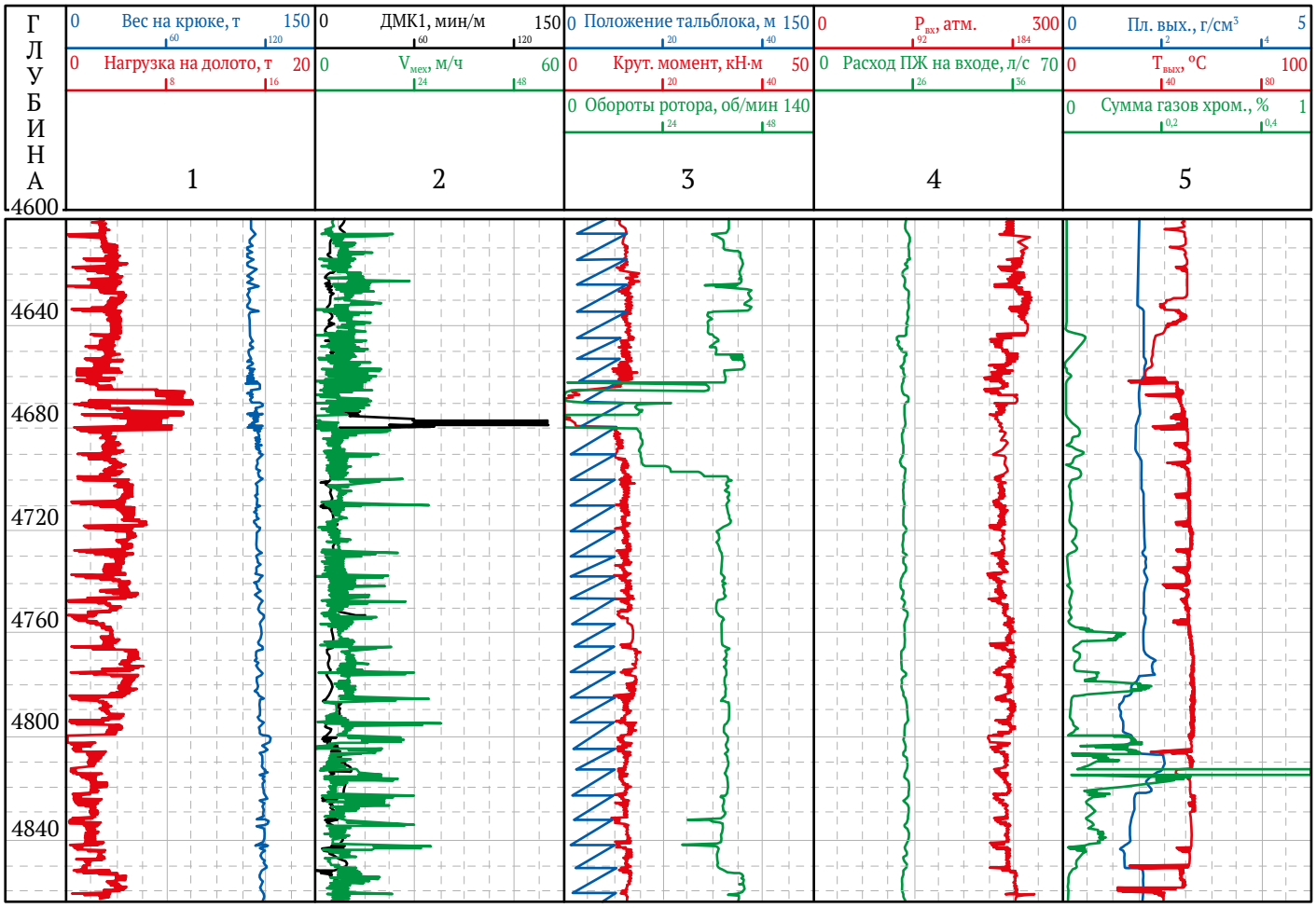


Рис. 2. Параметры процесса углубления скважины в прямолинейном участке наклона [составлено автором]

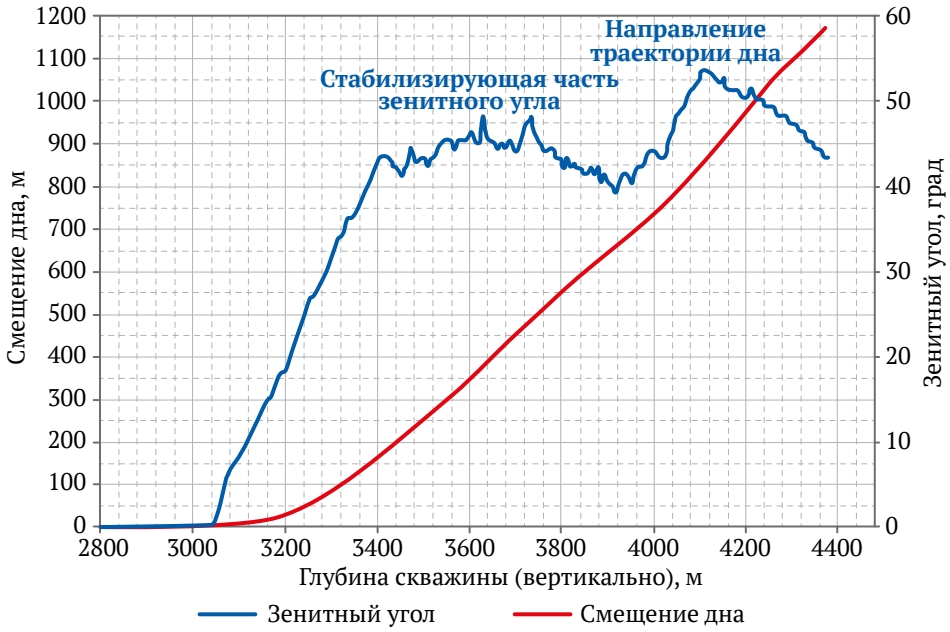


Рис. 3. Изменение угла наклона и смещение забоя в скважине X2 на месторождении Северный Готурдепе [составлено автором]

Технологические параметры углубления скважины в интервале прямолинейной наклонной части были рационализированы с использованием непрерывного вращения ротора и соответствующей конфигурации нижней бурильной колонны (см. рис. 2). Стабильность траектории ствола обеспечивалась изменением положения калибраторов в бурильной системе и заменой долот PDC на шарошечные долота (и наоборот) в прямолинейной части скважины.

На глубине 4450 м (по стволу) в скважину успешно опущена и закреплена обсадная колонна диаметром 244,5 мм. Этот процесс осуществлялся в два этапа. Позднее, когда скважина достигла запланированной глубины, было принято решение продолжить ее углубление для более детального изучения продуктивных пластов горизонта НК3. Глубина скважины была увеличена до 4865 м, после чего была установлена эксплуатационная колонна диаметром 139,7 мм.

В процессе бурения скважины X2 на месторождении Северный Готурдепе максимальное отклонение забоя составило 1167,48 м при магнитном азимуте 266,15°, а максимальный зенитный угол на глубине 4440 м достиг 53,46°. Изменения в вертикальном профиле скважины и зенитного угла наглядно представлены на рис. 3. Добыча из первого объекта (НК3) привела к получению продукта с максимальным дебитом в 80 т в сутки. Результаты анализа этого продукта, выполненные в геохимической лаборатории нефти, газа и горных пород института «Небитгазылмытаслама», представлены в табл. 1.

На графике строительства скважины, представленном на рис. 4, можно выделить перспективы увеличения скорости бурения для данного типа скважин. Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность и продуктивность бурения, является сокращение времени подготовки к бурению наклонной части скважины [17]. В текущем контексте графика видно, что время, затрачиваемое на подготовку к бурению наклонной части, может быть сокращено. Это важное наблюдение, поскольку более эффективная и быстрая подготовка к бурению наклонной части позволит уменьшить временные задержки и улучшить общую производительность процесса бурения.

Этот аспект имеет стратегическое значение, так как увеличение скорости бурения ведет к более быстрой добыче углеводородов, что, в свою очередь, способствует повышению экономической эффективности и обеспечивает более быстрый возврат инвестиций. Такие перспективы отражают стремление индустрии к постоянному совершенствованию технологий и процессов с целью совершенствования производства и увеличения его устойчивости в долгосрочной перспективе.

Таблица 1

Исследование нефти из скважины X2 на месторождении Северный Готурдепе [составлено автором]

Интервал (по стволу), м		4820–4830	4832–4844
Горизонт		НК	
Количество воды, %		47,0	30,5
Плотность нефти, г/см³		0,8545	0,8560
Температура застывания нефти, °C		+4	+4
Вязкость, Па с	20 °C	11,4	11,5
	50 °C	5,0	5,1
Заключение		Жидкий углеводородный флюид – лёгкая нефть	

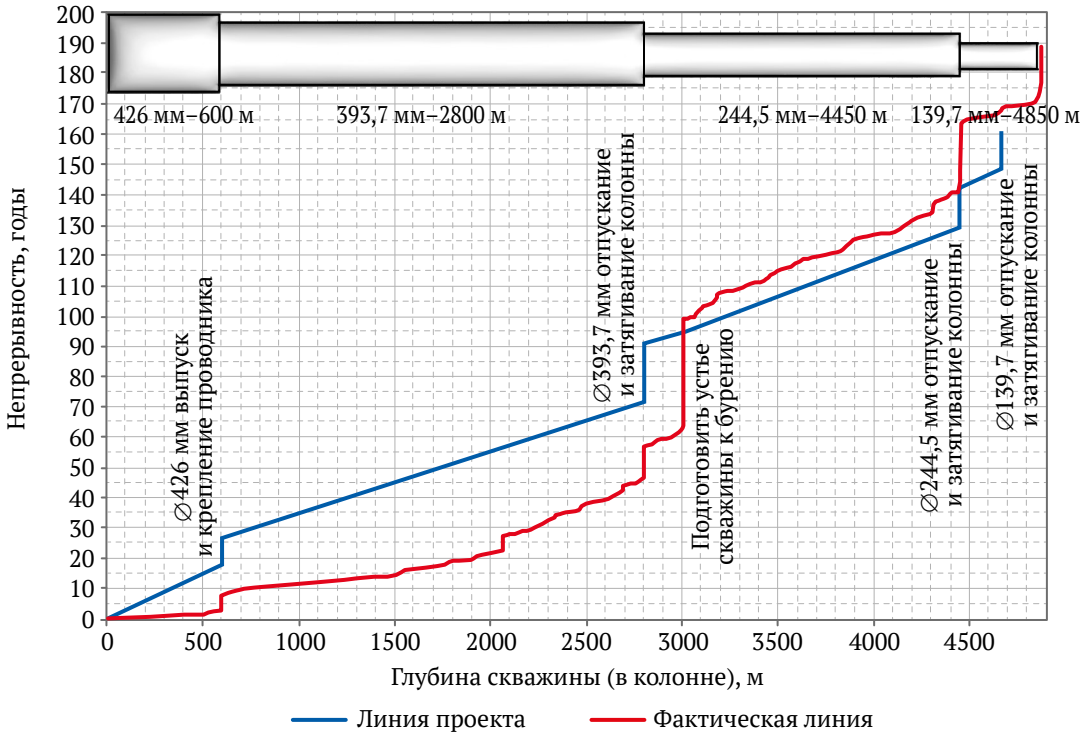


Рис. 4. Диаграмма, отражающая хронологию строительства скважины X2 Северный Готурдепе [составлено автором]

Коммерческая производительность скважины определяется как средняя скорость бурения, достигающая 817 м в месяц, при полностью эффективном времени бурения, равном 100%. Данные по распределению времени между основными операциями следующие: 27,3% времени уходит на бурение; 17,2% – на спуско-подъемные операции; 18,06% – на процессы крепления; 35% – на вспомогательные работы. Эти показатели являются важными для оценки общей эффективности процесса бурения и обеспечивают информацию о временных затратах на каждый этап работы.

В заключение: бурение наклонно-направленных разведочных скважин в акватории Каспийского моря представляет собой сложный, но перспективный путь для страны, стремящейся использовать свои природные ресурсы с максимальной эффективностью. Необходимо находить баланс между экономической выгодой и ответственным использованием природы, чтобы обеспечить устойчивое развитие и сохранение уникальной природной среды этого региона.

Обсуждение результатов

Бурение наклонно-направленных разведочных скважин в акватории Каспийского моря в Туркменистане представляет собой тему, вокруг которой сосредоточены как перспективы, так и вызовы. Этот процесс имеет важное стратегическое значение для Туркменистана, стремящегося максимизировать свой потенциал в области добычи углеводородов.

Туркменистан обладает значительными запасами нефти и газа в акватории Каспийского моря. Бурение наклонно-направленных скважин предоставляет уникальную возможность эффективного извлечения этих ресурсов. Эта технология позволяет добывать углеводороды из различных точек месторождений, что способствует повышению общей добычи и улучшению энергетической безопасности страны.

Использование наклонно-направленных разведочных скважин требует применения передовых технологий и инженерных решений. Внедрение современных методов бурения и геологической разведки может значительно повысить эффективность и точность добычи. Такие инновации способствуют не только увеличению объемов добычи, но и снижению экологического воздействия на окружающую среду.

Необходимо уделять серьезное внимание экологическим и социальным аспектам бурения в акватории Каспийского моря. Сбросы и выбросы могут оказывать негативное воздействие на экосистему моря, а также на здоровье местных сообществ. Поэтому строгое соблюдение международных стандартов, разработка и внедрение экологически чистых технологий и взаимодействие с общественностью являются ключевыми элементами устойчивого подхода к разведке и добыче углеводородов.

Успех бурения в акватории Каспийского моря также зависит от геополитических факторов. Туркменистан должен вести диалог и сотрудничать с соседними странами, имеющими интересы в регионе. Эффективное управление ресурсами и разрешение граничных вопросов способствуют стабильности и увеличению инвестиций в энергетический сектор.

В целом, бурение наклонно-направленных разведочных скважин в акватории Каспийского моря в Туркменистане представляет собой сложную задачу, которая требует интегрированного подхода, баланса

интересов и учета экологических и социальных факторов. Реализация проектов с учетом этих аспектов может стать ключевым элементом устойчивого развития энергетической отрасли в стране.

По результатам последних исследований T. Eren расчеты позиционирования наклонно-направленного бурения играют ключевую роль в обеспечении точности и эффективности данного технологического процесса. Основная цель этих расчетов – точное определение координат скважины на различных глубинах, что позволяет инженерам и буровым специалистам эффективно манипулировать направлением и углом бурения для достижения желаемых целей. В процессе наклонно-направленного бурения инструменты, такие как измерительные гироскопы и акселерометры, используются для определения положения и угла скважины относительно вертикали. Эти данные затем подвергаются сложным математическим расчетам, включающим в себя тригонометрию и геометрию, чтобы определить точные координаты скважины на каждом этапе бурения. Точные расчеты позиционирования обеспечивают не только увеличение добычи углеводородов, но и снижение риска возможных проблем, таких как перекрестное сверление соседних скважин или отклонение от целевого пласта. Это особенно важно в условиях сложных геологических структур или при работе в морской среде [18].

Эти данные согласуются с тезисами, приведёнными в предыдущем разделе. Расчеты позиционирования в наклонно-направленном бурении представляют собой интегральную часть технологии, гарантирующую точность и эффективность процесса. Современные методы и технологии в этой области способствуют рационализации добычи углеводородов и обеспечивают устойчивость в разведке и разработке месторождений.

По определению Fang Peng, исследование ключевых технологий интеллектуального оборудования направленного бурения представляет собой важный аспект в развитии нефтегазовой индустрии. Эти технологии направлены на улучшение процессов бурения, повышение точности и эффективности, а также снижение рисков, связанных с добычей углеводородов. Одним из ключевых элементов является использование современных систем навигации и контроля, включая интегрированные гироскопы, акселерометры и геомагнитные датчики. Интеллектуальное оборудование позволяет в режиме реального времени мониторить параметры бурения, такие как угол наклона, направление и глубина скважины. Алгоритмы обработки данных, основанные на искусственном интеллекте, позволяют предсказывать потенциальные проблемы и предостерегать от них, что существенно улучшает безопасность и производительность бурения. Применение технологий искусственного интеллекта также включает в себя автоматизацию процессов принятия решений на основе собранных данных. Это позволяет операторам реагировать быстро на изменяющиеся условия и корректировать параметры бурения в реальном времени, повышая производственные показатели. Такие системы также минимизируют участие человека в процессе бурения, что уменьшает риски несчастных случаев и ошибок [19].

Следует отметить, что исследование данных технологий направлено на создание устойчивых, интеллектуальных систем бурения, способных адаптироваться к различным геологическим условиям. Эти инновации открывают новые перспективы в разведке и добыче углеводородов, улучшая эффективность и снижая экологическое воздействие на природную среду.

Исследователь H. Li определил, что модифицированный алгоритм дифференциальной эволюции отжига Больцмана представляет собой инновационный подход к задаче инверсии измерений направленного каротажа удельного сопротивления в процессе бурения. Инверсия данных каротажа является ключевым инструментом в геофизическом исследовании, обеспечивая информацию о свойствах пород, скважин и окружающей среды. Алгоритм дифференциальной эволюции в сочетании с методом отжига Больцмана предоставляет эффективный метод рационализации, позволяя исследователям находить предпочтительные значения удельного сопротивления пород в реальном времени. Модификация алгоритма спроектирована для повышения его сходимости и устойчивости в сложных условиях бурения, что делает его особенно полезным в сфере нефтегазового исследования [20].

Можно согласиться с мнением, что применение алгоритма к данным направленного каротажа позволяет точнее реконструировать удельное сопротивление пород в различных глубинах скважины. Это важно для определения состава горных пород, выявления промышленно значимых зон и рационализации процессов добычи углеводородов. Такие инновационные методы инверсии существенно улучшают точность и информативность данных, получаемых в режиме реального времени в процессе бурения.

Исследователь D. Cao показал проведенными работами, что разработка и применение моделей глубокого обучения в реальном времени представляют собой значительный прогресс в области повышения эффективности наклонно-направленного бурения. Эта инновационная технология основана на использовании нейронных сетей для анализа данных, собираемых в процессе бурения, и принятия решений на основе этого анализа. Глубокое обучение позволяет создавать сложные модели, способные автоматически извлекать высокоуровневые признаки из многомерных данных, таких как параметры бурения, геологические характеристики и другие факторы. Эти модели способны предсказывать изменения в геологии скважины и предотвращать потенциальные проблемы в режиме реального времени. Применение моделей глубокого обучения в реальном времени в наклонно-направленном бурении дает возможность более точного контроля и коррекции направления и угла бурения. Это приводит к увеличению производительности, сокращению времени бурения и снижению рисков возможных сбоев [21]. Данные результаты подтверждают приведенное выше исследование, поскольку разработка и применение моделей глубокого обучения в реальном времени в наклонно-направленном

бурении открывают перед индустрией нефтегазового сектора перспективы улучшения процессов, уменьшения затрат и повышения общей эффективности.

Как отмечает B. Harris, численное исследование использования наклонно-направленных скважин для добычи геотермальной энергии из заброшенных нефтяных и газовых скважин представляет собой перспективное направление, объединяющее высокую эффективность и устойчивость в области возобновляемой энергетики. Заброшенные нефтяные и газовые скважины предоставляют уникальную инфраструктуру, которую можно использовать для извлечения геотермальной энергии, принося вторую жизнь этим источникам. Численное моделирование позволяет оценить потенциал геотермальной энергии на различных глубинах заброшенных скважин, учитывая геотермальный градиент и другие геологические параметры. Использование наклонно-направленных скважин дополнительно обогащает этот процесс, позволяя более эффективно извлекать тепловую энергию из горных пород. Такой подход не только обеспечивает возможность повторного использования устаревшей инфраструктуры, но и способствует устойчивому и экологически чистому методу добычи энергии. Энергия, извлекаемая из геотермальных источников, может служить как для поддержки местных энергосистем, так и для сокращения зависимости от традиционных источников энергии [22]. Анализ полученных результатов показывает, что такие исследования важны, поскольку они помогают определить эффективные технологии и геологические параметры для использования заброшенных скважин в целях добычи геотермальной энергии. Это направление может содействовать диверсификации энергетического микса, улучшая его устойчивость и снижая негативное воздействие на окружающую среду.

Исследователь A. Ihnatov определил, что разработка рациональных компоновок низа направленного бурения скважин представляет собой важное направление в инженерии бурения, направленного на рационализацию процессов и повышение эффективности добычи углеводородов. Эта задача требует комплексного подхода, включая изучение геологических особенностей, учет требований к скважине и применение передовых инженерных решений. Рациональные компоновки низа бурового ствола направленных скважин включают улучшенные долота, роторы и другие инструменты, разработанные с учетом конкретных условий бурения. Инновационные геометрические формы и материалы могут повысить сопротивление износу, увеличивая срок службы оборудования и снижая затраты на его обслуживание. Эффективная компоновка низа скважины также способствует более точному управлению направлением бурения, что критически важно для достижения заданных целей в сложных геологических условиях. Интеграция передовых технологий в автоматизацию процессов бурения и контроля параметров ствола дает возможность реагировать на изменения в реальном времени, улучшая точность и предсказуемость [23].

Таким образом, разработка рациональных компоновок низа направленного бурения скважин не только способствует рационализации технологических процессов, но также повышает производительность, снижает риски и содействует устойчивому развитию нефтегазовой промышленности.

Выводы

1. Скважины X1, X2 в Северном Готурдепе успешно выполнили свое назначение в поисково-разведочных работах, подтвердили наличие нефтегазоносных запасов в данной части месторождения без необходимости дополнительных затрат и времени на строительство специальной насыпной площадки. Опыт бурения наклонно-направленной скважины с искривленным стволом на месторождении Северный Готурдепе в Туркменистане дает возможность упростить и ускорить поисково-разведочные работы в акватории Каспийского моря. Эффективное использование существующих насыпных площадок значительно сократило финансовые затраты на геологоразведочные работы на месторождении Северный Готурдепе.

2. Бурение направленных скважин на месторождении, в котором отсутствует сейсморазведочное исследование, обеспечило увеличение значительной части месторождения в рамках поисково-разведочных операций. С точки зрения охраны экосистемы Каспийского моря использование кустового бурения направленных скважин с минимальным созданием новых островов приобретает особую важность.

3. Бурение наклонно-направленных скважин в Каспийском море позволяет эффективно извлекать углеводороды из различных точек месторождений, что важно в условиях сложной геологии. Рационализация процессов бурения с учетом направленности скважины способствует повышению общей производительности и уменьшению временных задержек. Этот подход не только увеличивает добычу энергоресурсов, но также способствует устойчивости производства и повышению экономической эффективности. Развитие технологий, таких как использование современных систем навигации и контроля, дополняет процесс бурения, обеспечивая точность и безопасность.

4. Бурение в акватории Каспийского моря в Туркменистане становится важным компонентом стратегии страны в области энергетики, и эффективное использование наклонно-направленных разведочных скважин отражает постоянное стремление к инновациям и улучшению технологий в нефтегазовой отрасли.

5. Необходимо продолжить дополнительно изучать влияние на окружающую среду и экосистемы процессов бурения наклонно-направленных скважин в акватории Каспийского моря в Туркменистане с целью разработки более экологически устойчивых и социально ответственных подходов к добыче энергоресурсов.

6. Выводы по бурению наклонно-направленной разведочной скважины в акватории Каспийского моря в Туркменистане имеют важное стратегическое значение этого подхода для добычи углеводородов в регионе. Туркменистан, обладая обширными запасами нефти и газа, активно внедряет инновационные методы бурения для максимизации эффективности добычи.

Список литературы / References

1. Гелдимырадов А.Г. Определение параметров пласта на основании исследований кривой изменения давления в условиях газовых скважин Туркменистана. В: *Наука, общество, технологии: проблемы и перспективы взаимодействия в современном мире*. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Петрозаводск, 17 февраля 2022 г. Петрозаводск: МЦНП «Новая Наука»; 2022. С. 150–163. https://doi.org/10.46916/21022022-1-978-5-00174-478-8
Geldimyradov A.G. Determination of formation parameters based on studies of pressure change curve under conditions of gas wells of Turkmenistan. *In: Science, Society, Technology: Problems and Prospects for Interaction in the Modern World.* Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Petrozavodsk, February 17, 2022. Petrozavodsk: International Center for Scientific Partnership "Novaya Nauka"; 2022. Pp. 150-163. (In Russ.) https://doi.org/10.46916/21022022-1-978-5-00174-478-8
2. Пулатов Б.Р. Технологические аспекты и возникающие осложнения при бурении скважин в рапоносных зонах. *Инновации в нефтегазовой отрасли*. 2021;2(3):103–114. URL: https://tadqiqot.uz/index.php/petroleum/article/view/4232/4015
Pulatov B.R. Technological aspects and emerging complications when drilling wells in rapiferous zones. *Innovation in the Oil and Gas Industry.* 2021;2(3):103–114. (In Russ.) URL: https://tadqiqot.uz/index.php/petroleum/article/view/4232/4015
3. Холбаев Б.М., Мухаммадиев Ш.Ш. Выбор типа бурового раствора для бурения скважин. *Innovative Development in Educational Activities*. 2023;2(8):684–686.
Kholbaev B.M., & Muhammadiev Sh.Sh. (2023). Selection of the type of drilling fluid for drilling wells. *Innovative Development in Educational Activities.* 2023;2(8):684–686. (In Russ.)
4. Деряев А.Р. Особенности бурения наклонно направленных глубоких скважин в Туркменистане. *Нефтяное хозяйство.* 2024;(2):43–47. https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-2-43-47
Deryaev A. Features of the construction of directional deep wells in Turkmenistan. *Neftyanoe Khozyaystvo* 2024;(2):43–47. (In Russ.) https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-2-43-47
5. Аманниязов Я., Нурлыев Б., Акмухаммедов М. Буровые растворы. Их роль в процессе бурения. В: *Современные задачи и перспективные направления инновационного развития науки*. Сборник статей по итогам международной научно-практической конференции. Иркутск, 09 февраля 2023 г. Стерлитамак: АМИ; 2023. С. 87–88. URL: https://ami.im/sbornik/MNPK-458.pdf#page=87
Amanniyazov Y., Nurlyev B., Akmukhammedov M. Drilling fluids. Their role in the drilling process. In: *Modern Tasks and Promising Directions for Innovative Development in Science.* Collection of articles based on the results of an international scientific and practical conference. Irkutsk, February 09, 2023. Sterlitamak: AMI; 2023. Pp. 87–88. (In Russ.) URL: https://ami.im/sbornik/MNPK-458.pdf#page=87
6. Гельдиев Ш., Овезмаммедов Б. Анализ и выявление факторов, определяющих влияние развития топливно-энергетического комплекса на развитие Туркменистана. In: *Science Innovations – 2022*. Сборник статей международной научно-практической конференции. Петрозаводск, 31 октября 2022 г. Петрозаводск: МЦНП «Новая Наука»; 2022. С. 46–50.
Geldiev Sh., Ovezmammedov B. Analysis and identification of factors of the impact of the development of the fuel and energy complex on the development of Turkmenistan. In: *Science Innovations – 2022.* Collection of articles of the international scientific and practical conference. Petrozavodsk, October 31, 2022. Petrozavodsk: International Center for Scientific Partnership "Novaya Nauka"; 2022. (In Russ.)
7. Bashir B., Piaskowy M., Alusta G. Overview on directional drilling wells. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2021;16(22):2305–2316.
8. Njuguna J., Siddique S., Kwroffie L.B. et al. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. *Waste Management*. 2022;139:362–380. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025
9. Magana-Mora A., Affleck M., Ibrahim M. et al. Well control space out: A deep-learning approach for the optimization of drilling safety operations. *IEEE Access*. 2021;9:76479–76492. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3082661
10. Деряев А.Р. Бурение горизонтальных скважин в западном Туркменистане. *SOCAR Proceedings Special.* 2023;(2):32–40. https://doi.org/10.5510/OGP2023SI200877
Deryaev A.R. Drilling horizontal wells in Western Turkmenistan. *SOCAR Proceedings Special.* 2023;(2):32–40. (In Russ.) https://doi.org/10.5510/OGP2023SI200877
11. Деряев А.Р. Разработка конструкции скважин для многопластовых месторождений с целью одновременной раздельной эксплуатации одной скважиной. *SOCAR Proceedings Special.* 2022;(1):94–102. https://doi.org/10.5510/OGP20220100635
Deryaev A.R. Development of well design for multi-layer fields for the purpose of simultaneous separate operation of one well. *SOCAR Proceedings.* 2022;(1):94–102. https://doi.org/10.5510/OGP20220100635
12. Mohamed A., Salehi S., Ahmed R. Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: A review. *Geothermics*. 2021;93:102066. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102066
13. Tewari S., Dwivedi U.D., Biswas S. Intelligent drilling of oil and gas wells using response surface methodology and artificial bee colony. *Sustainability*. 2021;13(4):1664. https://doi.org/10.3390/su13041664

14. Li Y., She L., Wen L., Zhang Q. Sensitivity analysis of drilling parameters in rock rotary drilling process based on orthogonal test method. *Engineering Geology*. 2020;270:105576. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105576
15. Sun J., Chen M., Li Q., et al. A new method for predicting formation lithology while drilling at horizontal well bit. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;196:107955. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107955
16. Fabre C. Advances in Laser-Induced Breakdown Spectroscopy analysis for geology: A critical review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2020:166:105799. https://doi.org/10.1016/j.sab.2020.105799
17. Huque M.M., Rahman M.A., Zendehboudi S. et al. Experimental and numerical study of cuttings transport in inclined drilling operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022;208:109394. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109394
18. Eren T., Suicmez V.S. Directional drilling positioning calculations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020;73:103081. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103081
19. Fang P., Yao K., Wang L. et al. Research on key technologies of the ZDY25000LDK intelligent directional drilling equipment. *Coal Geology & Exploration*. 2022;50(1):2. https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.10.0597
20. Li H., Wang H., Wang L., Zhou X. A modified Boltzmann Annealing Differential Evolution algorithm for inversion of directional resistivity logging-while-drilling measurements. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020;188:106916. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.106916
21. Cao D., Hender D., Ariabod S. et al. The development and application of real-time deep learning models to drive directional drilling efficiency. In: *IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition*. Galveston, Texas, USA, March 3–5, 2020. https://doi.org/10.2118/199584-MS
22. Harris B.E., Lightstone M.F., Reitsma S. A numerical investigation into the use of directionally drilled wells for the extraction of geothermal energy from abandoned oil and gas wells. *Geothermics*. 2021;90:101994. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101994
23. Ihnatov A., Koroviaka Y., Rastsvietaiev V., Tokar L. Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling. In: *E3S Web of Conferences. IV International Scientific and Technical Conference "Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons" (GHT 2020)*. 2021;230:01016. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001016

Информация об авторе

Аннагулы Реджепович Деряев – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт природного газа ГК «Туркменгаз», г. Ашгабат, Туркменистан; ORCID 0009-0004-8569-6277, Scopus ID 57929694600, ResearcherID HPB-6027-2023; e-mail annagulyderyayew@gmail.com

Information about the author

Annaguly R. Deryaev – Dr. Sci. (Eng.), Principal Researcher, Natural Gas Research Institute, Turkmengaz State Concern, Ashgabat, Turkmenistan; ORCID 0009-0004-8569-6277, Scopus ID 57929694600, ResearcherID HPB-6027-2023; e-mail annagulyderyayew@gmail.com

Поступила в редакцию	11.02.2024	**Received**	11.02.2024
Поступила после рецензирования	15.05.2024	**Revised**	15.05.2024
Принята к публикации	20.05.2024	**Accepted**	20.05.2024

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обзорная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-248
УДК 553.04:553.43

Минерально-сырьевая база меди России: состояние, возможности развития

Г.Ю. Боярко[1] ✉, **А.М. Лаптева**[2], **Л.М. Болсуновская**[1]

[1] *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация*

[2] *Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, Российская Федерация*

✉ *gub@tpu.ru*

Аннотация

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения максимально полной картины состояния минерально-сырьевой базы меди по Российской Федерации. *Цель*: изучение состояния минерально-сырьевой базы меди России (балансовых запасов, прогнозных ресурсов), пространственного размещения месторождений меди по типам рудных формаций и в пределах рудных провинций, перспектив национального производства добычи меди. *Методы*: статистический, графический, логический. *Результаты*: Представлена сводная карта-схема России, включающая 25 меднорудных провинций и выборку из 150 наиболее значимых месторождений меди различных рудных формаций, перспективных объектов и площадей. Даны характеристики основных рудных формаций, месторождения меди которых имеются в России, а также меднорудных провинций и медных месторождений вне провинций. В России основная добыча сконцентрирована на сульфидных медно-никелевых и медно-колчеданных месторождениях, а также начата добыча на медно-порфировых и медно-скарновых месторождениях. В 2021 г. уровень добычи меди в Российской Федерации составил 1147 тыс. т. Реализация новых подготавливаемых проектов разработки медных месторождений может увеличить уровень годовой добычи России на 635–1053 тыс. т (на 55–91 % от уровня добычи 2021 г.). В России по состоянию на 01.01.2022 г. учтено 102,7 млн т балансовых запасов и прогнозных ресурсов в пересчете на условные запасы – 16,1 млн т. Наибольшие объемы запасов меди приходятся на медно-никелевую (34,4 % от российских запасов), меднопорфировую (23,9 %) формации, формацию медистых песчаников (19,6 %) и медно-колчеданную формацию (14,5 %) и 7,6 % на все остальные рудные формации. По провинциям на Норильско-Хараелахскую приходится 30,9 % от российских запасов, на Кодаро-Удоканскую – 20,3 % на Уральскую – 18,9 %. Отмечается увеличение показателей долей запасов меди для новых провинций: Приморской – 8,29 %, Охотско-Чукотской – 6,23 % и Восточно-Тувинской – 3,7 %. На остальные меднорудные провинции приходится 11,68 % российских запасов меди. В целом имеющихся запасов меди Российской Федерации хватит минимум на 47 лет оптимальной эксплуатации. Наиболее обеспечены запасами разрабатываемые месторождения медно-никелевой и медно-порфировой формаций, а также формации медистых песчаников. Для месторождений медно-колчеданной и медно-скарновой формаций имеет место срабатывание имеющихся запасов балансовых руд. По эксплуатационным регионам достаточная обеспеченность имеется лишь для Норильско-Хараелахской, Кольской и Рудно-Алтайской провинций. В старой горнопромышленной Уральской и новой Восточно-Забайкальской провинциях отмечается серьезное срабатывание запасов балансовых руд. В старой горнопромышленной Северо-Кавказской провинции имеет место высокий уровень обеспеченности, что является следствием малого уровня добычи и наличия невостребованных запасов резервных медных месторождений. Обеспеченность запасов прогнозными ресурсами медно-никелевой формации невысокое, но возможны открытия новых месторождений богатых сливных руд на глубине в пределах Хараелахского и Тангаралахского рудоносных интрузивов. Для медно-колчеданной формации прирост запасов возможен за счет оценки глубоких горизонтов и периферии известных месторождений Уральской провинции, а также поиска новых месторождений на территории Приполярного и Полярного Урала. Для медно-полиметаллической формации известно множество месторождений в старых горнопромысловых Рудно-Алтайской, Салаирской и Северо-Кавказской провинциях, а также при исследовании новых Восточно-Тувинской и Охотско-Чукотской провинций. Для медно-порфировой формации увеличились масштабы геологоразведочных работ в Восточно-Тувинской, Приморской и Охотско-Чукотской провинциях, где имеются все предпосылки к обнаружению новых, в том числе крупных медно-порфировых месторождений. Для формации медистых песчаников возможен прирост запасов в пределах Кодаро-Удоканской, Игарской, Билякчанско-Приколымской и Шорско-Хакасской провинциях. В условиях развития новых технологий подземного выщелачивания меди становятся привлекательными поиски, разведка и вовлечение в эксплуатацию небольших месторождениий медистых песчаников в Приуральской и Донецкой провинциях. В учтенных балансовых запасах меди России отсутствуют объекты месторождений формации самородной меди в базальтоидах, известные в пределах Шорско-Хакасской, Норильско-Хараелахской и Билякчанско-Приколымской провинций.

© Боярко Г. Ю., Лаптева А. М., Болсуновская Л. М., 2024

Ключевые слова
медь, руда, стратегическое сырье, рудные формации, месторождение, провинция, регион, запасы, ресурсы, добыча, прогнозирование, национальные проекты, Россия

Для цитирования
Boyarko G.Y., Lapteva A.M., Bolsunovskaya L.M. Mineral resource base of Russia's copper: current state and development prospects. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):352–386. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-248

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Review paper

Mineral resource base of Russia's copper: current state and development prospects

G.Y. Boyarko[1] ✉, **A.M. Lapteva**[2], **L.M. Bolsunovskaya**[1]
[1] *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*
[2] *Russian Scientific Research Institute of Mineral Raw Materials, Moscow, Russian Federation*
✉ *gub@tpu.ru*

Abstract
This study addresses the need for a comprehensive understanding of current state of Russia's cupper mineral resource base. *Its objective* is to assess Russia's copper reserves (balance reserves and forecast resources), analyze the spatial distribution of copper deposits by ore formation types and across ore provinces, and evaluate prospects for sustaining national copper production. Methods: The study employs statistical, graphical, and logical analysis methods. *Results:* The research presents a consolidated map of Russia, highlighting 25 copper provinces and 150 significant copper deposits across various ore formations, as well as prospective sites and areas. Key characteristics of Russia's main ore formations, copper ore provinces, and outlying copper deposits are detailed. Copper production in Russia is currently concentrated in sulfide copper-nickel and copper-pyrite deposits, with emerging mining operations in copper-porphyry and copper-skarn formations. In 2021, copper production in Russia reached 1,147 Kt. Upcoming projects to develop copper deposits could increase annual production by 635–1,053 Kt, equivalent to a 55–91% rise over 2021 levels. The total estimated balance reserves and forecast resources amount to 102.7 million tons, with conditional reserves accounting for 16.1 million tons. The largest copper reserves are found in copper-nickel formations (34.4%), copper-porphyry formations (23.9%), copper sandstones formation (19.6%), and copper-pyrite formation (14.5%), with all other formations contributing 7.6%. Key provinces include Norilsk-Kharayelakh (30.9% Russian reserves), Kodar-Udokan (20.3%), and the Urals (18.9). The share of reserves is growing in newer provinces: Primorsky (8.29%), Okhotsk-Chukotka (6.23%), and East Tuvinian (3.7%). Remaining copper mining provinces account for 11.68% of reserves. Current reserves are estimated to suffice for at least 47 years of optimal extraction. The most substantial reserves are associated with copper-nickel, copper-porphyry, and copper sandstone formations, whereas balance ore reserves in copper-pyrite and copper-skarn formations are nearly exhausted. Sufficient reserve security is available in the Norilsk-Kharayelakh, Kola, and Rudny Altai provinces. However, sugnificant reserve is observed in the traditional Ural and emerging East Trans-Baikal provinces. In the North Caucasus province, a high security results in low production levels and underutilized reserve deposits. The copper-nickel formation's reserve availability remains low, though new rich ore deposits may exist at greater depths within the Kharaelakh and Tangaralakh ore-bearing intrusions. Copper-pyrite formation reserves may expand with further exploration of deep horizons and the periphery of known deposits in the Ural province, alongside new deposits discoveries in the Circumpolar and Polar Urals. For copper-polymetallic formation, extensive deposits exist in old Ore-Altai, Salair, and North Caucasian provinces, with promising potential in the new East Tuvinian and Okhotsk-Chukotka provinces. Exploration for porphyry copper has intensified in the East Tuvinian, Primorsky, and Okhotsk-Chukotka provinces, indicating strong potential for discovering new large porphyry copper deposits. Additional reserves of copper sandstone formation may be developed within the Kodar-Udokanskaya, Igarskaya, Bilyakchan-Kolyma, and Shoria-Khakass provinces. New technology for underground copper leaching opens opportunities for exploring and utilizing smaller copper sandstone deposits in the Pre-Ural and Donetsk provinces. The recorded cooper balance reserves in Russia do not yet account for native copper deposits in basaltoid formations within the Shoria-Khakass, Norilsk-Kharayelakhskaya, and Bilyakchan-Kolyma provinces.

Keywords
copper, ore, strategic raw materials, ore formations, deposit, province, region, reserves, resurce, mining, forecasting, national projects, Russia

For citation
Boyarko G.Y., Lapteva A.M., Bolsunovskaya L.M. Mineral resource base of Russia's copper: current state and development prospects. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):352–386. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-248

Введение

Медь занимает третье место по объемам производства и потребления среди базовых промышленных металлов (после железа и алюминия) [1] и используется в многочисленных электротехнических приложениях как проводник электричества, в сплавах различного назначения (латунь, бронза, мельхиор и др.), в химических соединениях меди для производства антисептиков, микроудобрений, катализаторов окислительных процессов и других назначений [2]. Медь включена в национальный перечень основных видов стратегического минерального сырья (Распоряжение Правительства РФ от 30.08.2022 № 2473-р), а в Стратегии развития минерально-сырьевой базы России она относится к первой группе полезных ископаемых, запасы которых при любых сценариях развития экономики удовлетворят необходимые национальные потребности до 2035 г. и в последующий период (Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р) [3]. Аналогичный статус меди заявлен в США, Европейском Союзе, Канаде, Китае и Индии [4], но в некоторых странах (Японии, Южной Корее, Австралии) она включена в перечень критических (импортозависимых) товарных продуктов [5, 6].

Мировое потребление и соответственно предложение первичной меди увеличилось с 2000 г. к 2021 г. на 60%, а мировые запасы в 2,6 раза. В первую очередь это результат бурного роста экономики Китая и формирования новой мировой политики «зеленой» экономики с расширением доли возобновляемой энергетики в мировом топливном балансе и решением задач по снижению выбросов углекислого газа при производственных процессах и жизнедеятельности населения [1, 2, 7]. Медь используется во всех основных технологиях низкоуглеродной энергетики (обмотки ветрогенераторов, двигатели электромобилей и др.). Даже спад мировой экономики и политическая неопределенность не сказываются на темпах роста потребления меди, причем имеется тенденция увеличения отставания его мирового предложения ввиду медленных темпов ввода в эксплуатацию новых крупных добывающих производств [8].

Россия располагает крупной сырьевой базой меди, занимая 2-е место в мире по запасам, 6-е место по товарному производству и 3–4-е место по объемам экспорта[1]. Если в 1990-е годы ввиду спада внутреннего потребления в условиях переходной экономики российская добыча меди упала с 800 тыс. т в 1991 г. до уровня 500–580 тыс. т/год в 1995–2012 гг., то на фоне роста мировых цен начиная с 2013 г. начался рост добычных работ вплоть до 1028 тыс. т в 2019 г.[2] Рост добычи и производства рафинированной меди в этот период сопровождался увеличением доли экспорта от производства с 20–30% в 2011–2013 гг. до 60–70% в 2015–2020 гг. Минерально-сырьевая база меди и производственные мощности России закрывают все национальные потребности и имеют значительный экспортный потенциал. Учитывая мировые тенденции роста потребления меди в ближайшем будущем, весьма перспективно развивать ее национальную добычу с целью увеличения российской доли в мировой торговле медными товарными продуктами.

Методика исследований

С целью изучения российской минерально-сырьевой базы меди были собраны данные по российской добыче меди за период 2002–2021 гг., по запасам и прогнозным ресурсам месторождений меди по состоянию на 01.01.2021 г. Работа с источниками информации: Государственные доклады Министерства природных ресурсов и экологии России[3], Справки о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы регионов Российской Федерации[4], Паспорта Государственного кадастра месторождений и проявлений полезных ископаемых РФ[5] и публикации по ресурсам меди в открытой печати. Единицы измерения запасов и добычи меди – метрические тонны 100% Cu. Объемы прогнозных ресурсов меди приводятся по категориям в заявленных абсолютных величинах, а при суммировании – в пересчете на условные запасы категории C_2 с учетом поправочных коэффициентов для разных категорий. На общую схематическую карту России сведены наиболее значимые месторождения меди различных рудных формаций, перспективные объекты и площади для геологоразведочных работ на медь, ранее выделяемые рудные провинции меди и предлагаемые к выделению новые меднорудные провинции. Определены ограничения разработки новых месторождений меди по природоохранным требованиям. Рассмотрены возможности развития медно-добывающей отрасли с применением инновационных технологий добычи и переработки медных руд. Произведен анализ состояния балансовых запасов и прогнозных ресурсов по рудным формациям и меднорудным провинциям.

Состояние минерально-сырьевой базы меди России

Россия занимает 2-е место в мире по запасам после Чили, 6-е место по добыче из недр после Чили, Перу, Китая, Конго и США, 5-е место по производству рафинированной меди после Китая, Чили, Японии и ДР Конго, 3–4-е место по объемам экспорта (со-

[1] Государственные доклады о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2002-2021 гг. МПР РФ, 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

[2] Там же.

[3] Там же.

[4] Справки о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы регионов Российской Федерации (по состоянию на 01.01.2022 г.). СПб.: ВСЕГЕИ, Государственное задание от 14.01.2022 №049-00018-22-01, 2022. URL: http://atlaspacket.vsegei.ru/?v=msb2021#91474d2e700eb6c90

[5] Паспорта месторождений меди. Российский федеральный геологический фонд. Единый фонд геологической информации о недрах. Реестр первичной и интерпретируемой информации. 2023. URL: https://efgi.ru/

вместно с Японией) после Чили и ДР Конго[6] [9]. Основу сырьевой базы меди России составляют объекты сульфидного медно-никелевого, медно-порфирового медно-колчеданного и стратиформного геолого-промышленных типов. Основная добыча сконцентрирована на сульфидных медно-никелевых и медно-колчеданных месторождениях, а также увеличиваются объемы добычи на медно-порфировых объектах[7].

На основе собранных данных составлены:

– обзорная карта меднорудных провинций и основных месторождений меди России (рис. 1);

– диаграммы объемов и долей добычи меди за 2002–2021 гг. по типам рудных формаций (рис. 2) и меднорудным провинциям (рис. 7);

– диаграммы по долям объемов запасов и добычи меди (2021 г.) по типам рудных формаций (рис. 3) и меднорудных провинций (рис. 6);

– диаграмма по объемам балансовых запасов и прогнозных ресурсов по типам рудных формаций (рис. 4);

– диаграммы по объемам запасов и добычи меди по провинциям (рис. 6).

Ниже приводятся характеристики меднорудных формаций, известных на территории Российской Федерации, и месторождений меди в пределах и за пределами выделенных меднорудных провинций.

Формации месторождений медных руд

Разработка медных месторождений известна еще с бронзового века и на протяжении всей истории добычи медных руд происходило исследование геологических меднорудных формаций с позиции их привлекательности и значимости в медно-добывающей отрасли.

Первоначально объектами разработки медных руд становились близповерхностные богатые медью руды на месторождениях медно-скарновой, медно-колчеданной формаций и формации медистых песчаников. Еще можно выделить значимую *формацию зоны вторичного обогащения гипергенной медью*, с богатыми рудами, формировавшимися в близповерхностных условиях на месторождениях практически всех меднорудных формаций, зачастую за счет рядовых и бедных медью руд. Если раньше они были целью и предметом первоочередной разработки этих богатых медью вторичных руд, то к настоящему времени они стали большой редкостью, и эта рудная формация по факту стала экзотикой. Ввиду первоначального преобладания мелких масштабов близповерхностной кустарной разработки объектами действия медных промыслов становились многочисленные мелкие по размеру месторождения, а на средних и крупных медных месторождениях имело место локальное их поражение горными выработками с выхватыванием доступных и наиболее богатых медью фрагментов.

С увеличением потребительского спроса на медь в эксплуатацию стали вовлекать более крупные по запасам месторождения богатых руд медно-колчеданной и медно-никелевой формаций. Было отработано значительное по запасам уникальное и экзотическое месторождение самородной меди в базальтоидах (месторождение Верхнего Озера, США).

Развитие технологий флотационного обогащения сульфидных руд позволило вовлечь в эксплуатацию месторождения с вкрапленной медной минерализацией с относительно бедными медными рудами, но со значительными объемами рудной массы. В производство были вовлечены месторождения медно-порфировой формации, которые к настоящему времени лидируют по объемам поставок меди на рынок. Флотационные технологии позволили также извлекать медный концентрат на месторождениях других рудных формаций с попутной медной минерализацией (полиметаллическая, малосульфидная платинометалльная, кварцево-сульфидная, карбонатитовая и др.). Новые технологии обогащения (флотации, гидрометаллургии) позволили вовлечь в эксплуатацию также вкрапленные медные руды на месторождениях формаций, в которых ранее разрабатывались только богатые руды (медно-никелевая, медно-колчеданная, медистых песчаников).

Гидрометаллургические технологии кучного и подземного выщелачивания позволяют вовлекать в эксплуатацию принципиально новые объекты формации техногенных месторождений (отвалов, дренажных вод горных выработок и др.), а также ранее малопривлекательные мелкие месторождения медных руд и медьсодержащих образований.

Медно-никелевая формация представляет собой специфичную мафит-ультрамафитовую магматическую формацию, где в процессе внедрения магм происходила дифференциация и ликвация расплава на силикатную и сульфидную жидкости с концентрированием сульфидного расплава в придонных частях магматических интрузивов [10–12]. При этом формируются пласто-, плито- и линзообразные залежи богатых сливных руд и горизонтов (рифов) вкрапленной медно-никелевой минерализации. Дифференциация и кристаллизация расплава может происходить неоднократно, но наиболее крупные месторождения преимущественно богатых сливных медно-никелевых руд формируются в течение одного длительного цикла в структурах окраин платформ (норильский тип) и кратонов (печенгский тип) [13]. В условиях множественности циклов дифференциации и ликвации расплава происходит формирование пластов и горизонтов преимущественно вкрапленной медно-никелевой минерализации, а также платинометалльной минерализации с попутным медно-никелевым оруденением [14]. Такие медно-никелевые месторождения встречаются и в структурах окраин платформ кратонов (мончегорский тип в ультрамафитах), и преимущественно в металлогенических орогенных зонах подвижных поясов в мафитовых комплексах [13].

[6] U.S. Geological Survey (USGS). URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/

[7] Государственные доклады о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2002-2021 гг. МПР РФ, 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

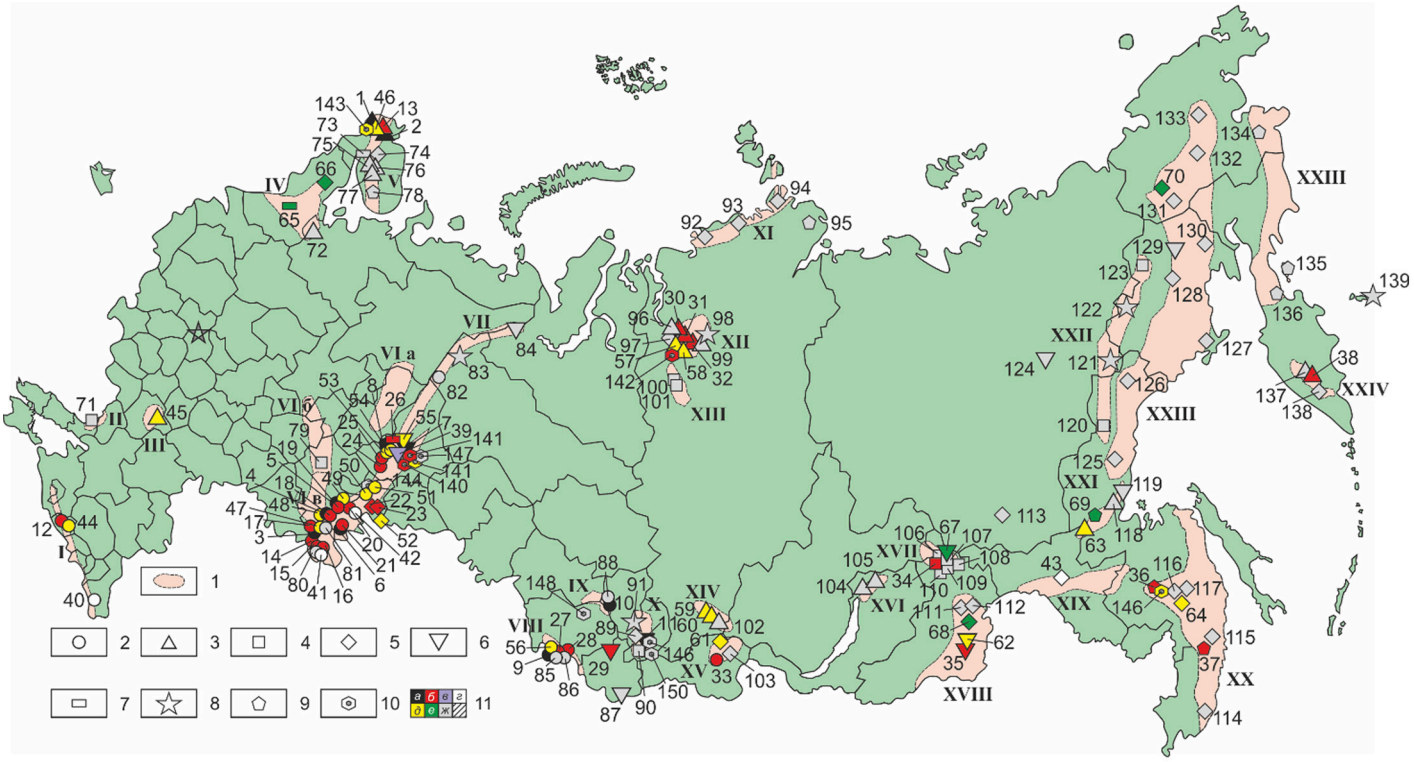


Рис. 1. Меднорудные провинции, месторождения меди по геолого-технологическим типам и состоянию их вовлеченности в производство:

1 – меднорудные провинции; 2–10 – геолого-технологические типы медных месторождений (2 – медно-колчеданные и колчеданно-полиметаллические, 3 – медно-никелевые, 4 – медистые песчаники, 5 – медно-порфировые, 6 – медно-скарновые, 7 – медно-железорудные магматические, 8 – самородной меди, 9 – с попутной медной минерализацией, 10 – техногенные); 11 – состояние вовлеченности медных месторождений в производство: а – отработанные и остановленные (законсервированные), б – разрабатываемые открытым и подземным способами, в – разработка геотехнологическим способом, г – находящиеся в нераспределенном резерве, д – подготавливаемые к освоению, е – на стадии геологоразведочных работ, ж – на стадии поисков и оценки участков и площадей. Меднорудные провинции: I – Северо-Кавказская, II – Донецкая, III – Воронежская, IV – Карельская, V – Кольская, VI – Приуральская (VIа – уфимский ярус, VIб – казанский ярус, VIв – татарский ярус), VII – Уральская, VIII – Рудно-Алтайская, IX – Салаирская, X – Шорско-Хакасская (Мрассу-Батеневская), XI – Центрально-Арктическая, XII – Норильско-Хараелахская, XIII – Игарская, XIV – Саянская, XV – Восточно-Тувинская, XVI – Северо-Байкальская, XVII – Кодаро-Удоканская, XVIII – Восточно-Забайкальская, XIX – Умлекано-Огоджинская, XX – Приморская, XXI – Джугджурская, XXII – Билякчанско-Приколымская; XXIII – Охотско-Чукотская, XIV – Корякская, XV – Камчатская. Медные месторождения: 1–11 – отработанные, остановленные: 1 – Котсельваара-Каммикиви, Семилетка, 2 – Тундровое, Заполярное, 3 – Дергамышское, 4 – Сибайское, 5 – Учалинское, 6 – Александринское, 7 – Меднорудянское, Турьинская группа, 8 – Тарньерское, 9 – Змеиногорское, 10 – Каменушинское, 11 – Кеялых-Узень, Глафиринское, Юлия; 12–38 – месторождения разрабатываемые: 12 – Урупское, 13 – Ждановское, 14 – Гайское, 15 – Осеннее, 16 – Весенне-Аралчинское, Джусинское, 17 – Юбилейное, 18 – Камаганское, 19 – Озерное, Западно-Озёрное, 20 – Талганское, Узельгинское, Молодежное, 21 – Чебачье, 22 – Томинское, 23 – Михеевское, 24 – Сафьяновское, 25 – Ново-Шемурское, 26 – Волковское, 27 – Карбалихинское, Зареченское, 28 – Степное, 29 – Синюхинское, 30 – Октябрьское, 31 – Талнахское, 32 – Норильск-I, 33 – Кызыл-Таштыгское, 34 – Удоканское, 35 – Быстринское, 36 – Правоурминское, Фестивальное, Соболиное, Перевальное, 37 – Восток-2, 38 – Шануч; 39 – разработка геотехнологическим способом (Гумешевское); 40–43 – месторождения в резерве, нераспределенные: 40 – Кизил-Дере, 41 – Комсомольское, 42 – Новое, Южное, 43 – Иканское; 44–64 – месторождения, подготавливаемые к освоению: 44 – Худесское, Скалистое, Первомайское, 45 – Еланское, Ёлкинское, 46 – Быстринское, Верхнее, Спутник, 47 – Подольское, Северо-Подольское, 48 – Вишневское, 49 – Ново-Учалинское, 50 – Султановское, 51 – Маукское, 52 – Тарутинское, 53 – Саумское, 54 – Северо-Калугинское, 55 – Северное-3, 56 – Таловское, 57 – Масловское, 58 – Черногорское, 59 – Кингашское, 60 – Верхнекингашское, 61 – Ак-Сугское, 62 – Култуминское, 63 – Кун-Манье, 64 – Малмыжское; 65–70 –месторождения на стадии геологоразведочных работ: 65 – Викша, 66 – Лобаш-1, 67 – Чинейское, участок Рудный, 68 – Лукагонское, 69 – Кондер, участок Аномальный, 70 – Песчанка; 71–136 – перспективные площади, участки поисков и оценки: 71 – Бахмутская, 72 – Волошовское, 73 – Колвицкое, 74 – Пеллапахк, 75 – Поаз, Нюд, 76 – Ниттис-Кумужья-Травяная, Сопча (рудный пласт 330), 77 – Арваренч, Морошковое озеро, 78 – Федорово-Панские тундры, 79 – Белебеевская (Карсакские рудники), 80 – Блявинская, 81 – Мембетовская-Карагайская, Новопетровская, 82 – Вольинская, Грубеинско-Тыкотловская, 83 – Хултымьинская, 84 – Новогоднее Монто, 85 – Новоникольская, 86 – Холодная, 87 – Уландрыкское, 88 – Ускандинское, 89 – Базинское, 90 – Мало-Лабышское, 91 – Тайметское, 92 – Убойнинская, 93 – Верхнетарейское, 94 – Порфировая, 95 – Надежда, Павловский, Кошка, 96 – Моронговская, 97 – Болгохтохское, 98 – Арылахское, 99 – Самоедовская, 100 – Гравийское, 101 – Сухарихинское, 102 – Кахтарминская, 103 – Кызык-Чадрское, 104 – Йоко-Довыренское, 105 – Чайское, 106 – Ункурская, 107 – Красное, 108 – Бурпалинское, 109 – Сакинское, 110 – Правоингамакитское, 111 – Западно-Мостовская, 112 – Боровая, 113 – Рябиновое, Ыллымахское, Морозкинское, 114 – Лазурное, 115 – Малахитовое, 116 – Центрально-Анаджакская, 117 – Понийская, 118 – Няндоминское, 119 – Малокомуйское, 120 – Билякчанское, Северный Уй, Боронг, 121 – Росомаха, Джалкан, Харат, 122 – Батько, 123 – Ороек, Лучистое, Весновка, 124 – Агылкинское, 125 – Челасинская, 126 – Дарпирчанская, 127 – Шхиперская, 128 – Бебекан, 129 – Медь-Гора, 130 – Мечивеемская, 131 – Находка, 132 – Кавральянская, 133 – Танюрерская, 134 – Майницкая, 135 – Валагинско-Карагинская, 136 – Снежное, 137 – Квинум, Кувалорог, 138 – Кирганик, 139 – Береговое; 140–149 – техногенные месторождения: 140 – отвал шлака Среднеуральского медеплавильного завода, 141 – Черемшанское шламохранилище Высокогорского рудника, 142 – хвостохранилище Норильской ОФ, 143 – отвалы Аллареченского месторождения, 144 – отвал шлака Карабашского медного комбината (МК), 145 – отвал огарков Кировградского медного комбината (МК), 146 – отвалы Солнечного ГОКа, 147 – хвостохранилище Красноуральской обогатительной фабрики (ОФ), 148 – отвал шлака Локтевского сереброплавильного завода, 149 – отвалы Туимской ОФ, 150 – отвалы Майнской ОФ

Следует отметить, что в месторождениях преимущественно вкрапленных руд отношение содержаний никеля и меди возрастает с 0,5–1,0 иногда до высоких значений (до 6,5 на месторождении Шануч), снижая тем самым экономическую значимость меди на этих объектах, а также возрастает концентрация и экономическая значимость металлов платиновой группы. Медно-никелевая минерализация присутствует также как попутный компонент в месторождениях *малосульфидной платинометалльной формации*.

Интерес к медно-никелевой формации формировался первоначально исходя из значимости никелевой ее составляющей, а медь в ней была вторичным, иногда побочным продуктом. Но в результате вовлечения в 1960–1970-х годах в эксплуатацию богатых руд крупных Норильских месторождений медно-никелевая формация стала лидером в балансе национальной добычи меди, составляя в 2000-х годах 60–65% российской добычи. Но с учетом некоторого сокращения объемов добычи медно-никелевых руд (с 500 тыс. т/год до 430 тыс. т в 2021 г.) и вводом в эксплуатацию новых медных месторождений медно-порфировой и медно-скарновой формаций доля медно-никелевой формации уменьшилась к 2021 г. до 36,5% от российской добычи (см. рис. 2, 3). Тем не менее по учтенным запасам и ресурсам меди на медно-никелевую формацию приходится 34,4% балансовых запасов и 15,8% приведенных к условным запасам прогнозных ресурсов [9], т.е. лидирующее положение этой формации по запасам сохраняется (см. рис. 3, 4).

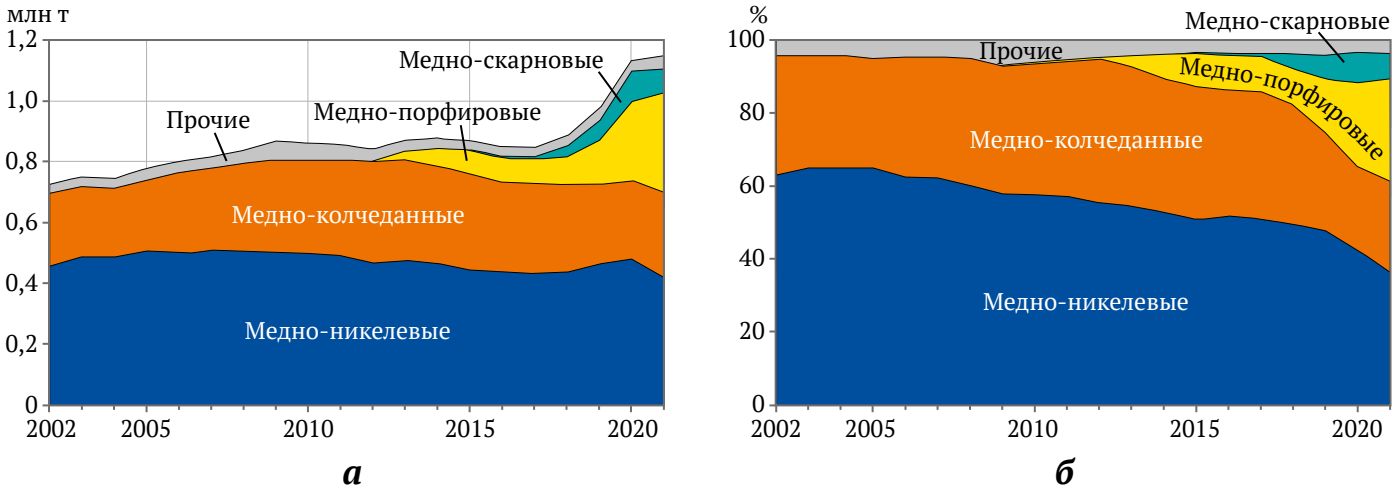


Рис. 2. Динамика добычи меди в России за 2002–2021 гг. по типам медно-рудных формаций:
а – объемы, млн т; *б* – доли от суммарной добычи по Российской Федерации, %

По данным Государственных докладов Минприроды (https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/)

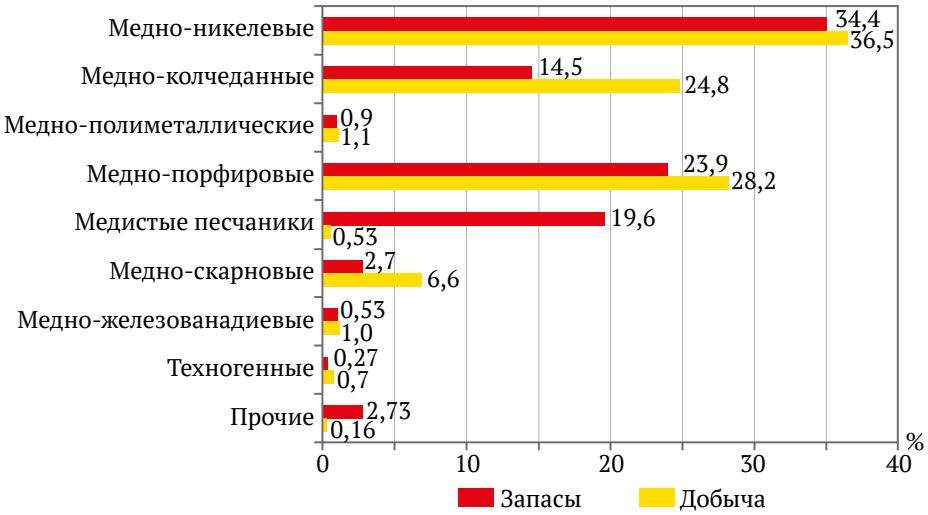


Рис. 3. Доли объемов запасов и добычи (2021 г.) меди по типам меднорудных формаций от общих показателей по Российской Федерации, %

По данным Государственных докладов Минприроды (https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/), Справок о состоянии и перспективах МСБ регионов РФ (http://atlaspacket.vsegei.ru/?v=msb2021#91474d2e700eb6c90) и Я.В. Алексеева [9]

Месторождения богатых (сливных) медно-никелевых руд находятся в Норильско-Хараелахской и Кольской провинциях, месторождения преимущественно вкрапленных медно-никелевых руд – в Воронежской, Кольской, Саянской, Северо-Байкальской и Джугджурской провинциях, а месторождения малосульфидной платинометалльной формации с попутной медно-никелевой минерализацией – в Карельской, Карякской и Камчатской провинциях.

Медно-колчеданная формация представляет собой смешанную группу месторождений вулканогенного гидротермально-осадочного и гидротермально-метасоматического генезиса сливных сульфидных руд с ведущей ролью пирита и медных сульфидов [15, 16]. Морфологически они представляют собой пласто- и линзообразные залежи массивных сульфидных руд, зачастую сопровождаемые ореолами вкрапленной сульфидной минерализации. Выделяются медно-колчеданный тип месторождений в базальтоидных формациях эвгеосинклиналей, медно-цинково-колчеданный тип в риолит-базальтовых формациях эвгеосинклиналей и специфичный кипрский тип кобальтоносных медно-колчеданных месторождений [17]. Следует отметить, что имеют место сходство и парагенетическая связь месторождений медно-колчеданной и медно-никелевой формаций [18].

Начиная с XIX в. и до 1950-х годов продукция с месторождений медно-колчеданной формации лидирует в российской добыче меди, уступив в дальнейшем лидерство медно-никелевой формации. В 2000–2020-е годы уровень добычи из медно-колчеданных месторождений составляет 230–330 тыс. т/год (23–38 % от российской добычи) и в 2021 г. 285 тыс. т (24,8 %), см. рис. 2, 3. По учтенным запасам и ресурсам меди на медно-колчеданную формацию приходится 14,5 % балансовых запасов и 36,3 % приведенных к условным запасам прогнозных ресурсов [9] (см. рис. 3, 4), что свидетельствует о срабатывании подготовленных запасов наиболее богатых массивных руд, но и наличии возможных резервов в виде ранее не разрабатываемых месторождений вкрапленных медно-колчеданных руд. Ввиду выработки большей части объектов близповерхностных сливных медно-колчеданных руд наметилась тенденция перехода на разработку глубоких горизонтов массивных руд и вовлечение в эксплуатацию вкрапленных руд на флангах разрабатываемых месторождений.

Наибольшее количество медно-колчеданных месторождений находятся в Уральской провинции, на которую приходится свыше 90 % добычи руд этой формации, присутствуют они также на территориях Северо-Кавказской, Карельской, Рудно-Алтайской, Салаирской и Восточно-Тувинской провинций.

Медно-полиметаллическая формация представляет собой по сути дела генетическую копию вулканогенной медно-колчеданной формации, в которой главными компонентами являются цинк и свинец, а медная минерализация второстепенна [19, 20]. Объемы добычи попутной меди на российских месторождениях полиметаллической формации небольшие и составляют 12–30 тыс. т/год (1,1–3,5 % от российской добычи) и в 2021 г. 12,3 тыс. т (1,1 %), см. рис. 2, 3. По учтенным запасам и ресурсам меди на медно-полиметаллическую формацию приходится 0,9 % балансовых запасов и 8,3 % приведенных к условным запасам прогнозных ресурсов [9] (см. рис. 3, 4). Такой дисбаланс запасов и ресурсов сложился в результате критического отношения к меди как попутному компоненту, требующему усложнения технологии обогащения, не всегда эффективной и экономически рентабельной. В результате на стадии геологической оценки месторождений

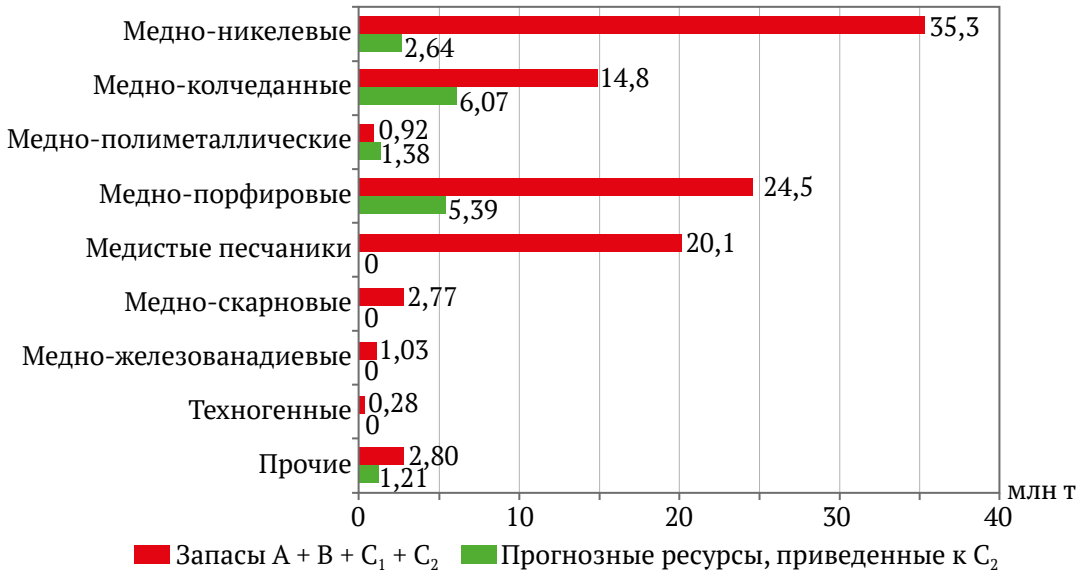


Рис. 4. Объемы балансовых запасов и прогнозных ресурсов меди по типам рудных формаций по состоянию на 2021 г., млн т

По данным Государственных докладов Минприроды (https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/), Справок о состоянии и перспективах МСБ регионов РФ (http://atlaspacket.vsegei.ru/?v=msb2021#91474d2e700eb6c90) и Я.В. Алексеева [9]

попутные компоненты учитываются по максимуму, а при разведке и проектировании добычного предприятия зачастую они переводятся в забалансовые запасы. Месторождения медно-полиметаллической формации доминируют в Салаирской и Рудно-Алтайской провинциях, а также присутствуют на территориях Северо-Кавказской, Карельской, Восточно-Тувинской и Охотско-Чукотской провинций.

Медно-порфировая формация является безусловным мировым лидером и по объемам добычи меди и молибдена, а также по их запасам и прогнозным ресурсам. Месторождения порфирового типа представляют собой крупнообъемные тела прожилково-вкрапленных сульфидных медно-молибденовых образований, приуроченных к интрузивным телам, зачастую с порфировой текстурой (первопричина наименования этой рудной формации), являющиеся субстратом для оруденения [21, 22]. Интерес к этим относительно небогатым, но огромным по ресурсам месторождениям возник с развитием технологий обогащения – гравитационного, а затем и весьма эффективного флотационного обогащения сульфидов. В результате формация порфировых месторождений меди и молибдена стала главным источником для добычи этих металлов [23]. Кроме меди и молибдена, на месторождениях этого типа из добытых руд извлекаются значимые объемы сопутствующих компонентов – Au, Ag, Re. Зачастую медно-порфировая формация месторождений трактуется как Mo–Cu–Au-формация [24]. В рамках порфировой формации выделяются рудно-формационные типы: золото-медно-порфировый в базальтоидных вулканогенно-плутонических поясах (островодужных и рифтогенных) и молибден-медно-порфировый в андезитовых вулканогенно-плутонических поясах, формирующихся в результате активизации на субстрате различного состава и возраста [25, 26].

Месторождения медно-порфировой формации в условиях совместной экономики СССР в России не разрабатывались ввиду наличия достаточных действующих добывающих производств Коунрадского (Казахстан) и Алмалыкского (Узбекистан) ГОКов. Тем не менее на территории России они были известны и по мере возможности вовлекаются в эксплуатацию, а также являются предметом поисков, оценки и разведки новых медно-порфировых месторождений. По учтенным запасам и ресурсам меди на медно-порфировую формацию приходится 23,9% балансовых запасов и 32,3% приведенных к условным запасам прогнозных ресурсов [9] (см. рис. 3, 4). Начиная с 2013 г. начата эксплуатация медно-порфировых месторождений в Уральской провинции, к 2021 г. уровень добычи из месторождений этой формации увеличился до 323 тыс. т (28,2% от российской добычи), см. рис. 2, 3. Подготавливаются к эксплуатации трансграничное медно-порфировое месторождение в Челябинской области (на границе с Казахстаном), а также месторождения в Восточно-Тувинской и Приморской провинциях, ведутся геологоразведочные работы в Восточно-Забайкальской и на севере Охотско-Чукотской провинций, перспективны на предмет поисков и оценки многие площади и объекты на территории уже названных провинций, а также в Кольской, Центрально-Арктической, Умлекано-Огоджинской и Камчатской провинциях.

Формация медистых песчаников включает в себя стратиформные месторождения в осадочных породах с высаженными на геохимических барьерах медносульфидными образованиями с эксгаляционными источниками меди в морской воде или переведенных в раствор путем выщелачивания медьсодержащих пород инфильтруемыми пластовыми водами [27, 28, 29, 30]. По объемам добычи и запасам формация медистых песчаников занимает второе место в мире после медно-порфировой формации.

На территории России мелкие месторождения медистых песчаников разрабатывались на территории Приуральской провинции вплоть до середины XIX в. В условиях совместной экономики СССР при наличии гигантского разрабатываемого месторождения медистых песчаников Джезказган в Казахстане в России велись только поиски и разведка месторождений этой формации. Выявленное в 1949 г. сверхкрупное Удоканское месторождение медистых песчаников в Кадаро-Удоканской провинции находилось ранее (до строительства Байкало-Амурской магистрали) вдалеке от развитой инфраструктуры в сложных условиях горной тундры и лишь в 2023 г. было запущено в эксплуатацию, а на близлежащих перспективных площадях ведутся геологоразведочные работы. Добыча меди на Удоканском месторождении формации медистых песчаников в 2021 г. составила 6,1 тыс. т (0,5% от российской добычи), к 2027 г. планируется ее увеличение до 65 тыс. т (6–7%), а в дальнейшем – до 175 тыс. т/год (до 15–17%). По учтенным запасам меди на формацию медистых песчаников приходится 19,6% балансовых запасов, а вот апробированных прогнозных ресурсов этой формации на учете нет [9]. Кроме вышеназванных провинций, месторождения и проявления медистых песчаников известны в Донецкий, Игарской, Шорско-Хакасской и Билякчанско-Приколымской провинциях.

Медно-скарновая формация представлена контактово-метасоматическими месторождениями на контакте интрузивов от основного до кислого состава с известковыми осадочными породами, где новообразования скарнов являются субстратом для наложенной медной минерализации [31, 32]. Собственно медные скарновые месторождения представляют собой богатые, но мелкие по запасам объекты (Уральская и Шорско-Хакасская провинции), и практически все из них к настоящему времени отработаны. Разрабатываются скарновые месторождения с попутной медной минерализацией, но этот источник также незначителен по возможностям добычи меди (1–2 тыс. т/год). Наибольшие перспективы имеет тип медно-железорудных скарнов, где медная прожилково-вкрапленная минерализация наложена именно на субстрат железорудных тел [33]. Начиная с 2013 г. начата эксплуатация месторождений медно-железорудно-скарновой формации в Восточно-Забайкальской провинции и к 2020 г. уровень годовой добычи на ме-

сторождениях этой формации вырос с 3 до 94 тыс. т (8,3% от российской добычи), см. рис. 2, 3. Подготавливаются к эксплуатации новые месторождения медно-скарновой формации в Уральской и Восточно-Забайкальской провинциях, разведываются объекты и опоисковываются новые площади в Уральской, Кадаро-Удоканской и Охотско-Чукотской провинциях, а также вне территорий известных провинций. По учтенным запасам меди на медно-скарновую формацию приходится 2,7% балансовых запасов, но апробированных прогнозных ресурсов этой формации на учете нет [9], см. рис. 3, 4.

Медно-железорудная ванадийсодержащая магматическая формация представлена в России уникальным Волковским месторождением комплексных апатит- и ванадийсодержащих титаномагнетитовых и медносульфидных руд с сопутствующей золото-палладиевой минерализацией, сформированных в процессе дифференциации и кристаллизации одноименного габброидного массива с формированием линз вкрапленной сульфидной и титаномагнетитовой минерализации [34]. Добыча меди на Волковском месторождении составляет 4–12 тыс. т/год (0,5–1,1% от российской добычи) и в 2021 г. – 12,6 тыс. т (1,1%), см. рис. 2, 3. Проявления медно-железованадиевой магматической формации довольно редки, но схожее с Волковским типом железо-медных руд имеют месторождение Векша и проявление Пудожгорское в Карельской провинции, Колвицкое месторождение на Кольском полуострове и проявление Погореловское в Челябинской области. Доли запасов Cu–Fe–V формации в России невелики и составляют 1,03 млн т (0,53% от российских запасов), см. рис. 3, 4. Прогнозных ресурсов Cu–Fe–V формации на учете нет.

Формация самородной меди интересна исходя из исторического опыта разработки уникального крупного и богатого месторождения самородной меди Верхнего Озера (США) в миндалекаменных диабазах покровных эффузивов, отработанного еще в XIX в., на котором добыто свыше 4,5 млн т меди [35]. Обнаружение подобных месторождений со столь качественными медными рудами всегда было целью поиска во всех странах, в том числе и в России, но серьезного успеха они не имели [36]. Тем не менее на территории России известны месторождения и проявления самородной меди в вулканогенных отложениях на территории Уральской, Шорско-Хакасской, Норильско-Хараелахской и Билякчанско-Приколымской провинций, причем среди них имеются достаточно крупные объекты – Тайметское (Горная Шория, Кемеровская область) и Арылахское (север Красноярского края) месторождения.

Рудные формации с попутной медной минерализацией включают несколько разнотипных рудных формаций, где медь является лишь второстепенным попутным компонентом.

Экономически наиболее значима из них *формация малосульфидных платинометалльных руд с попутной медно-никелевой минерализацией* в виде вкрапленного оруденения в магматических комплексах мафитов и ультрамафитов орогенных зон от архейского до неогенового возраста [13, 37, 38, 39]. Месторождения и проявления этого типа становятся предметом поисковых и разведочных работ в первую очередь ввиду привлекательности добычи платиноидов и известны в Воронежской, Карельской, Кольской, Норильско-Хараелахской, Саянской, Северо-Байкальской, Джугджурской, Охотско-Чукотской, Корякской и Камчатской провинций. Балансовые запасы и прогнозные ресурсы месторождений малосульфидной формации в настоящее время учитываются в составе традиционной медно-никелевой формации.

Кварцево-сульфидная формация с попутной медной минерализацией, включающая генетически разнообразные рудные формации цветных (олово, вольфрам) и драгоценных (золото, серебро) металлов. Ведется попутная добыча медного концентрата на оловянных [40] и вольфрамовых [41] месторождениях Приморской провинции, а также на многих золоторудных месторождениях [41] вне известных медных провинций.

Медная минерализация может проявляться и в пределах образований *карбонатитовой формации*, что имеет место на разрабатываемом медно-цирконий-фосфатном карбонатитовом месторождении Палабора в ЮАР [42]. Проявления карбонатитов с рассеянной медно-сульфидной минерализацией известны на полуострове Таймыр и в карбонатитовых массивах Маймеча-Котуйской провинции.

Техногенная формация представляет собой результат антропогенного воздействия на недра, в результате которого формируются новые месторождения техногенного сырья (отвалы вскрышных пород и некондиционных руд, хранилища хвостов и промежуточных продуктов обогатительных производств, отвалы шлаков и огарков металлургического передела руд, минерализованные рудничные воды) [43, 44]. С извлечением меди ведется переработка шлаков из отвалов Среднеуральского медеплавильного завода {№ 140} и шламов Черемшанского хранилища Высокогорского рудника {№ 141} в Свердловской области (до 16 тыс. т/год), в также из хвостов Норильской обогатительной фабрики ОФ {№ 142} (до 1,5 тыс. т/год)[8], №№ объектов – см. рис. 1. Подготавливаются к эксплуатации отвалы некондиционных руд Аллареченского месторождения {№ 143} в Мурманской области [45], отвалы шлаков Карабашского медного комбината {№ 144} в Челябинской области и пиритные огарки Кировградского МК {№ 145} в Свердловской области [43], отвалы Солнечного ГОКа {№ 146} в Хабаровском крае[9]. Оценивается возможность эксплуатации отвалов Красноуральской обогатительной фабрики {№ 147} в Свердловской области, шлаков Локтевского сереброплавильного завода {№ 148} в Алтайском крае, а также отвалов Туимской

[8] Государственные доклады о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2002–2021 гг. – МПР РФ, 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

[9] Там же.

{№ 149} и Майнской {№ 150} обогатительных фабрик в Хакассии. Оцененные запасы меди на техногенных месторождениях России составляют 270 тыс. т, добыча – 8–16 тыс. т/год (0,7–1,9% от российской добычи) и в 2021 г. 8,5 тыс. т (0,7 %), см. рис. 3, 4. Ресурсы техногенных месторождений являются недооцененными ввиду ограниченности геологоразведочных работ на хвостохранилищах обогатительных фабрик (лишь на 4 из 36 действующих и остановленных ОФ) и лишь на единичных отвалах некондиционных руд разрабатываемых и законсервированных месторождений [46].

Меднорудные провинции

Северо-Кавказская провинция включает вулканогенно-осадочные структуры Передового хребта и Приводораздельной зоны вдоль границы Скифской платформы и складчатого сооружения Большого Кавказа. Здесь известны многочисленные месторождения *медно-колчеданной формации*, с 50-х годов XX в. ведется эксплуатация Урупского месторождения {№ 12} [47], которое к настоящему времени значительно выработано, добыча в 2021 г. – 5,4 тыс. т, подготавливаются к эксплуатации Худесское, Скалистое и Первомайское месторождения {№ 44}, зафиксировано свыше 100 рудопроявлений, разведано и находится в резерве месторождение Кизил-Дере {№ 40} с запасами меди 1,17 млн т 100% Cu со средним содержанием в рудах 2,14 % Cu [48]. Всего по Северо-Кавказской провинции учтено 2,23 млн т балансовых запасов меди (2,17 % от российских запасов), а годовая добыча в 2021 г. составила 5,4 тыс. т (0,47 % от российской добычи), рис. 5, 6.

Донецкая провинция представляет собой площадь распространения *формации медистых песчаников* картамышинской свиты нижнепермских отложений в Днепрово-Донецком прогибе Восточно-Европейской платформы. Добыча меди здесь осуществлялась еще в эпоху бронзового века (проявления Картамышское, Выскривка, Пилипчатино и др.) и вплоть до XIX в. [49]. Здесь выделяются Бахмутская ({№ 71}, 28 проявлений) и Кальмиус-Торецкая (3 проявления) перспективные площади на предмет обнаружения значимых месторождений медистых песчаников [50]. В 60-е годы XX в. трест «Артемгеология» опоисковывал минерализованные участки в Картамышинской мульде с выделением пластов, обогащенных медью (проявления Берестянское, Кислый Бугор и др.), а также с наличием не только медной, но и свинцово-цинковой минерализации (Серебрянское, Суходольское, Однобоковское) [51]. Донецкая провинция является лишь частью площадей распространения медистых песчаников по периферии Украинского щита вплоть до Придобруджского прогиба на западе [52].

Воронежская провинция приурочена к известному Воронежскому кристаллическому массиву (ВКМ), в пределах которого известны месторождения и проявления *сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд еланского типа* (Еланское и Ёлкинское месторождения, а также более 20 рудопроявлений), генетически связанных с норитами субвулканической ортопироксенит-норит-диоритовой формации, и *мамонского типа* (месторождения Нижнемамонское, Подколодновское, Юбилейное, многочисленные рудопроявления в Нижнемамонском и Аннинском рудных районах), ассоциирующих с ультрамафитами дунит-перидотит-пироксенит-габброноритовой формации [53]. Еланское и Елкинское МПГ-медно-никелевые месторождения {№ 45} наиболее подготовлены к эксплуатации, запасы меди по ним составляют 58,8 и 17,3 тыс. т соответственно, но несмотря на благоприятные условия серьезным препятствием для их

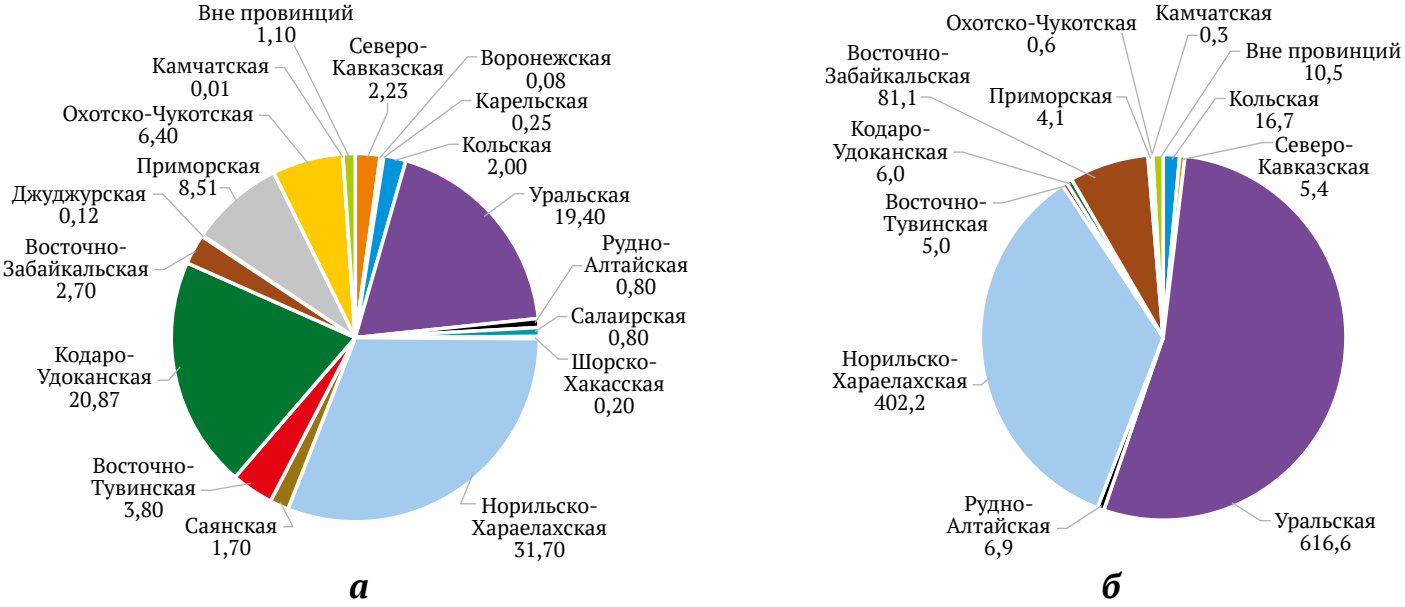


Рис. 5. Объемы учтенных запасов, млн т – *а*, и годовой добычи, тыс. т – *б* меди по провинциям по состоянию на 2021 г.

По данным Государственных докладов Минприроды (https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/), Справок о состоянии и перспективах МСБ регионов РФ (http://atlaspacket.vsegei.ru/?v=msb2021#91474d2e700eb6c90) и Я. В. Алексеева [9]

освоения являются проблемы отчуждения плодородных земель и нахождение близ них природоохранных территорий. По Воронежской провинции учтено 0,08 млн т балансовых запасов меди (0,08 % от российских запасов), см. рис. 5, 6.

Карельская провинция находится в восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Добыча меди велась здесь еще в XVIII в. (рудники Воицкий, Вороновоборский, Пялозерский и др.) на небольших медно-колчеданных месторождениях, но они были выработаны еще в XIX в. В результате геологического изучения к настоящему времени известны месторождения *медно-колчеданной рудной формации* в Центрально-Карельской (Ведлозерское, Хаутаваарское, Чалкинское и др.), Сумозерско-Выгозерской (Парандовское) и Западно-Карельской (Ялонваарское) минерагенических зонах *медно-никелевой сульфидной ультрамафит-мафитовой формации* (Восточно-Вожминское месторождение, связанное с Вожминским массивом ультрабазитов, и Лебяжинское месторождение в пределах Кумбуксинского массива ультрамафитов) и *коматиитовой формации* (проявления Золотопорожское, Лещевское, Рыбозерское в металавах базальтов и коматиитов Сумозерско-Кенозерского зеленокаменного пояса), *медно-молибден-порфировой формации* (месторождения Лобаш, Пяяваара, Ялонвара), *малосульфидной платинометалльно-титано-ванадиевой формации* в Койкарско-Святнаволокской минерагенической зоне (месторождение Викша в разрезе Койкарского габбро-долеритового силла) и *формации медистых песчаников* (отработанное месторождение Воронов Бор и ряд рудопроявлений) [54]. На месторождениях Викша {№ 65} [55] и Лобаш-1 {№ 66} [56] проведены геологоразведочные работы с подсчетом запасов – 125 и 56,4 тыс. т Cu соответственно. В юго-восточной части провинции на территории Астраханской области также зафиксировано более 50 медно-никелевых проявлений, но поисковыми работами ранее были охвачены только два массива каматиитового каменноозерского комплекса, с которым связано Волошовское медно-никелевое месторождение {№ 72}, оцененное буровыми работами на глубину. Вскрыто вкрапленное сульфидное оруденение, подсчитаны ресурсы в 277 тыс. т меди при среднем содержании 0,15 % Cu [57]. По Карельской провинции учтено 0,25 млн т балансовых запасов меди (0,24 % от российских запасов), см. рис. 5, 6.

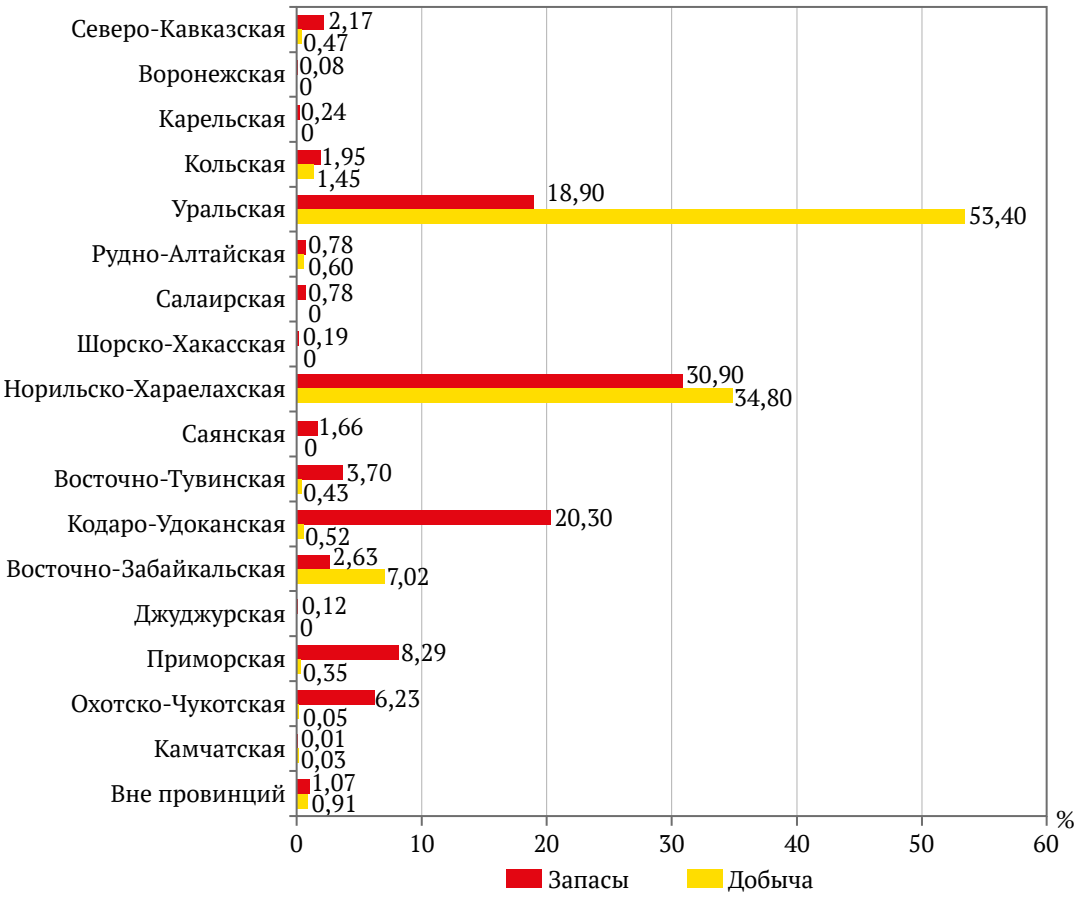


Рис. 6. Доли запасов и добычи (в 2021 г.) меди по провинциям от общих показателей по Российской Федерации, в Донецкой, Приуральской, Центрально-Арктической и Билякчанско-Приколымской учтенные запасы отсутствуют и добыча не производится

По данным Государственных докладов Минприроды (https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) и Справок о состоянии и перспективах МСБ регионов РФ (http://atlaspacket.vsegei.ru/?v=msb2021#91474d2e700eb6c90)

Кольская провинция расположена на севере Фенноскандинавского щита, где в пределах рифтогенного Печенга-Имандра-Варзугского зеленокаменного пояса известно множество палеопротерозойских расслоенных интрузий, в т.ч. несколько рудоносных (МПГ–Cu–Ni), входящих в состав Печенгского, Мончегорского и Федорово-Панского рудных районов, включающих месторождения *формаций сульфидных медно-никелевых руд* и *малосульфидных платинометалльных руд с попутной медно-никелевой минерализацией* [58].

В пределах *Печенгского рудного района* выделяются два рудных узла, включающих сближенные месторождения сульфидной медно-никелевой формации расслоенных мафитов и ультрамафитов [59]: Западный (месторождения Котсельваара-Каммикиви и Семилетка) и Восточный (Ждановское, Заполярное, Быстринское, Тундровое, Спутник и Верхнее). Разработка месторождений Западного узла ведется с 1930-х годов XX в., Восточного – с 1960-х годов. К настоящему времени большая часть запасов месторождений Котсельваара-Каммикиви, Семилетка, Тундровое и Заполярное в виде богатых сливных медно-никелевых руд выработаны и они законсервированы. В настоящее время разрабатывается Ждановское месторождение вкрапленных медно-никелевых руд (запасы 840,5 тыс. т Cu при среднем содержании 0,31% Cu), подготавливаются к освоению месторождения Быстринское, Спутник и Верхнее.

Мончегорский рудный район включает ряд месторождений и проявлений, известных еще с 1930-х годов, имеющих признаки и сульфидных медно-никелевых руд, и малосульфидных платинометалльных руд со слабой медно-никелевой минерализацией [60]. Из них наиболее крупные объекты сульфидных медно-никелевых руд – Поаз (ресурсы 443 тыс. т Cu при среднем содержании 0,13% Cu) и Нюд (188 тыс. т, 0,24% Cu) {№ 75}, Ниттис-Кумужья-Травяная (229 тыс. т, 0,16% Cu) и Сопча – рудный пласт 330 (109 тыс. т, 0,23% Cu) {№ 76}, Арваренч (246 тыс. т, 0,26% Cu) и Морошковое озеро (172 тыс. т, 0,20% Cu) {№ 77}. Из объектов малосульфидных платинометалльных руд со слабой медно-никелевой минерализацией можно привести Лойпишнюн [61], Южная Сопча, Вуручуайвенч с ресурсами меди 30–50 тыс. т.

Федорово-Панский рудный район {№ 78} малосульфидных платинометалльных руд со слабой медно-никелевой минерализацией. Обнаруженные здесь месторождения и проявления оценивались в первую очередь на платиноиды и в меньшей степени на другие компоненты, в т.ч. на медь и никель. Наиболее крупные из выявленных объектов – Федорово-тундровское и Киевей [62], а также Восточный Чуавры [63] – представляющие собой горизонты рифов в расслоенных мафитах.

Из других медных геологических формаций в пределах Кольской провинции известно *медно-молибден-порфировое месторождение* Пеллапахк {№ 74} (ресурсы 203 тыс. т, 0,15% Cu), по проведенным работам оценено как гранично-рентабельное [64] и Колвицкое месторождение {№ 73} медно-железной ванадийсодержащей магматической формации [65].

Всего по Кольской провинции учтено 2,0 млн т балансовых запасов меди (1,95% от российских запасов), а годовая добыча в 2021 г. составила 16,7 тыс. т (1,48% от российской добычи), см. рис. 5, 6.

Приуральская провинция расположена в пределах предуральского краевого прогиба Восточно-Европейской платформы, где в верхнепермских отложениях уфимского, казанского и татарского ярусов распространены многочисленные месторождения и проявления *формации медистых песчаников* [66]. Они разрабатывались с бронзовой эпохи вплоть до середины XIX в. По археологическим данным на этих территориях в разработке находилось свыше 500 участков развития медистых песчаников [67]. Ввиду небольших размеров и соответственно запасов эти проявления медистых песчаников малопривлекательны для традиционных способов открытой отработки, но весьма перспективны для использования геотехнологических способов подземного выщелачивания меди [68].

Уральская провинция расположена в пределах Уральской орогенической системы. Здесь известны сотни месторождений и рудопроявлений медно-колчеданной, медно-порфировой, медно-скарновой, магматической ванадийсодержащей медно-железорудной формаций, а также формаций медистых песчаников и самородной меди [69]. На территории Уральской провинции сосредоточено 19,4 млн т подготовленных запасов меди (18,9% от российских) и осуществляется добыча 707 тыс. т меди, или 52,5% от национальной добычи (см. рис. 5, 6), причем имеется тенденция роста во времени и объемов добычи, и доли добычи Уральской провинции в балансе России (рис. 7). Кроме этого, на уральских заводах перерабатывается до 490 тыс. т/год импортируемого из Республики Казахстан медного концентрата[10].

Месторождения *медно-скарновой формации* являлись первыми объектами разработки в историческом Уральском горнопромышленном районе. Это отработанные к настоящему времени месторождения Турьинской группы [70], а также Гумешевское [71], Меднорудянское [72] {№ 7} и другие месторождения, небольшие по размеру и запасам, но бывшие привлекательными из-за богатства руд в развитых на них зонах вторичного обогащения. Тем не менее возможности вовлечения в настоящее время месторождений медно-скарновой формации имеются, в частности – подготавливается к эксплуатации месторождение Северное-3 {№ 54}, а также оценивается на предмет медной минерализации золото-железорудное скарновое месторождение Новогоднее Монто {№ 84} на Полярном Урале [73]. На Гумешевском медно-скарновом месторождении {№ 39} отдельным промышленным типом были выделены рыхлые карстовые осадки переотложеных окисленных медных руд – т.н. «медистые глины» [74]. С 2004 г. они стали предметом

[10] Государственные доклады о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2002–2021 гг. – МПР РФ, 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

разработки методом подземного выщелачивания меди с годовой добычей 1,0–3,5 тыс. т/год [75] при имеющихся оцененных ресурсах 455 тыс. т [9].

Месторождения *медно-колчеданной формации* распространены в виде многочисленных проявлений и месторождений в пределах палеозойских палеовулканических поясов (Щучьинско-Тагильский, Сакмарский или Кракинско-Медногорский, Западно- и Восточно-Магнитогорский, Каменский, Катенинский, Октябрьско-Денисовский, Иргизский) и зон (Большаковско-Рефтинская, Биргильдинско-Поляновская, Колпаковская, Еленовско-Кумакская, Бурыктальско-Кундыбаевская) Южного и Среднего Урала [69]. Месторождения медно-колчеданной формации на протяжении многих десятков лет служат традиционным источником сырья для медьдобывающих предприятий Южного и Среднего Урала [76]. Многие месторождения уже вышли из эксплуатации или законсервированы (Дергамышское {№ 3}, Сибайское {№ 4}, Учалинское {№ 5}, Александринское {№ 6}, Тарньерское {№ 8} и другие). В разработке находятся месторождения Гайское {№ 14} (запасы 4,37 млн т 100 % Cu, среднее содержание 1,32 % Cu, добыча 2021 г. 93 тыс. т Cu) [77], Осеннее, Весенне-Аралчинское, Джусинское, Ново-Сибайское, Юбилейное {№ 17} (запасы 1,24 млн т, 1,65% Cu, добыча в 2021 г. – 22 тыс. т Cu) [78], Камаганское, Озерное, Западно-Озерное {№ 19} (запасы 373 тыс. т, добыча 2021 г. 11 тыс. т Cu) [79], Талганское, Узельгинское, Молодежное, Чебачье и Ново-Шемурское[11]. Подготавливаются к эксплуатации медно-колчеданные месторождения Подольское и Северо-Подольское {№ 47}, Вишневское {№ 48}, Ново-Учалинское {№ 49} (запасы 1,09 млн т 100 % Cu, среднее содержание 0,98 % Cu) [80], Султановское {№ 50} (запасы 67 тыс. т, 3,25 % Cu), Маукское {№ 51} (запасы 47 тыс. т, 1,58 % Cu), Тарутинское {№ 52} (запасы 64 тыс. т, 1,33 % Cu), Саумское {№ 53} (запасы 21 тыс. т, 2,78 % Cu) и Северо-Калугинское[12]. В резервном фонде находится Комсомольское месторождение медно-колчеданных руд {№ 41} (запасы 504 тыс. т, 1,78 % Cu). Поиски медно-колчеданных месторождений в пределах Уральской провинции осуществляются на Блявинской {№ 80}, Мембетовская-Карагайской (ресурсы 520 тыс. т) и Новопетровской {№ 81} перспективных площадях Южного и Среднего Урала[13], а также на Приполярном Урале {№ 82} (Вольинский и Грубеинско-Тыкотловский рудные районы) [81].

Вторым по значимости в Уральской провинции является *медно-порфировая формация*, представленная месторождениями в пределах Северо-Сосьвинского, Вольинского и Грубеинско-Тыкотловского вулканогенных поясов Южного Урала, преимущественно в восточной его части [82]. В разработке находятся Томинское {№ 22} (запасы 3,85 млн т 100 % Cu, среднее содержание 0,34 % Cu, добыча в 2021 г. 212 тыс. т Cu) и Михеевское {№ 23} (запасы 1,8 млн т, 0,37 % Cu, добыча в 2021 г. 103 тыс. т Cu) медно-порфировые месторождения [83], ведутся оценочные работы на Биргильдинском, Западном и Тарутинском участках близ Томинского месторождения, требуют также оценки медно-порфировые проявления Северо-Ирендыкской, Верхнеуральской и Домбаровско-Ащебутакской [84] и Алапаевско-Сухоложской [85] металлогенических зон Среднего Урала.

На территории Уральской провинции находится уникальное разрабатываемое Волковское месторождение {№ 26} *магматической медно-железорудной ванадийсодержащей формации* [86] (запасы 805 тыс. т 100 % Cu, среднее содержание 0,63 % Cu, добыча в 2021 г. 13 тыс. т Cu). Образования магматической

[11] Государственные доклады о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2002–2021 гг. – МПР РФ, 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

[12] Там же.

[13] Там же.

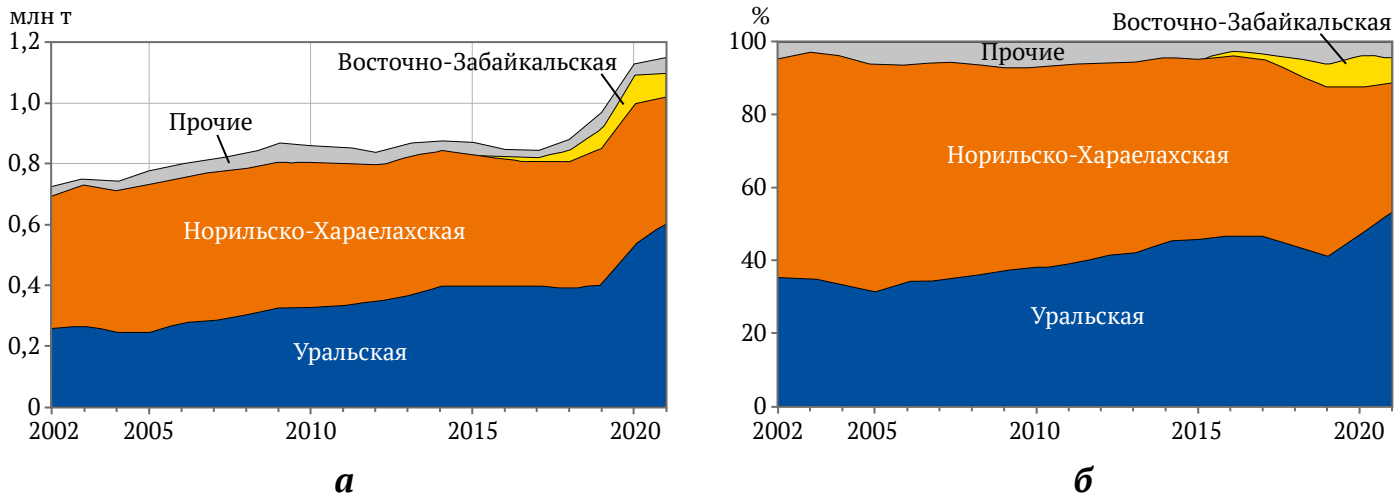


Рис. 7. Динамика добычи меди в России за 2002–2021 гг. по рудным провинциям:
а – объемы, млн т; *б* – доли от суммарной добычи по Российской Федерации, %

По данным Государственных докладов Минприроды (https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/)

медно-железорудной ванадийсодержащей формации во многих проявлениях имеют переходы к схожим с ними по составу медно-скарновым образованиям.

В Приполярной части Уральской провинции в пределах Ляпинской минерагенической зоны имеются проявления *формации медистых песчаников* – стратиформных гидрослюдистых медистых (Мусюрское, Косьюнское и Теснинное) и полиметаллических (Кожимское) песчаников [87].

На Северном Урале известны проявления *формации самородной меди* в Хултымьинской минерализованной зоне, приуроченной к миндалекаменным оливиновым базальтам и их туфам в вулканитах турнейского яруса нижнего карбона [88].

Рудно-Алтайская провинция в пределах Российской Федерации представляет собой лишь часть одноименной полиметаллической провинции с основными, наиболее значимыми, объектами в пределах Республики Казахстан (Колба-Нарымская металлогеническая область). Тем не менее в российской части Рудно-Алтайской провинции находится множество месторождений и проявлений *полиметаллической колчеданной формации*, включающих медную составляющую. Как и Уральская провинция, Рудный Алтай представляет собой орогенную структуру островодужного магматизма, но базальтоидного на Урале и риолитового на Алтае, что выразилось в различии металлогенической специализации – медь-цинковой на Урале и медь-полиметаллической – на Алтае [20].

Месторождения полиметаллов в Змеиногорском рудном районе разрабатывались с бронзовой эпохи, промышленная их разработка была начата на Змеиногорском месторождении еще в XVIII в. К настоящему времени Змеиногорское месторождение выработано, в разработке находятся Карабалихинское колчеданно-полиметаллическое месторождение {№ 27} с запасами Cu 316 тыс. т при среднем содержании 1,5 % Cu, добыча в 2021 г. – 6,3 тыс. т. Разрабатываются также полиметаллические месторождения с попутной медной минерализацией – Зареченское (запасы Cu 3,1 тыс. т, 0,17 % Cu) и Степное {№ 28} (запасы Cu 25 тыс. т, 1,18 % Cu). Подготавливается к эксплуатации Таловское медно-полиметаллическое месторождение {№ 56}, поисковые работы в пределах Уральской провинции осуществляются на Новоникольской (ресурсы 91 тыс. т) {№ 85} и Холодной (ресурсы 82 тыс. т) {№ 86} перспективных площадях, возможно также расширение поисковых территорий на территории Республики Алтай. Всего по Рудно-Алтайской провинции учтено 0,8 млн т балансовых запасов меди (0,78 % от российских запасов), а годовая добыча в 2021 г. составила 6,9 тыс. т (0,6 % от российской добычи), см. рис. 5, 6.

Салаирская провинция является одноименной минерагенической зоной орогенной структуры островодужного базальт-андезит-риолитового магматизма Салаирской эпохи складчатости, насыщенной многочисленными колчедан-полиметаллическими месторождениями [89]. Это старый горнорудный район, разрабатывавшийся с начала XIX в., но к настоящему времени добычные работы на нем остановлены. Законсервировано выработанное Каменушинское медно-полиметаллическое месторождение, но на территории провинции известно множество проявлений и месторождений *медноколчеданно-полиметаллической формации* (Ускандинское, Причумышская группа), в т. ч. и перекрытые отложениями чехла Западно-Сибирской плиты. Учтенные запасы меди по Рудно-Алтайской провинции составляют 0,8 млн т (0,78 % от российских запасов)[14], см. рис. 5, 6.

Шорско-Хакасская провинция находится в южной части орогенической постройки Кузнецкого Алатау на площади Мрасско-Батеневской антиклинорной структурно-формационной зоны с повышенной мощностью рифей-кембрий-ордовикских отложений, насыщенных вулканическими породами базальто-андезито-трахито-липаритовой группы, и сформированной в завершающемся раннепалеозойским диоритовым и плагиогранитным магматизмом салаирского или раннекаледонского цикла тектогенеза [90]. Здесь известны месторождения и проявления медно-скарновой, медно-порфировой формации, а также формаций самородной меди и медистых песчаников. *Медно-молибден-скарновые месторождения* приурочены к раннепалеозойским гранитоидам, наиболее крупные из которых – Киялых-Узень, Глафиринское [91] и Юлия [92] {№ 11} – к настоящему времени отработаны. К *медно-молибден-порфировой формации* относится Мало-Лабышское месторождение {№ 91} (ресурсы Cu 264 тыс. т, 0,12 % Cu) [93]. В Горной Шории находится крупнейшее в России Тайметское месторождение *формации самородной меди* {№ 90} в виде самородной меди с ресурсами Cu 1,57 млн т при среднем содержании 0,76 % Cu [94]. В Хакассии известны также проявления *формации медистых песчаников* – Базинское и Хараджульское. Учтенные запасы меди по Шорско-Хакасской провинции составляют 0,2 млн т[15].

Центрально-Арктическая провинция находится на слабоизученных территориях полуострова Таймыр и островов Северной Земли и выделена по факту нахождения при геолого-съемочных работах проявлений и месторождений *медно-порфировой формации* с выделением Центрально-Арктического золотосодержащего позднепалеозойско-раннемезозойского медно-молибден-порфирового пояса [95]. Здесь зафиксированы десятки проявлений медно-молибденовой минерализации, из которых наиболее перспективны Убойное {№ 92}, Верхнетарейское {№ 93} и Порфировое {№ 94}, прогнозные ресурсы провинции оцениваются в 2,5 млн т Cu [95].

Норильско-Хараелахская провинция находится на крайнем северо-западе дорифейской Сибирской платформы на ее сопряжении с перикратонным Енисей-Хатангским прогибом [96]. Здесь находятся уникальные по запасам и качеству месторождения медно-никелевой формации, а также месторождения

[14] Государственные доклады о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2002–2021 гг. – МПР РФ, 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

[15] Там же.

медно-порфировой формации и формации самородной меди. На территории Норильско-Хараелахской провинции сосредоточено 30,9% российских запасов меди (31,7 млн т) и осуществляется 34,8% российской добычи меди (402 тыс. т), см. рис. 5, 6. Имеется тенденция уменьшения доли добычи меди в Норильско-Хараелахской провинции в балансе России за счет роста объемов добычи в Уральской и Восточно-Забайкальской провинций, см. рис. 7.

Уникальная Норильская группа месторождений *медно-никелевой формации* является результатом мезозойской трапповой активизации перикратонного чехла Сибирской платформы [13]. Здесь разрабатываются Октябрьское {№ 30} (запасы 18,34 млн т 100% Cu, среднее содержание 1,61% Cu, добыча в 2021 г. 273 тыс. т Cu), Талнахское {№ 31} (запасы Cu 9,90 млн т, 1,09% Cu, добыча в 2021 г. 121 тыс. т Cu) и Норильск-1 {№ 32} (запасы Cu 2,57 млн т, 0,47% Cu, добыча в 2021 г. 9 тыс. т Cu) месторождения, подготавливаются к эксплуатации Масловское {№ 57} (запасы Cu 1,10 млн т, 0,53% Cu) [97] и Черногорское {№ 58} (запасы Cu 400 тыс. т, 0,29% Cu) [98], ведутся геологоразведочные работы на Моронговской {№ 96} и Самоедовской {№ 99} перспективных площадях[16]. В Хараелахской мульде возможно также обнаружение новых медно-никелевых месторождений, не имеющих выхода на дневную поверхность [99, 100].

На западном фланге Норильско-Хараелахской провинции в 1960-е годы выявлено Болгохтохское месторождение {№ 97} *медно-порфировой формации* (ресурсы Cu 462 тыс. т, 0,27% Cu), [101].

В 1970-е годы в пределах Северо-Хараелахской рудной зоны были обнаружены проявления *формации самородной меди*, здесь производились поисковые работы на Арылахском месторождении самородной меди {№ 98} (ресурсы Cu 600 тыс. т, 0,41% Cu) [102].

Игарская провинция выделена по факту нахождения образований *формации медистых песчаников* в отложениях гравийской свиты венда и сухарихинской свиты венда – нижнего кембрия в структуре горста Игарского выступа байкалид в северо-западной части Сибирской платформы [103]. В 1970-е годы в ее пределах были обнаружены и предварительно оценены Гравийское {№ 100} (ресурсы Cu 359 тыс. т, среднее содержание 2,42% Cu) и Сухарихинское {№ 101} (ресурсы Cu 120 тыс. т, 1,08% Cu) месторождения медистых песчаников [104].

Саянская провинция находится в юго-западной части Сибирской платформы, где на западной периферии Канской глыбы в раннепротерозойских метаморфитах караганской серии залегают серпентинизированные ультрабазиты габбро-перидотит-дунитовой магматической формации, несущие вкрапленную платиноидно-медно-никелевую минерализацию [13]. Здесь подготавливаются к эксплуатации Кингашское {№ 59} (запасы Cu 1,1 млн т, среднее содержание 0,17% Cu) [105] и Верхнекингашское {№ 60} (запасы Cu 632 тыс. т 100%, 0,24% Cu) [106] месторождения *медно-никелевой формации*. Возможно обнаружение и других медно-никелевых месторождений на смежных с Кингашским массивом перспективных площадях – Кахтарминской {№ 102}, Берёзовской, Ёрминской и Агульской [107]. Учтенные запасы меди по Саянской провинции составляют 1,7 млн т (1,66% от российских запасов)[17], см. рис. 5, 6.

Восточно-Тувинская провинция охватывает область развития ранних каледонид (салаирид) в сопряжении их с байкалидами Тувино-Монгольского массива ранней консолидации и Восточно-Саянского жесткого блока, в пределах которой развиты металлоносные вулкано-плутонические комплексы кембрий-девонского возраста с множеством медных проявлений в пределах Аксугско-Кандатской, Хамсаринской, Ожинско-Дерзигской, Балыктыгхем-Билинской, Восточно-Таннуольской, Центрально-Саянской, Хемчикской и Монгун-Тайгинской металлогенических зон [108]. Подготавливается к эксплуатации Ак-Сугское месторождение {№ 61} *медно-порфировой формации* (запасы Cu 3,63 млн т, среднее содержание 0,67% Cu) [109], из других медно-порфировых объектов следует отметить также Кызык-Чадрское месторождение {№ 103} (ресурсы Cu 2,35 млн т, 0,29% Cu) [110]. Введено в эксплуатацию Кызыл-Таштыгское месторождение *колчеданно-полиметаллической формации с попутной минерализацией меди* {№ 33} (запасы Cu 37 тыс. т, 0,65% Cu) [111]. Учтенные запасы меди по Восточно-Тувинской провинции составляют 3,8 млн т (3,7% от российских запасов)[18], см. рис. 5, 6.

Северо-Байкальская провинция находится в юго-восточной части складчатого обрамления Сибирской платформы, где в пределах рифейской Байкало-Муйской островной дуги сформировались Йоко-Довыренский, Авкитский, Чайский, Гасан-Дякитский и Нюрундуканский дунит-троктолит-габбровые рифтогенные интрузивы с проявлениями платино-медно-никелевого оруденения [112]. По проявлениям и месторождениям *МПГ-медно-никелевой формации* этой провинции с 1980-х годов производились авторские оценки их значимости. Наиболее изучены Йоко-Довыренское {№ 104} (ресурсы Cu 51 тыс. т) [112, 113] и Чайское {№ 105} (ресурсы Cu 260 тыс. т при среднем содержании 0,18% Cu) [112, 114] месторождения.

Кодаро-Удоканская провинция пространственно приурочена к одноименному краевому прогибу на юге Сибирской платформы, сложенному раннепротерозойскими карбонатно-терригенными отложениями удоканской серии, включая *формацию медистых песчаников* [115]. Здесь находится крупнейшее в России Удоканское месторождение {№ 34} медистых песчаников [115, 116], запущенное в эксплуатацию в 2023 г., с запасами 20,09 млн т Cu, со средним содержанием 1,44% Cu, добыча опытной эксплуатации

[16] Государственные доклады о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2002–2021 гг. – МПР РФ, 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

[17] Там же.

[18] Там же.

в 2021 г. – 6 тыс. т Cu. В пределах Удоканского бассейна кроме Удоканского месторождения известны и другие перспективные площади развития медистых песчаников – Бурпалинское {№ 108} (ресурсы Cu 739 тыс. т, 1,17% Cu) и Правоингамакитское {№ 110} (ресурсы Cu 608 тыс. т, 0,88 % Cu) [117], Сакинское {№ 109} (ресурсы Cu 404 тыс. т, 0,98 % Cu) [118], Ункурское {№ 106} (ресурсы Cu 320 тыс. т, 0,57 % Cu) [119], Красное {№ 107} (ресурсы Cu 933 тыс. т, 1,81 % Cu) [120] и другие. На северо-восточном фланге Кодаро-Удоканской провинции находится Чинейский массив габбро-норитов позднепротерозойского возраста, прорывающий раннепротерозойские карбонатно-терригенные отложения удоканской серии, и включающий в средней расслоенной своей части оруденение *медно-скарновой формации* (благороднометалльно-медно-сульфидное) разведываемого участка Рудный {№ 67} Чинейского месторождения (запасы Cu 775 тыс. т, 0,52 % Cu) [121]. Ресурсный потенциал этой формации может быть увеличен за счет медных рудопроявлений смежных Луктурского и Майлавского массивов Чинейского комплекса [118].

Всего по Кодаро-Удоканской провинции учтено 20,87 млн т балансовых запасов меди (20,3 % от российских запасов), а годовая добыча (опытная эксплуатация) в 2021 г. составила 6,0 тыс. т (0,52 % от российской добычи), см. рис. 5, 6.

Восточно-Забайкальская провинция насыщена мультиметалльными месторождениями и проявлениями Mo, W, Sn, Au, Cu, Bi, Pb, Zn, As, Sb, Hg, U, редких и редкоземельных элементов, других полезных ископаемых в пределах стагнированного океанского слэба Далайнор-Газимуро-Олекминской минерагенической зоны, сформированных в период от аалена (J_2) до сеномана (K_2) [122]. Медные месторождения представлены здесь медно-железорудно-скарновой и медно-порфировой формациями. В разработке находится Быстринское месторождение {№ 35} *медно-железо-скарновой формации* (запасы Cu 2,04 млн т, среднее содержание 0,74 % Cu, добыча в 2021 г. – 79 тыс. т Cu) [123]. Подготавливается к эксплуатации Култуминское месторождение {№ 62} этой же формации (запасы Cu 587 тыс т, 0,91 % Cu) [124]. На периферии этого месторождения ведутся геологоразведочные работы на участках Очуногдинский, Преображенский и Инженерный (ресурсы 487 тыс. т Cu). Разведываемое Лугоканское месторождение {№ 68} представляет собой сложный объект, где в верхней части классическое медно-скарновое оруденение [125] на глубине сменяется типичными образованиями *медно-порфировой формации* [126] (ресурсы Cu 604 тыс. т, 0,40 % Cu) [127]. Для расширения ресурсной базы Быстринского ГОКа ведутся геологоразведочные работы на Западно-Мостовской {№ 111} и Боровой {№ 112} перспективных площадях нахождения медно-порфировых образований. Имеются также предпосылки выявления месторождений медно-порфирового типа в пределах Уронайского рудного узла, в Газимуро-Заводском, Могочинском и Верхне-Олекминском рудных районах Восточно-Забайкальской провинции. Учтенные запасы меди по Восточно-Забайкальской провинции составляют 2,7 млн т (2,63 % от российских запасов), а годовая добыча в 2021 г. составила 81,1 тыс. т (7,0 % от российской добычи)[19], см. рис. 5, 6.

Умлекано-Огоджинская провинция охватывает площадь одноименного вулкано-плутонического пояса на территории Амурской области [128], включающего базальт-андезитовую вулканическую и габбро-диорит-плагиогранитную плутоническую формации позднемезозойской активизации с медно-порфировой минерализацией [129]. В центральной части провинции находится резервное Иканское месторождение {№ 43} *медно-порфировой формации* (запасы Cu 459 тыс. т, среднее содержание 0,21 % Cu), а также близрасположенные Боргуликанское и Восточное Двойное проявления [130]. Учтенные запасы меди по всей Умлекано-Огоджинской провинции составляют 0,8 млн т[20].

Приморская провинция, как и Забайкальская, насыщенная мультиметалльными месторождениями и проявлениями Sn, W, Au, Mo, Cu, Pb, Zn, редких элементов и других полезных ископаемых, сформированных в широкий временной диапазон от палеозоя до мезо-кайнозоя, представляет собой сегмент Тихоокеанского рудного пояса [131]. Медные месторождения представлены здесь медно-порфировой формацией и месторождениями с попутной медной минерализацией. В разработке находятся *месторождения с попутной медной минерализацией* Правоурмийское (запасы Cu 37,2 тыс. т), Фестивальное (запасы Cu 124,5 тыс. т), Соболиное (запасы Cu 53,6 тыс. т) и Перевальное (запасы Cu 25,1 тыс. т) оловорудные месторождения {№ 36} (добыча в 2021 г. – 916 т) [132] и вольфрамовое месторождение Восток-2 {№ 37} (балансовые запасы Cu 7,3 тыс. т) [133]. Подготавливается к эксплуатации Малмыжское месторождение {№ 64} *медно-молибден-порфировой формации* (запасы Cu 8,31 млн т, среднее содержание 0,35 % Cu) [134], находящееся в северной части Журавлевско-Амурского террейна раннемелового Сихотэ-Алинского орогенического пояса. Имеются предпосылки выявления месторождений медно-порфирового типа в пределах, смежных с Малмыжским месторождением Центрально-Анаджакской {№ 116} (ресурсы Cu 800 тыс. т) и Понийской {№ 117} (ресурсы Cu 714 тыс. т) перспективных площадей [135], а также Лазурного {№ 114} (ресурсы Cu 187 тыс. т, 0,48 % Cu) [136, 137] и Малахитового {№ 115} (ресурсы Cu 1,94 млн т, 0,30 % Cu) [138] месторождений (ресурсы Cu 1,94 млн т) в южной части Журавлевско-Амурского террейна [139]. Учтенные запасы меди по Приморской провинции составляют 8,51 млн т (8,29 % от российских запасов), а добыча в 2021 г. 4,1 тыс. т (0,35 % от российской)[21], см. рис. 5, 6.

---

[19] Государственные доклады о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2002–2021 гг. – МПР РФ, 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

[20] Там же.

[21] Там же.

Джугджурская провинция находится на восточном фланге Джугджуро-Станового подвижного пояса протерозойской и мезозойской активизаций [140]. В пределах этого пояса находятся месторождения медно-никелевой, медно-скарновой формации и малосульфидной формации с попутной медной минерализацией.

Наиболее подготовлено к эксплуатации месторождение Кун-Манье {№ 63} *МПГ–медно-никелевой формации* (запасы Cu 31,5 тыс. т, 0,21% Cu) [141]. На восточном окончании провинции Няндоминская перспективная площадь {№ 118} в раннеархейских габбро-анартозитах Лантарской части Джугджурского анортозитового массива [142], на площадях которой зафиксированы МПГ–Cu–Ni проявления Батомгское и Няндоми, а также МПГ–Cu проявления Скелетное и Мукдакиндя. По Няндоминской площади подсчитаны ресурсы 235 тыс. т. Cu.

В западной части Джугджурской провинции находится Кондерский магматический массив, он представляет собой сложную разновозрастную структуру с протерозойским дунитовым ядром по периферии, обновленным мезозойской кольцевой интрузией сиенитов. В самих дунитах известна шлировая МПГ-хромитовая минерализация, а также поля позднемеловых щелочных пегматитов, к которым пространственно приурочена сульфидная медная минерализация, обогащенная платиноидами (*малосульфидная формация с попутной медной минерализацией*) [143], которые стали предметом геологоразведочных работ на месторождении Кондер-Рудный {№ 69} с оцененными запасами меди 61 тыс. т.

На востоке Джугджурской провинции расположено месторождение медно-свинцово-цинковых руд Малокомуйское {№ 119} *медно-скарновой формации* в структуре позднемеловых гранодиоритов Джугджурского комплекса [144]. На этом месторождении оценены запасы меди в 33 тыс. т и прогнозные ресурсы 100 тыс. т.

Всего по Джугджурской провинции учтенные запасы меди составляют 0,12 млн т (0,12% от российских)[22], см. рис. 5, 6.

Билякчанско-Приколымская провинция представляет собой протерозойский металлогенический пояс меденосных осадочных пород и самородной меди в базальтах, который простирается от Билякчанской шовной зоны в Хабаровском крае до Ориекской рудной зоны Приколымского террейна в Магаданской области. Здесь известны проявления и месторождения *формации медистых песчаников* протерозойского возраста – Билякчанское [145], Северный Уй [146] и Боронг [147] {№ 120}, Ороекское [148] и Лучистое [149] {№ 123}, а также раннепалеозойского возраста – Веснянка {№ 123} [147] возраста. Проявления и месторождения *формации самородной меди* среднепротерозойского возраста обнаружены в Сетте-Дабанской рудной зоне – Джалкан, Росомаха и Хурат [150] {№ 121} и Урультинской рудной зоне – проявление Батько {№ 122} [147].

Охотско-Чукотская провинция повторяет геометрию позднеюрского-раннемелового Охотско-Чукотского вулканического пояса, сегмента глобального Тихоокеанского рудного пояса [131]. Здесь находятся месторождения и проявления медно-порфировой и медно-скарновой формаций. Из месторождений *медно-порфировой формации* особо следует отметить группу рудных объектов в пределах Баимской рудной зоны [151] – наиболее крупное разведываемое месторождение Песчанка {№ 70} (запасы Cu 6,4 млн т, среднее содержание 0,53% Cu) [151, 152] и его месторождение-сателлит Находка {№ 131} (ресурсы Cu 3,1 млн т, 0,34% Cu) [151, 153] позднеюрского-раннемелового возраста. К северу от них ведутся работы на Кавральянской [154] {№ 132} и Танюрерской {№ 133} [155] перспективных площадях на медно-порфировое оруденение. В южной части Охотского вулканического пояса в пределах Хабаровского края находится позднемеловое медно-(Au)-порфировое месторождение Челасинское {№ 125} (ресурсы Cu 2,0 млн т) [156] и перспективная Дарпирчанская площадь {№ 126} (ресурсы Cu 324 тыс. т). В пределах Магаданской области ведутся поиски и оценка меднопорфировых месторождений на перспективных площадях Шхиперская {№ 127} (раннемеловые месторождения и проявления Накхатанджинское, Лора, Осеннее, Этанджа, Муромец, ресурсы 1,0 млн т) [157] и Мечивеемская {№ 130} (позднемеловые месторождения Двуустная и другие, ресурсы 1,0 млн т) [158]. Здесь же находятся раннемеловые молибден-медное месторождение Бебекан {№ 128} [158] в Лево-Омолонской рудной зоне. В этой же рудной зоне находится и раннемеловое месторождение *медно-скарновой формации* Медь-Гора {№ 129} [159]. Всего по Охотско-Чукотской провинции учтено 6,4 млн т запасов меди (6,23% от российских запасов), что явно заниженный показатель, см. рис. 5, 6.

Корякская провинция находится на севере Корякско-Камчатского мезозойско-кайнозойского вулканического пояса [160]. Здесь в альпинотипных мафит-ультрамафитовых комплексах известны месторождения и проявления *малосульфидной платиноидной формации с попутной медной минерализацией*. Поисковые и оценочные работы ведутся также на Майницкой {№ 134} [161] и Валагинско-Карагинской {№ 135} [162] перспективных площадях малосульфидной формации МПГ с попутной медной минерализацией. В южной части провинции известно также позднемеловое малосульфидное МПГ-хромитовое месторождение Снежное с попутной медной минерализацией {№ 136} [163].

Камчатская провинция располагается в южной части Корякско-Камчатского мезозойско-кайнозойского вулканического пояса, где в пределах позднемеловой-палеоценовой Квинум-Кувалорогской рудной зоны были выявлены месторождения *медно-никелевой формации*, связанные с роговообманковыми пе-

[22] Государственные доклады о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2002–2021 гг. – МПР РФ, 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

ридотитами и габброидами, в т.ч. разрабатываемое в настоящее время существенно никелевое месторождение Шануч с попутной медной минерализацией {№ 38} (запасы 7,4 тыс. т 100 % Cu, среднее содержание 0,3 % Cu) [139, 164], медно-никелевые руды которых экспортируются. В пределах этой рудной зоны известны также месторождения медно-никелевой формации Квинум [165] и Кувалорог [166] {№ 137}. В южной части провинции известно также месторождение *медно-порфировой формации* Кирганик {№ 138} позднемелового возраста [167].

Всего по Камчатской провинции учтено 0,01 млн т запасов меди, а годовая добыча в 2021 г. составила 0,3 тыс. т, см. рис. 5, 6.

Медные месторождения вне известных провинций имеют место в условиях слабой изученности территорий и неопределенности идентификации некоторых месторождений по формационной принадлежности. Далее приводятся некоторые месторождения меди вне известных провинций.

Попутная медная минерализация развита на разрабатываемом Синюхинском *золото-скарновом месторождении* {№ 29} с учтенными запасами меди 28 тыс. т [168, 169] и годовой реализацией до 1 тыс. т извлеченного медного концентрата (рудник Веселый).

К *формации железооксидно-золото-медных месторождений* (IOCG-тип Олимпик Дэм) относится Уландрыкское железо-медно-редкоземельное месторождение {№ 87} на юге Горного Алтая с ресурсами Cu 1,2 млн т при среднем содержании 0,70 % Cu [170]. Оно представляет собой медно-золоторудную и редкоземельную минерализации, наложенные на железорудные скарны в силур-девонских вулканических отложениях риолитов и их туфов на контакте с девонскими субвулканическими лейкогранитами Уландрыкского массива. Возможно, одиночное Уландрыкское месторождение является лишь фрагментом меднорудной провинции в смежной с Горным Алтаем Синьцзянского Алтая в Китае, где известны железо-медное месторождение Чача и медное месторождение Минкэ [171].

Аналогами медно-цирконий-фосфатного карбонатитового месторождения Палабора [42] являются находки медно-сульфидной минерализации проявлений Дюмталейского карбонатитового массива [172], а также в карбонатитовых массивах Надежда, Павловский и Кошка [173] {№ 95} на Восточном Таймыре. Значимая для промышленной отработки сульфидная минерализация достаточно редкое явление в карбонатитовых комплексах и, соответственно, требует оценки в названных проявлениях *формации медной минерализации в карбонатитах*.

Другими необычными проявлениями медно-сульфидной минерализации являются ее находки в калиевых щелочных интрузиях Центрально-Алданского района позднемезозойской активизации Алданского щита [174]. При геологоразведочных работах на золото в них фиксировались ареалы медной и молибденовой сульфидной минерализации, причем ареалы распространения Au, Cu и Mo минерализации в пространстве имеют независимое распределение, и появилось понятие *молибден-медно-золото-порфировой формации калиевого* (а не натриевого) *профиля магматических пород* [175]. Выделяются Рябиновое медно-золото-порфировое месторождение {№ 113} на одноименном магматическом массиве [175, 176], Ыллымахское месторождение {№ 113} – также на одноименном массиве [177], фиксируется медная минерализация в массивах центрального типа Якокутском и Томмотском. Обнаружена также медная минерализация и в ранее считавшимися безрудными лакколитах сиенит-порфиров – месторождение Морозкинское в лакколите Горы Рудной [178] {№ 113} и в сиенит-порфирах лакколита Мрачного.

Агылкинское медно-вольфрамовое скарновое месторождение {№ 124} необычно тем, что оно является единственным крупным проявлением меди и вольфрама в пределах Верхоянской золото-доминирующей металлогенической провинции [179]. Месторождение представляет собой залежь в контактовом ореоле невскрытого плутона позднемезозойских гранитоидов. На нем учтены запасы меди 206 тыс. т при среднем содержании 2,7 % Cu и прогнозные ресурсы 84 тыс. т Cu.

Из других медных проявлений вне известных провинций следует отметить месторождение Береговое {№ 139} на северо-западной оконечности мыса Сулковского острова Медный в архипелаге Командорских островов. Обнаружено оно было русским промышленником Е.С. Басовым, который собрал на нем значительные объемы самородков меди. Геологические исследования 1903 г. (И.А. Морозевич, Л. Конюшевский) и 1958 г. (Ю.В. Жегалов, В.П. Вдовенко) выявили наличие мелкой вкрапленности самородной меди в дайках кайнозойских авгитовых андезитов (*формации самородной меди*), но остаточная бенчевая россыпь самородной меди была уже выработана, и И.А. Морозевич, и Ю.В. Жегалов оценивают это месторождение как непромышленное [180]. Провинцию распространения минерализации самородной меди на острове Медном выделить невозможно из-за ограниченности надводных территорий Командорских островов.

Запасы и прогнозные ресурсы меди по Российской Федерации

Учтенные запасы и ресурсы. В Российской Федерации по состоянию на 01.01.2022 г. учтено 102,7 млн т балансовых запасов категорий $A + B + C_1 + C_2$ и 79,9 млн т прогнозных ресурсов категорий $P_1 + P_2 + P_3$[23]. Прогнозные ресурсы также рассматриваются в значениях, приведенных к условным запасам. По Методике МПР (Приказ МПР 18 апреля 2022 г. № 68250) условные запасы путем пересчета на $C_2 = 0{,}5P_1 + 0{,}25P_2 + 0{,}125P_3$, составляют 16,7 млн т. По другой методике, используемой для ресурсов меди Я.В. Алексеевым, с пересчетом на $C_2 = 1{,}0P_1 + 0{,}6P_2$ они составляют 16,1 млн т [9], что сопоставимо с резуль-

[23] Государственные доклады о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2002–2021 гг. – МПР РФ, 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

татами пересчета по методике МПР. Результаты расчетов по последней методике использованы в оценке ресурсов меднорудных формаций.

Обеспеченность добычи запасами. Имеющихся балансовых запасов меди Российской Федерации при имеющемся уровне национальной добычи меди с учетом ее роста за счет ближайших вводов проектных объектов хватит минимум на 47 лет эксплуатации известных месторождений. Причем многие месторождения – Октябрьское, Талнахское, Норильск-I и Гайское – имеют обеспечение своего уровня добычи меди на срок свыше 100 лет. В то же время некоторые месторождения имеют ограниченные остаточные запасы и будут выводиться из эксплуатации (Осеннее, Джусинское, Весенне-Аралчинское, Талганское и другие).

Меднорудные формации. По отношению долей добычи/запасов (от суммарных российских) меди лишь медно-никелевая (1,06) и медно-порфировая (1,18) формации соизмеримы по уровням добычи и запасов, см. рис. 3. Проблемы обеспеченности запасами и вероятного срабатывания запасов для месторождений данных формаций неактуальна. Для месторождений медно-колчеданной (1,96) и медно-скарновой (2,44) формаций имеет место высокий показатель доли добычи, что свидетельствует о срабатывании запасов руд этих типов. Для формации медистых песчаников отношение долей добычи/запасов составляет всего 0,03, что является отражением лишь начала эксплуатации месторождений этого типа (Удоканское).

Меднорудные провинции. По отношению долей добычи/запасов (от суммарных российских) меди по эксплуатационным регионам лишь показатели Норильско-Хараелахской (1,13), Кольской (0,74) и Рудно-Алтайской (0,77) провинций соизмеримы по уровням добычи и запасов, см. рис. 3. В старой горнопромышленной Уральской провинции этот показатель составляет 2,85, что свидетельствует о серьезном срабатывании запасов руд на ее территории. Аналогичная ситуация имеет место для новой Восточно-Забайкальской провинции (2,67). В то же время по старой горнопромышленной Северо-Кавказской провинции отношение долей добычи/запасов составляет 0,21, свидетельствуя о наличии невостребованных запасов меди (месторождение Кизил-Дере и др.). Для новых провинций имеют место крайне малые показатели отношения долей добычи/запасов – Приморская (0,04), Охотско-Чукотская (0,01) и Восточно-Тувинская (0,12), где ведется подготовка к разработке новых медных месторождений.

Проекты освоения новых медных месторождений. В 2023 г. запущено в эксплуатацию Удоканское месторождение медистых песчаников (Кодаро-Удоканская провинция), при выходе на полную мощность I очереди ожидается уровень годовой добычи меди 136 тыс. т, по II очереди – до 542 тыс. т. В Уральской провинции в завершающей стадии подготовки находятся медно-колчеданные месторождения: Подольское – с ожидаемым уровнем добычи меди 85 тыс. т/год и Ново-Учалинское – с уровнем добычи I очереди – 16 тыс. т/год и II очереди – 28 тыс. т/год. В Восточно-Тувинской провинции подготавливается Ак-Сугское медно-порфировое месторождение с выходом на уровень добычи в 151 тыс. т/год. Заканчивается подготовка к эксплуатации Малмыжского медно-порфирового месторождения в Приморской провинции и ожидается уровень годовой добычи меди до 300 тыс. т. Из разведываемых месторождений наибольшая подготовка имеет место для медно-порфирового месторождения Песчанка в Охотско-Чукотской провинции, эксплуатация которого может достичь уровня добычи до 350 тыс. т/год.

Реализация названных проектов может увеличить уровень годовой добычи России на 635–1053 тыс. т (на 55–91 % от уровня добычи 2021 г.). При вводе в эксплуатацию и месторождения Песчанка добыча российской меди может возрасти на 118 % по отношению к уровню добычи 2021 г.

Состояние базы прогнозных ресурсов меди. Показатель перспективы развития минерально-сырьевой базы наиболее информативен по отношению объемов ресурсов (приведенных к C_2) и запасов. Для *медно-никелевой формации* он составляет 0,46, что свидетельствует о высокой степени разведанности известных месторождений Норильско-Хараелахской и Кольской провинций преимущественно сливных руд и относительно меньшими ожиданиями прироста запасов за счет прогнозных ресурсов вкрапленных медно-никелевых руд. Тем не менее возможны открытия новых месторождений богатых сливных руд на глубине в пределах Хараелахского и Тангаралахского рудоносных интрузивов [99, 100]. Для *медно-колчеданной формации* показатель отношение объемов ресурсов и запасов весьма высок – 2,5, и это результат значительной разведанности Уральской провинции на данный тип оруденения как сливных, так и вкрапленных руд. Прирост запасов медно-колчеданных руд возможен за счет оценки глубоких горизонтов и периферии известных месторождений, а также поиска новых месторождений на территории Приполярного и Полярного Урала [73, 81]. Еще более высокий показатель отношения объемов ресурсов/запасов имеет место для *медно-полиметаллической формации* – 9,2. Месторождений и проявлений медно-полиметаллических руд достаточно много, но большая часть из них средние и мелкие по размеру и поэтому ранее не представляла интереса для разведочных работ. Тем не менее при увеличении востребованности меди месторождения этого типа становятся привлекательными, особенно в старых горнопромысловых Рудно-Алтайской, Салаирской и Северо-Кавказской провинциях [19, 89], а также при исследовании новых Восточно-Тувинской и Охотско-Чукотской провинций. Для *медно-порфировой формации* отношение объемов ресурсов/запасов составляет 1,35 и на фоне бурного вовлечения месторождений этого типа в эксплуатацию (Томинское, Михеевское, Малмыжское, Песчанка) увеличились масштабы разведочных и поисковых работ на данный тип оруденения в Восточно-Тувинской, Приморской и Охотско-Чукотской провинциях, где имеются все предпосылки к обнаружению новых, в том числе крупных медно-порфировых месторождений [151, 154, 155, 156, 157]. В отношении

других меднорудных формаций имеет место низкий уровень объемов прогнозных ресурсов по отношению к балансовым запасам. Но если для *медно-скарновой формации* это следствие учета большинства объектов данного типа за медно-полиметаллической формацией, то для *формации медистых песчаников* низкий уровень прогнозных ресурсов является следствием малого интереса к технологически сложным рудам этого типа. Геологоразведочные работы велись только на уникальном по масштабам минерализации Удоканском месторождении медистых песчаников, причем в сопровождении низкого уровня оценки даже близлежащих месторождений и проявлений Кодаро-Удоканской (Ункурское, Красное, Бурпалинское, Сакинское, Правоингамакитское), а также в Игарской (Гравийское, Сухарихинское) провинциях. Кроме разведки этих месторождений, возможны также поиски и оценка месторождений в новых Билякчанско-Приколымской [148] и Шорско-Хакасской провинциях. В условиях развития новых технологий подземного выщелачивания меди становится возможным вовлечение в эксплуатацию известных и ранее разрабатываемых месторождений медистых песчаников в Приуральской [68], Игарской [102] и Донецкой [51] провинциях. В учтенных балансовых запасах меди России отсутствуют объекты месторождений *формации самородной меди в базальтоидах*. Тем не менее они имеются в пределах Шорско-Хакасской, Норильско-Хараелахской и Билякчанско-Приколымской меднорудных провинций. К сожалению, наиболее крупные и наиболее изученные их месторождения (Тайметское [94], Арылахское [102]) находятся в пределах природоохранных территорий и их промышленная эксплуатация маловероятна.

Выводы

1. Составлена сводная карта-схема России, включающая 25 меднорудных провинций и 150 наиболее значимых месторождений меди различных рудных формаций, перспективных объектов и площадей. Некоторые меднорудные провинции включают лишь один тип рудных формаций: медистых песчаников в Приуральской, Игарской и Донецкой провинциях; в других имеется преобладание месторождений одной главенствующей формации: медно-никелевой в Норильско-Хараелахской и Кольской, медистых песчаников в Кадаро-Удоканской, медно-полиметаллической в Рудно-Алтайской и Салаирской; в Уральской же провинции превалируют месторождения двух формаций (медно-колчеданной и медно-порфировой). Во многих меднорудных провинциях представлены месторождения разных формаций и возраста, что свидетельствует об общности их геохимической специализации в пределах территории отдельных провинций, зачастую вне зависимости от геологических особенностей рудоносных комплексов.

2. В отличие от мировой раскладки меднорудных формаций в долях запасов и добычи, где лидирует медно-порфировая формация, в России на первом месте по запасам и добыче находится медно-никелевый технологический тип руд. Основная добыча сконцентрирована на сульфидных медно-никелевых (419–508 тыс. т/год, или 36–65 % от российской добычи) и медно-колчеданных (227–334 тыс. т/год, 23–40 %) месторождениях, а также начата добыча и увеличиваются ее объемы на медно-порфировых (с 2013 г. – до 323 тыс. т/год, до 25 %) и медно-скарновых (с 2018 г., до 94 тыс. т/год, до 8,3 %) месторождениях. В 2021 г. уровень добычи меди в Российской Федерации составил 1147 тыс. т. В 2023 г. введено в эксплуатацию сверхкрупное Удоканское месторождение медистых песчаников с максимальной добычей 175 тыс. т/год. Реализация новых подготавливаемых проектов разработки медных месторождений может увеличить уровень годовой добычи России на 635–1053 тыс. т (на 55–91 % от уровня добычи 2021 г.).

3. В России по состоянию на 01.01.2022 г. учтено 102,7 млн т балансовых запасов и 79,9 млн т прогнозных ресурсов суммы категорий $P_1 + P_2 + P_3$ (16,1 млн т в пересчете на условные запасы категории C_2). Наибольшие объемы запасов меди приходятся на медно-никелевую (34,4 % от российских запасов), медно-порфировую (23,9 %) формации, формацию медистых песчаников (19,6 %) и медно-колчеданную формацию (14,5 %) и 7,6 % на все остальные рудные формации. По провинциям на Норильско-Хараелахскую приходится 30,9 % от российских запасов, на Кодаро-Удоканскую – 20,3 %, на Уральскую – 18,9 %. Отмечается увеличение показателей долей запасов меди для новых провинций: Приморской – 8,29 %, Охотско-Чукотской – 6,23 % и Восточно-Тувинской – 3,7 %. На остальные меднорудные провинции приходится 11,68 % российских запасов меди. В целом имеющихся запасов меди Российской Федерации хватит на 47 лет эксплуатации.

4. По соизмеримости долей запасов и добычи меди по рудным формациям наиболее благоприятная ситуация обеспеченности имеется для медно-никелевой (1,06) и медно-порфировой (1,18). Для формации медистых песчаников отношение долей добычи/запасов еще более благоприятное, что является отражением лишь начала эксплуатации месторождений этого типа (Удоканское). Для месторождений медно-колчеданной (1,96) и медно-скарновой (2,44) формаций имеет место высокий показатель доли добычи, что свидетельствует о срабатывании запасов руд этих типов. По эксплуатационным регионам лишь для Норильско-Хараелахской (1,13), Кольской (0,74) и Рудно-Алтайской (0,77) провинций имеют место благоприятные уровни сравнения долей добычи и запасов. В старой горнопромышленной Уральской провинции (2,85) и новой Восточно-Забайкальской провинции (2,67) отмечается серьезное срабатывание запасов балансовых руд. В то же время по старой горнопромышленной Северо-Кавказской провинции отношение долей добычи/запасов составляет 0,21, свидетельствуя о наличии невостребованных запасов меди (месторождение Кизил-Дере и др.).

5. Перспективы развития минерально-сырьевой базы меди различны для каждой рудной формации. Обеспеченность медно-никелевой формацией (отношение ресуры/запасы 0,46) свидетельствует о высокой степени разведанности известных месторождений

Норильско-Хараелахской и Кольской провинций. Тем не менее возможны открытия новых месторождений богатых сливных руд на глубине в пределах Хараелахского и Тангаралахского рудоносных интрузивов. Для медно-колчеданной формации (2,5) прирост запасов возможен за счет оценки глубоких горизонтов и периферии известных месторождений Уральской провинции, а также поиска новых месторождений на территории Приполярного и Полярного Урала. Для медно-полиметаллической формации (9,2) известно множество месторождений, но большая часть из них – средние и мелкие по размеру и поэтому ранее не представляли интереса для разведочных работ. Тем не менее при увеличении востребованности меди месторождения этого типа становятся привлекательными, особенно в старых горно-промысловых Рудно-Алтайской, Салаирской и Северо-Кавказской провинциях, а также при исследовании новых Восточно-Тувинской и Охотско-Чукотской провинций. Для медно-порфировой формации (1,35) на фоне бурного вовлечения месторождений этого типа в эксплуатацию увеличились масштабы геологоразведочных работ на данный тип оруденения в Восточно-Тувинской, Приморской и Охотско-Чукотской провинциях, где имеются все предпосылки к обнаружению новых, в том числе крупных медно-порфировых месторождений. Для формации медистых песчаников низкий уровень прогнозных ресурсов является следствием малого интереса к технологически сложным рудам этого типа. Имеет место недостаточность изучения многих известных месторождений и проявлений Кодаро-Удоканской провинции (Ункурское, Красное, Бурпалинское, Сакинское, Правоингамакитское), а также в Игарской (Гравийское, Сухарихинское) провинции. Кроме разведки этих месторождений возможны также поиски и оценка месторождений в новых Билякчанско-Приколымской и Шорско-Хакасской провинциях. В условиях развития новых технологий подземного выщелачивания меди становятся возможными поиски, разведка и вовлечение в эксплуатацию небольших месторождений медистых песчаников в Приуральской и Донецкой провинциях. В учтенных балансовых запасах меди России отсутствуют объекты месторождений формации самородной меди в базальтоидах. Тем не менее они имеются в пределах Шорско-Хакасской, Норильско-Хараелахской и Билякчанско-Приколымской меднорудных провинций. К сожалению, наиболее крупные и наиболее изученные их месторождения (Тайметское и Арылахское) находятся в пределах природоохранных территорий и маловероятны для промышленной эксплуатации.

Список литературы / References

1. Кондратьев В.Б., Попов В.В., Кедрова Г.В. Глобальный рынок меди. *Горная промышленность*. 2019;(3):80–87. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-3-145-80-87; *Горная промышленность*. 2019;(4):100–104. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-4-100-101
Kondratyev V.B., Popov V.V., Kedrova G.V. Global copper market. *Russian Mining Industry*. 2019;(3):80–87. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-3-145-80-87; *Russian Mining Industry*. 2019;(4):100–104. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2019-4-100-101 (In Russ.)
2. *The World Copper Factbook 2021*. Lisbon: International Copper Study Group; 2022. Pp. 61–68. URL: https://dev.icsg.org/wp-content/uploads/2021/11/ICSG-Factbook-2021.pdf
3. Викентьев И.В. Критическое и стратегическое минеральное сырье в Российской Федерации. *Геология рудных месторождений*. 2023;65(5):463–475. https://doi.org/10.31857/S0016777023050106
Vikentiev I.V. Critical and strategic minerals in the Russian Federation. *Geologiya Rudnyh Mestorozdenij*. 2023;65(5):463–475. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0016777023050106
4. Coulomb R., Dietz S., Godunova M., Nielsen Th.B. *Critical minerals today and in 2030: an analysis of OECD countries*. OECD Environment working papers. London, UK. 2015;91:1–51. https://doi.org/10.1787/5jrtknwm5hr5-en
5. Skirrow R.G., Huston D.L., Mernagh T.P. et al. *Critical commodities for a hightech world: Australia's potential to supply global demand*. Canberra: Geoscience Australia; 2013. Pp. 1–118.
6. Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: Состояние и перспективы развития. *Геология рудных месторождений*. 2016;58(2):97–119. https://doi.org/10.7868/S0016777016020027
Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L. et al. Mineral resources of high-tech metals in Russia: state of the art and outlook. *Geologiya Rudnyh Mestorozhdenij*. 2016;58(2):97–119. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0016777016020027
7. *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*. Washington: The World Bank; 2017. Pp. 1–88. https://doi.org/10.1596/28312
8. Петров И.М. Экспортные позиции России на мировом рынке цветных металлов. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2020;(3):73–75.
Petrov I.M. Russia's export position in the global non-ferrous metal market. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2020;(3):73–75. (In Russ.)
9. Алексеев Я.В., Корчагина Д.А. Сырьевая база меди России: состояние и перспективы развития по 2040 г. *Отечественная геология*. 2023;(1):3–19. https://doi.org/10.47765/0869-7175-2023-10001
Alexeev Ya.V., Korchagina D.A. Mineral base of copper in Russia: the state and development prospects for up to 2040. *Otechestvennaya Geologiya*. 2023;(1):3–19. (In Russ.) https://doi.org/10.47765/0869-7175-2023-10001

10. Distler V.V., Genkin A.D., Dyuzhikov O.A. Sulfide petrology and genesis of copper-nickel ore deposits. In: *Geology and Metallogeny of Copper Deposits. Proceedings of the Copper Symposium 27th International Geological Congress*. Moscow, 1984. (Special Publication of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits). 2024:111–123. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-70902-9
11. Маракушев А.А., Панеях Н.А., Зотов И.А. Специфика образования медно-никелевых сульфидных месторождений в трапповых формациях (на примере Печенги и Норильска). *Доклады Академии наук*. 2002;382(5):668–673. (Trans. ver.: Marakushev A.A., Paneyakh N.A., Zotov I.A. Specific features of the formation of copper-nickel sulfide deposits in trap rocks: evidence from the Pechenga and Noril'sk regions. *Doklady Earth Sciences*. 2002;383(2):129–133.)
Marakushev A.A., Paneyakh N.A., Zotov I.A. Specific features of the formation of copper-nickel sulfide deposits in trap rocks: evidence from the Pechenga and Noril'sk regions. *Doklady Earth Sciences*. 2002;383(2):129–133. (Orig. ver.: Marakushev A.A., Paneyakh N.A., Zotov I.A. Specific features of the formation of copper-nickel sulfide deposits in trap rocks: evidence from the Pechenga and Noril'sk regions. *Doklady Akademii Nauk*. 2002;382(5):668–673. (In Russ.))
12. Naldrett A.J. *Magmatic sulfide deposits: Geology, Geochemistry and Exploration*. Berlin, Heidelberg: Springer, Verlag; 2004. 727 p.
13. Заскинд Е.С., Конкина О.М. Типизация сульфидных медно-никелевых и платинометалльных месторождений для целей прогноза и поисков. *Отечественная геология*. 2019;(2):3–15. https://doi.org/10.24411/0869-7175-2019-10010
Zaskind E.S., Konkina O.M. Sulfide Cu-Ni and PGM deposit typification for forecasting and prospecting. *Otechestvennaya Geologiya*. 2019;(2):3–15. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0869-7175-2019-10010
14. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения: зарождение, внедрение и становление рудоносных мафит-ультрамафитовых магм. *Руды и металлы*. 2012;(6):9–23.
Likhachev A.P. Platinum-copper-nickel and platinum deposits: the birth, intrusion and becoming ore-bearing mafic-ultramafic magmas. *Ores and Metalls*. 2012;(6):9–23. (In Russ.)
15. Бородаевская М.Б., Горжевский Д.И., Кривцов А.И. и др. *Колчеданные месторождения мира*. М.: Недра; 1979. 284 с.
Borodaevskaya M.B., Gorzhevsky D.I., Krivtsov A.I. et al. *Pyrite deposits of the world*. Moscow: Nedra Publ. House; 1979. 284 p. (In Russ.)
16. Robb L.J. *Introduction to ore-forming processes*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. Malden, Oxford, Carlton: Blackwell Publ.; 2005. 386 p.
17. Викентьев И.В. *Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд*. М.: Научный мир; 2004. 344 с.
Vikentyev I.V. *Conditions of formation and metamorphism of pyrite ores*. Moscow: Nauchny Mir, 2004. 344 p. (In Russ.)
18. Маракушев А.А., Русинов В.Л., Панеях Н.А. и др. Звено генетической связи между сульфидными медно-никелевыми и медно-цинковыми колчеданными месторождениями. *Доклады Академии наук*. 2001;380(5):667–670. (Trans. ver.: Marakushev A.A., Rusinov V.L., Paneyakh N.A. et al. The intermediate member in the genetic chain between Cu-Ni sulfide and Cu-Zn massive sulfide deposits. *Doklady Earth Sciences*. 2001;381:932–934.)
Marakushev A.A., Rusinov V.L., Paneyakh N.A. et al. The intermediate member in the genetic chain between Cu-Ni sulfide and Cu-Zn massive sulfide deposits. *Doklady Earth Sciences*. 2001;381:932–934. (Orig. ver.: Marakushev A.A., Rusinov V.L., Paneyakh N.A. et al. The intermediate member in the genetic chain between Cu-Ni sulfide and Cu-Zn massive sulfide deposits. *Doklady Akademii Nauk*. 2001;380(5):667–670. (In Russ.))
19. Маракушев А.А., Панеях Н.А., Зотов И.А. Петрогенетические типы колчеданных и полиметаллических месторождений. *Литосфера*. 2011;(3):84–103.
Marakushev A.A., Paneyakh N.A., Zotov I.A. Petrogenetic types of massive sulfide (VMS) and polymetalic deposits. *Lithosphere* (*Russia*). 2011;(3):84–103. (In Russ.)
20. Серавкин И.Б., Косарев А.М. Южный Урал и Рудный Алтай: сравнительный палеовулканический и металлогенический анализ. *Геология рудных месторождений*. 2019;61(2):3–22. https://doi.org/10.31857/S0016-77706123-22
Seravkin I.B., Kosarev A.M. South Urals and Rudny Altai: a comparative paleovolcanic and metallogenic analysis. *Geologiya Rudnyh Mestorozdenij.* 2019;61(2):3–22. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0016-77706123-22
21. Сотников В.И. Медно-молибден-порфировая рудная формация: природа, проблема объема и границ. *Геология и геофизика*. 2006;47(3):355–363.
Sotnikov V.I. Porphyry copper-molybdenum ore association: genesis, dimensions, and boundaries. *Geologiya i Geofizika*. 2006;47(3):355–363. (In Russ.)
22. Sun W., Zhang C.-C., Li H. et al. The formation of porphyry copper deposits. *Acta Geochimica*. 2017;36(1):9–15. https://doi.org/10.1007/s11631-016-0132-4
23. Звездов В.С. Обстановки формирования крупных и сверхкрупных медно-порфировых месторождений. *Отечественная геология*. 2019;(5):16–35.
Zvezdov V.S. Major and giant porphyry copper deposit formation environments. *Otechestvennaya Geologiya*. 2019;(5):16–35. (In Russ.)

24. Heinrich C.A., Halter W., Landtwing M.R., Pettke T. The formation of economic porphyry copper (-gold) deposits: constraints from microanalysis of fluid and melt inclusions. *Geological Society Special Publication*. 2005;248:247–263. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2005.248.01.13
25. Lee C.-T. A., Tang M. How to make porphyry copper deposits. *Earth and Planetary Science Letters*. 2020;529:115868. https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2019.115868
26. Мигачёв И.Ф., Звездов В.С., Минина О.В. Формационные типы медно-порфировых месторождений и их рудно-магматические системы. *Отечественная геология*. 2022;(1):26–48.
Migachev I.F., Zvezdov V.S., Minina O.V. Formational types of porphyry copper deposits and their ore-magmatic systems. *Otechestvennaya Geologiya*. 2022;(1):26–48. (In Russ.)
27. Lur'ye A.M. Formation conditions of copper-sandstone and copper-shale deposits. In: *Geology and Metallogeny of Copper Deposits*. *Proceedings of the Copper Symposium 27th International Geological Congress*. Moscow, 1984. Springer Link; 1986. Pp. 477–491.
28. Лурье А.М. *Генезис медистых песчаников и сланцев*. М.: Наука; 1988. 180 p.
Lur'ye A.M. Genesis of copper sandstones and shales. Moscow: Nauka Publ. House; 1988. 180 p. (In Russ.)
29. Boyle R.W., Brown A.C., Jefferson C.W. et al. *Sediment-hosted stratiform copper deposits*. Ottawa: Geological Association of Canada; 1989. 710 p.
30. Габлина И.Ф. Роль геохимических барьеров при формировании сульфидных руд в различных геологических обстановках. *Отечественная геология*. 2021;(2):63–73.
Gablina I.F. Role of geochemical barriers in forming sulfide ores in various geological environments. *Otechestvennaya Geologiya*. 2021;(2):63–73. (In Russ.)
31. Синяков В.И. Генетические типы скарновых рудообразующих систем. *Труды института геологии и геофизики*. Новосибирск: Наука, СО АН СССР. 1990;774:1–71.
Sinyakov V.I. *Genetic types of scarn ore-forming systems. Proceedings of the institute of geology and geophysics*. Novosibirsk: Nauka, SB of the USSR Academy of Sciences. 1990;774:1–71. (In Russ.)
32. Meinert L.D., Hedenquist J.W., Satoh H., Matsuhisa Y. Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids. *Economic Geology*. 2003;98:147–156. https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.98.1.147
33. Грабежев А.И., Шардакова Г.Ю. Рудоносные гранитоиды медно-скарновых месторождений Урала: петрогеохимия в связи с особенностями рудно-метасоматической зональности. *Литосфера*. 2006;(4):68–78.
Grabezhev A.I., Shardakova G.Yu. Ore-bearing granitoids of uralian copper-skarn deposits: pertrogeochemistry in connection with ore-metasomatic zonality features. *Lithosphere* (*Russia*). 2006;(4):68–78. (In Russ.)
34. Poltavets Y.A., Poltavets Z.I., Nechkin G.S. Volkovsky deposit of titanomagnetite and copper-titanomagnetite ores with accompanying noble-metal mineralization, the Central Urals, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2011:53(2):126–139. https://doi.org/10.1134/S1075701511020061
35. Bornhorst T.J., Barron R.J. Copper deposits of the western Upper Peninsula of Michigan. *The Geological Society of America. Field Guide*. 2011;24:83–99. https://doi.org/10.1130/2011.0024(05)
36. Новгородова М.И. С*амородные металлы в гидротермальных рудах*. М.: Наука; 1983. 288 p.
Novgorodova M.I. *Native metals in hydrothermal ores*. Moscow: Nauka Publ. House; 1983. 288 p. (In Russ.)
37. Burrows D.R., Lesher C.M. Copper-rich magmatic Ni-Cu-PGE deposits. In: Hedenquist J.W., Harris M., Camus F. *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world*: *A tribute to Richard H. Sillitoe*. Society of Economic Geologists; 2012. Pp. 515–552. https://doi.org/10.5382/SP.16
38. Peck D.C., Huminicki M.A.E. Value of mineral deposits associated with mafic and ultramafic magmatism: Implications for exploration strategies. *Ore Geology Reviews*. 2016;72(P1):269–298. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.004
39. Турченко С.И., Турченко Ф.А. Cu-Ni-PGE ресурсы докембрийских сульфидных месторождений: Аналитический обзор. *Региональная геология и металлогения*. 2022;89:93–106.
Turchenko S.I., Turchenko F.A. Cu-Ni-PGE resources of the precambrian sulphide deposits: analytic review. *Regional Geology and Metallogeny*. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2021_89_93-106
40. Sillitoe R.H., Lehmann B. Copper-rich tin deposits. *Mineralium Deposita*. 2022;57(1):1–11. https://doi.org/10.1007/s00126-021-01078-9
41. Seltmann R., Soloviev S., Pirajno F. et al. Metallogeny of Siberia: tectonic, geologic and metallogenic settings of selected significant deposits. *Australian Journal of Earth Sciences*. 2010;57(6):655–706. https://doi.org/10.1080/08120099.2010.505277
42. Vielreicher N.M., Groves D.I., Vielreicher R.M. The Phalaborwa (Palabora) deposit and its potential connection to iron-oxide cooper-gold deposits of olympic dam type. In: Porter T.M. (Ed.) *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*. Adelaide: PGC Publ. 2000;1:321–329.
43. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Талалай А.Г. Техногенные месторождения: Особенности исследований. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2019;(3):58–62. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-58-62
Makarov A.B., Khasanova G.G., Talalay A.G. Technogenic deposits: research features. *News of the Ural State Mining University*. 2019;(3):58–62. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-58-62

44. Potravny I., Novoselov A., Novoselova I. et al. The technogenic deposits' development as a factor of overcoming resource limitations and ensuring sustainability. *Preprints*. 2023:1–16. https://doi.org/10.20944/preprints202309.1430.v1
45. Селезнев С.Г., Степанов Н.А. Отвалы Аллареченского сульфидного медно-никелевого месторождения как новый геолого-промышленный тип техногенных месторождений. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2011;(5):32–40.
Seleznev S.G., Stepanov N.A. Dumps of allarechensky sulphide copper-nickel deposit as a new type of geological and industrial man-made deposits. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2011;(5):32–40. (In Russ.)
46. Украинцев И.В., Трубилов В.С., Клепиков А.С. Бедное, некондиционное и техногенное сырье как перспективный источник получения меди. *Цветные металлы*. 2016;(10):36–42. https://doi.org/10.17580/tsm.2016.10.05
Ukraintsev I.V., Trubilov V.S., Klepikov A.S. Poor, ill-conditioned and technogenic raw materials as a prospective source of copper obtaining. *Tsvetnye Metally*. 2016;(10):36–42. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/tsm.2016.10.05
47. Бобомуротов Б.Б. Пространственное распределение меди и цинка в главной рудной залежи Урупского медноколчеданного месторождения, Северный Кавказ. *Металлогения древних и современных океанов*. 2022;28:226–229.
Bobomurotov B.B. Cu and Zn spatial distribution in the main ore body of the urup massive sulfide deposit, northern Caucasus. *Metallogeniya Drevnikh i Sovremennykh Okeanov*. 2022;28:226–229. (In Russ.)
48. Курбанов М.М., Богуш И.А., Рылов В.Г. *Колчеданное месторождение Кизил-Дере в Горном Дагестане*. М.: Научный мир; 2014. 244 с.
Kurbanov M.M., Bogush I.A., Krylov V.G. *The pyrite deposit of Kizil-Dere in Mountainous Dagestan*. Moscow: Nauchnyy Mir; 2014. 244 p. (In Russ.)
49. Татаринов С.И. О горно-металлургическом центре эпохи бронзы в Донбассе. *Советская археология*. 1977;(4):192–207.
Tatarinov S.I. About the mining and metallurgical center of the Bronze Age in Donbass. *Sovetskaya Arkheologiya*. 1977;(4):192–207. (In Russ.)
50. Шевырёв Л.Т., Савко А.Д., Черешинский А.В. Эволюция геодинамических обстановок Восточноевропейской платформы и её обрамления в фанерозое и ассоциирующие минерагенические трансгрессии. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016;(2):13–21.
Shevyrev L.T., Savko A.D., Chereshinskii A.V. Evolution of geodynamic circumstances of east european platform and its framing in phanerozoic and associated mineragenic transgressions. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology.* 2016;(2):13–21. (In Russ.)
51. Шубин Ю.П. Особенности вещественного состава, генезиса и контроля меднорудной минерализации Бахмутской котловины Донбасса. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического института*. 2020;(20):23–30.
Shubin Yu.P. Features of the material composition, genesis and control of copperore mineralization of the Donbass Bakhmut Basin. *Collection of Scientific Papers of Donbass State Technical Institute*. 2020;(20):23–30. (In Russ.)
52. Компанець Г.С., Ковальчук М.С., Константиненко Л.І. и др. Міденосність верхньоюрської червоноколірно-теригенної субформації Придобруджинського прогину. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2012;(5):99–105.
Kompanetz G.S., Kovalchuk M.S., Konstantinenko L.I. et al. Copper-bearing of the upper-jurassic red-colour-terrigenios subformation ofthe near-dobrudgian depression. *Collection of Scientific Works of the IGS NAS of Ukraine*. 2012;(5):99–105. (In Ukranian)
53. Чернышов Н.М. Сульфидные платиноидно-медно-кобальт-никелевые месторождения Новохоперского рудного района и проблемы их комплексного освоения в условиях жестких экологических ограничений. *Руды и металлы*. 2013;(6):5–13.
Chernyshov N.M. Sulfide platinoid-copper-cobalt-nickel deposits of Novokhopersk Ore District and the problems of their integrated development under strict environmental constraints and preservation of the unique ecosystem. *Ores and Metalls.* 2013;(6):5–13. (In Russ.)
54. Голубев А.И., Щипцов В.В., Михайлов В.П. Глушанин Л.В. Минерально-сырьевые ресурсы Республики Карелия. В: *Геология Карелии от архея до наших дней*. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН; 2011. С. 123–134.
Golubev A.I., Shchiptsov V.V., Mikhailov V.P. Glushanin L.V. Republic of Karelia's mineral resources. In: *Geology of Karelia from the Archean to the Present Day*. Petrozavodsk: Institute of Geology KarSC RAS; 2011. Pp. 123–134. (In Russ.)
55. Корнеев А.В., Вихко А.С., Фатов Н.В., Иващенко В.И. Месторождение Викша – первый крупный промышленно-перспективный платинометалльный рудный объект на территории Карелии. *Горный журнал*. 2019;(3):31–34. https://doi.org/10.17580/gzh.2019.03.06
Korneev A.V., Vikhko A.S., Fatov N.V., Ivashenko V.I. Viksha deposit – The first large industrially promising PGM locality in Karelia. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(3):31–34. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/gzh.2019.03.06

56. Тытык В.М., Фролов П.В. Молибденовое месторождение Лобаш – крупный перспективный объект в Республике Карелия. *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2014;(1):56–62.
Tytyk V.M., Frolov P.V. Lobash Molybdenum Deposit: a big promising economic deposit in the republic of karelia. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;(1):56–62. (In Russ.)

57. Иванова Н.В., Гусев А.В., Матреничев А.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Карельская. P-37-XV (Поча). Объяснительная записка. Минприроды России, Роснедра, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ), АО «Северо-Западное ПГО». СПб: ВСЕГЕИ; 2023. 136 с.
Ivanova N.V., Gusev A.V., Matrenichev A.V. et al. The state geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. The second edition. The Karelian series. P-37-XV. An explanatory note. The Ministry of Natural Resources of Russia, Rosnedra, the All-Russian Scientific Research Geological Institute named after A. P. Karpinsky (VSEGEI), North-Western PGO JSC. St. Petersburg: VSEGEI; 2023. 136 p. (In Russ.)

58. Турченко С.И. Платинометальная и сульфидно-никелевая металлогения палеопротерозойского рифтогенеза на Балтийском щите. *Геология рудных месторождений*. 2017;59(2):83–92. https://doi.org/10.7868/S0016777017020058
Turchenko S.I. Platinum-metal and sulfide-nickel metallogeny in the Paleoproterozoic rifting on the Baltic Shield. *Geologiya Rudnyh Mestorozhdenij*. 2017;59(2):83–92. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0016777017020058

59. Barnes S.J., Melezhik V.A., Sokolov S.V. The composition and mode of formation of the Pechenga nickel deposits, Kola Peninsula, Northwestern Russia. *The Canadian Mineralogist*. 2001;39(2):447–471. https://doi.org/10.2113/gscanmin.39.2.447

60. Чащин В.В., Иванченко В.Н. Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидные Pt-Pd руды Мончегорского рудного района (западный сектор Арктики): геологическая характеристика, минералого-геохимические и генетические особенности. *Геология и геофизика*. 2022:63(4):622–650. https://doi.org/10.15372/gig2021184
Chashchin V.V., Ivanchenko V.N. Sulfide pge-cu-ni and low-sulfide pt-pd ores of the monchegorsk ore district (Arctic Western Sector): geology, mineralogy, geochemistry, and genesis. *Geologiya i Geofizika*. 2022:63(4):622–650. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/gig2021184

61. Chashchin V.V., Petrov S.V., Drogobuzhskaya S.V. Loypishnyun low-sulfide Pt–Pd deposit of the Monchetundra basic massif, Kola peninsula, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2018;60(5):418–448. https://doi.org/10.1134/S1075701518050021

62. Субботин В.В., Корчагин А.У., Савченко Е.Э. Платинометалльная минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2012;(1):54–65.
Subbotin V.V., Korchagin A.U., Savchenko E.E. Platinum-metal mineralization in the Fedorovo-Pan ore node: types of mineralization, mineral composition and features of genesis. *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;(1):54–65. (In Russ.)

63. Грошев Н.Ю., Припачкин П.В., Рундквист Т.В. и др. Геологическое строение, геохимия и медно-никелево-платинометалльное оруденение Восточно-Панского расслоенного интрузива (Кольский регион, Россия). *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2023;20:57–67. https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.006
Groshev N.Yu., Pripachkin P.V., Rundkvist T.V. et al. Geological structure, geochemistry and copper-nickel-platinum-metal mineralization of the East Pana layered intrusion (Kola region, Russia). *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Mining Institute of KSC RAS*. 2023;20:57–67. (In Russ.) https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.006

64. Калинин А.А., Галкин Н.Н. Докембрийское медно-молибден-порфировое месторождение Пеллапахк (зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья). *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2012;(1):79–91.
Kalinin A.A., Galkin N.N. Precambrian copper-molybdenum porphyry deposit of Pellapakh (Kolmozero-Voronya greenstone belt). *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;(1):79–91. (In Russ.)

65. Войтеховский Ю.Л., Нерадовский Ю.Н., Гришин Н.Н. и др. Колвицкое месторождение (геология, вещественный состав руд). Вестник МГТУ. *Труды Мурманского государственного технического университета*. 2014;17(2):271–278.
Voytekhovsky Yu.L., Neradovsky Yu.N., Grishin N.N. et al. Kolvitsa field (geology, material composition of ores). *Vestnik of MSTU*. 2014;17(2):271–278. (In Russ.)

66. Naugolnykh S.V., Ivanov A.V., Uliakhin A.V., Novikov I.V. Paleoecological and depositional environment of permian copper-bearing sandstone fossil plants and tetrapod localities: Records from Bashkortostan and Kargalka river basin, Orenburg region, Russia. *Paleontological Journal*. 2022;56(11):1538–1555. https://doi.org/10.1134/S0031030122110120

67. Харитонов Т.В. Пермская медь: Обзор литературы. Пермь: Пермский государственный университет; 2016. 1098 с.
Kharitonov T.V. *Perm copper: A review of the literature*. Perm: Perm State University; 2016. 1098 p. (In Russ.)

68. Халезов А.Б. Перспективы и проблемы промышленного освоения месторождений меди верхнепермской красноцветной формации Западного Предуралья (способами подземного и кучного выщелачивания). *Руды и металлы*. 2011;(5):5–14.
Khalezov A.B. Perspectives and problems of the industrial exploitation of copper deposits of the upper permian red-coloured formation of the west preduralye (by methods of the bore hole and glomeroplasmatic leaching). *Ores and Metalls*. 2011;(5):5–14. (In Russ.)
69. Контарь Е.С. *Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы)*. Екатеринбург: УГГУ; 2013. 203 с.
Kontar E.S. *The geological-industrial types of the cu, zn, pb deposits in the urals (geological conditions of setting, history of the formation, the prospects)*. Yekaterinburg: UGSU; 2013. 203 p.
70. Грабежев А.И., Ронкин Ю.Л., Пучков В.Н. и др. Краснотурьинское медно-скарновое рудное поле (Северный Урал): U-Pb-возраст рудоконтролирущих диоритов и их место в схеме металлогении региона. *Доклады Академии наук*. 2014;456(4):443–447. https://doi.org/10.7868/S0869565214160191 (Trans. ver.: Grabezhev A.I., Ronkin Y.L., Rovnushkin M.Y. et al. Krasnotur'insk skarn copper ore field, northern urals: the U-Pb age of ore-controlling diorites and their place in the regional metallogeny. *Doklady Earth Sciences*. 2014;456(2):641–645. https://doi.org/10.1134/S1028334X14060117)
Grabezhev A.I., Ronkin Y.L., Rovnushkin M.Y. et al. Krasnotur'insk skarn copper ore field, northern urals: the U-Pb age of ore-controlling diorites and their place in the regional metallogeny. *Doklady Earth Sciences*. 2014;456(2):641–645. https://doi.org/10.1134/S1028334X14060117 (Orig. ver.: Grabezhev A.I., Ronkin Y.L., Rovnushkin M.Y. et al. Krasnotur'insk skarn copper ore field, northern urals: the U-Pb age of ore-controlling diorites and their place in the regional metallogeny. *Doklady Akademii Nauk*. 2014;456(4):443–447. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0869565214160191)
71. Грабежев А.И., Сотников В.И., Боровиков А.А., Азовскова О.Б. Генетическая типизация Гумешевского медно-скарнового месторождения (Средний Урал). *Доклады Академии наук*. 2001;380(2):242–244. (Trans. ver.: Grabezhev A.I., Sotnikov V.I., Borovikov A.A., Azovskova O.B. Genetic typification of the gumeshevsk skarn copper deposit, middle urals. *Doklady Earth Sciences*. 2001;380:830–832.)
Grabezhev A.I., Sotnikov V.I., Borovikov A.A., Azovskova O.B. Genetic typification of the gumeshevsk skarn copper deposit, middle urals. *Doklady Earth Sciences*. 2001;380:830–832. (Orig. ver.: Grabezhev A.I., Sotnikov V.I., Borovikov A.A., Azovskova O.B. Genetic typification of the gumeshevsk skarn copper deposit, middle urals. *Doklady Akademii Nauk*. 2001;380(2):242–244. (In Russ.))
72. Чудинова Н.Д. Из истории Меднорудянского рудника: начало. *Минералогия*. 2015;(1):81–85.
Chudinova N.D. History of the mednorudyanskoe mine: the beginning. *Mineralogy*. 2015;(1):81–85. (In Russ.)
73. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S. Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au-(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural, Russia. *Mineralium Deposita*. 2013;48(5):603–627. https://doi.org/10.1007/s00126-012-0449-9
74. Баранников А.Г., Савельева К.П. Состав и строение медистых глин Гумешевского медно-скарнового месторождения. *Вестник Пермского университета. Геология*. 2011;(3):60–69.
Barannikov A.G., Savelyeva K.P. The composition and structure of copper containing clays of Gumeshevski copper-scarn field. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2011;(3):60–69. (In Russ.)
75. Алтушкин И.А., Левин В.В., Король Ю.А., Карев Б.В. Опыт подземного выщелачивания руд Гумешевского медного месторождения. *Цветные металлы*. 2019;(5):17–32. https://doi.org/10.17580/tsm.2019.05.03
Altushkin I.A., Levin V.V., Korol Yu.A., Karev B.V. The practice of in-situ leaching of copper from the Gumeshevskoe deposit ores. Tsvetnye Metally. 2019;(5):17–32. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/tsm.2019.05.03
76. Тучина М.В., Ермакова Ю.В. Обеспеченность запасами медьдобывающих предприятий Южного и Среднего Урала, состояние и перспективы развития их сырьевой базы. *Руды и металлы*. 2019;(3):12–21. https://doi.org/10.24411/0869-5997-2019-10019
Tuchina M.V., Ermakova Yu.V. Reserve sufficiency of South and Middle Urals copper mines, their mineral base status and prospects. *Ores and Metalls*. 2019;(3):12–21. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0869-5997-2019-10019
77. Бородаевская М.Б., Вахрушев М.И., Контарь Е.С. *Геологическое строение Гайского рудного района и условия локализации в нем медноколчеданного оруденения (Южный Урал)*. М.: ЦНИГРИ; 1968. 214 с.
Borodaevskaya M.B., Vakhrushev M.I., Kontar E.S. *The geological structure of the Gaisky ore region and the conditions of localization of copper-crusted mineralization in it (Southern Urals)*. Moscow: TSNIGRI; 1968. 214 p. (In Russ.)
78. Миниярова Д.В. Юбилейное медно-колчеданное месторождение. *Устойчивое развитие науки и образования*. 2019;(1):253–255.
Miniyarova D.V. Jubilee copper-pyrite deposit. *Ustoychivoye Razvitiye Nauki i Obrazovaniya*. 2019;(1):253–255. (In Russ.)
79. Петрова О.В., Байназарова Г.Р., Янтурина Ю.Д. Обоснование проектных решений по разработке месторождений Озерное и Западно-Озерное с учетом предотвращенного экологического ущерба. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2012;70(1):51–54.
Petrova O.V., Bainazarova G.R., Yanturina Yu.D. Justification of design solutions for the development of the Ozernoye and Zapadno-Ozernoye fields, taking into account the prevented environmental damage. *Aktual'nyye Problemy Sovremennoy Nauki, Tekhniki i Obrazovaniya*. 2012;70(1):51–54. (In Russ.)

80. Галиуллин И.Б. Особенности геологического строения и вещественного состава руд ново-учалинского медноколчеданного месторождения, Южный Урал. *Металлогения древних и современных океанов*. 2011;(1):294–295.
Galiullin I.B. Features of the geological structure and material composition of ores of the Novo-Uchalinsky copper-crusted deposit, Southern Urals. *Metallogeniya Drevnikh i Sovremennykh Okeanov*. 2011;(1):294–295. (In Russ.)
81. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. Оценка потенциала и технологий освоения месторождений медноколчеданных руд в зоне Приполярного Урала. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2018;(4):190–203.
Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M. Assessment of the potential and technologies of development of deposits of copper-pyrite ores in the zone of the Subpolar Urals. *Izvestija Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2018;(4):190–203. (In Russ.)
82. Минина О.В., Мигачёв И.Ф. Медно-порфировые провинции и зоны Южного Урала (прогнозно-металлогеническое районирование). *Отечественная геология*. 2018;(4):26–41.
Minina O.V., Migachev I.F. Porphyry Copper Provinces and Zones of the Southern Urals (Forecasting-Metallogenic Zoning). *Otechestvennaya Geologiya*. 2018;(4):26–41. (In Russ.)
83. Алтушкин И.А., Левин В.В., Гордеев А.И., Пикалов В.А. Особенности освоения Томинского и Михеевского меднорудных месторождений Южного Урала. *Цветные металлы*. 2019;(7):21–28. https://doi.org/10.17580/tsm.2019.07.02
Altushkin I.A., Levin V.V., Gordeev A.I., Pikalov V.A. Development of the Tominsk and Mikheevsk copper ore deposits of the Southern Urals. *Tsvetnye Metally*. 2019;(7):21–28. (In Russ.) https://doi.org/10.17580/tsm.2019.07.02
84. Андреев А.В., Гирфанов М.М., Куликов Д.А. и др. Рудные районы с медно-порфировым оруденением – перспективная минерально-сырьевая база меди Южного Урала. *Отечественная геология*. 2018;(4):3–17.
Andreev A.V., Girfanov M.M., Kulikov D.A. Ore districts with porphyry copper mineralization – prospective mineral base in the Southern Urals. *Otechestvennaya Geologiya*. 2018;(4):3–17. (In Russ.)
85. Грабежев А.И., Коровко А.В., Азовскова О.Б., Прибавкин С.В. Потенциально промышленная Алапаевско-Сухоложская медно-порфировая зона (Средний Урал). *Литосфера*. 2015;(3):79–92.
Grabezhev A.I., Korovko A.V., Azovskova O.B., Pribavkin S.V. Potentially commercial Alapayevsk-Sukhoy Log porphyry copper zone (the Middle Urals). *Lithosphere* (*Russia*). 2015;(3):79–92. (In Russ.)
86. Полтавец Ю.А., Полтавец З.И., Нечкин Г.С. Волковское месторождение титаномагнетитовых и медно-титаномагнетитовых руд с сопутствующей благороднометальной минерализацией (Средний Урал, Россия). *Геология рудных месторождений*. 2011;53(2):143–157.
Poltavets Yu.A., Poltavets Z.I., Nechkin G.S. Volkovskoye deposit of titanium-magnetite and copper-titanium-magnetite ores, with concomitant noble metal mineralization in the Middle Urals of Russia. *Geologiya Rudnyh Mestorozdenij*. 2011;53(2):143–157. (In Russ.)
87. Душин В.А. Металлогения Ляпинского мегаблока (Приполярный Урал). *Известия Уральского государственного горного университета*. 2021;(2):88–105. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-88-105
Dushin V.A. Metallogeny of the Lyapinsky megablock (Subpolar Urals). *News of the Ural State Mining University*. 2021;(2):88–105. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-88-105
88. Савчук Ю.С., Волков А.В., Аристов В.В. Медистые базальты Северного Урала. *Литосфера*. 2017;17(3):133–144.
Savchuk Y.S., Volkov A.V., Aristov V.V. Cupriferous basalts of the Northern Urals. *Lithosphere* (*Russia*). 2017;17(3):133–144. (In Russ.)
89. Серавина Т.В. Положение колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири в вулканогенном разрезе (на примере Рудноалтайской, Салаирской, Кызыл-Таштыгской и Приаргунской минерагенических зон). *Металлогения древних и современных океанов*. 2018;(1):104–108.
Seravina T.V. The position of pyrite-polymetallic deposits of Siberia in the volcanogenic section (on the example of the Rudnoaltai, Salair, Kyzyl-Tashtyg and Priargun mineragenic zones). *Metallogeniya Drevnikh i Sovremennykh Okeanov*. 2018;(1):104–108. (In Russ.)
90. Алабин Л.В. Структурно-формационная и металлогеническая зональность Кузнецкого Алатау. *Труды института геологии и геофизики*. Новосибирск: Наука, СО АН СССР. 1983;527:1–111.
Alabin L.V. Structural-formational and metallogenic zonality of the Kuznetsk Alatau. *Proceedings of the institute of geology and geophysics*. Novosibirsk: Nauka, SB of the USSR Academy of Sciences. 1983;527:1–111. (In Russ.)
91. Soloviev S.G., Voskresensky K.I., Sidorova N.V. et al. The Glafirinskoe and related skarn Cu-Au-W-Mo deposits in the Northern Altai, SW Siberia, Russia: geology, igneous geochemistry, zircon U-Pb geochronology, mineralization, and fluid inclusion characteristics. *Ore Geology Reviews*. 2021;138:104382. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104382
92. Soloviev S.G., Sidorova N.V., Kryazhev S.G. et al. Geology, mineralization, igneous geochemistry, and zircon U-Pb geochronology of the early paleozoic shoshonite-related Julia skarn deposit, SW Siberia,

Russia: toward a diversity of Cu-Au-Mo skarn to porphyry mineralization in the Altai-Sayan orogenic system. *Ore Geology Reviews*. 2022;142:104706. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104706

93. Рудюк А.К., Метальникова Е.С. Полезные ископаемые Кузбасса. Молибден. В: *Материалы VI Международного молодежного экологического форума*. Кемерово, 16–17 ноября 2022 г. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет; 2023. С. 322.1–322.4.
Rudyuk A.K., Metalnikova E.S. Minerals of Kuzbass. Molybdenum. In: *Proceedings of the VI International Youth Environmental Forum*. Kemerovo, November 16–17, 2022 Kemerovo: Kuzbass State Technical University; 2023. Pp. 322.1–322.4. (In Russ.)
94. *Геология СССР. Том XIV. Западная Сибирь* (*Кемеровская, Новосибирская, Омская, Томская области, Алтайский край*). *Полезные ископаемые*. Под ред. Е.А. Козловского. В 2-х книгах. М., Недра. 1982;2:1–319.
Kozlovsky E.A. (Ed.) *Geology of the USSR. Volume XIV. Western Siberia* (*Kemerovo, Novosibirsk, Omsk, Tomsk regions, Altai Territory*). *Minerals*. In 2 books. Moscow: Nedra Publ. House. 1982;2:1–319. (In Russ.)
95. Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Романов А.П. и др. Центрально-Арктический золотосодержащий медно-молибден-порфировый пояс. *Региональная геология и металлогения*. 2021;85:31–49.
Proskurnin V.F., Petrov O.V., Romanov A.P. et al. Central Arctic gold-bearing copper-molybdenum-porphyric belt. *Regional Geology and Metallogeny*. 2021;85:31–49. (In Russ.)
96. Струнин Б.М., Дюжиков О.А., Бармина О.А., Комаров В.В. *Геологическая карта Норильского рудного района масштаба 1 : 200 000. Объяснительная записка*. М.: Геоинформмарк; 1994. 122 с.
Strunin B.M., Dyuzhikov O.A., Barmina O.A., Komarov V.V. *Geological map of the Norilsk ore region scale 1 : 200 000. Explanatory note*. Moscow: Geoinformmark; 1994. 122 p. (In Russ.)
97. Ерыкалов С.П., Ковальчук К.К., Снисар С.Г. Геология и строение Масловского платино-медно-никелевого месторождения. *Разведка и охрана недр*. 2010;(9):31–34.
Erykalov S.P., Kovalchuk K.K., Snisar S.G. Geology and structure of Maslovskii platinum-copper-nickel deposit. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2010;(9):31–34. (In Russ.)
98. Malitch K.N. Forecasting criteria for sulphide PGE-copper-nickel deposits of the Noril'sk province. *Lithosphere* (*Russia*). 2021;21(5):660–682. https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-660-682
99. Старосельцев В.С. О возможности открытия богатого медно-никелевоплатинового оруденения на севере Хараелахских гор. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2016;(4):84–86.
Staroseltsev V.S. On the possibility of discovering rich copper-nickel-platinum mineralization in the north of the Kharaelakh Mountains. *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2016;(4):84–86. (In Russ.)
100. Мирошникова Л.К., Мезенцев А.Ю., Семенякина Н.В., Котельникова Е.М. Геолого-геохимические признаки и критерии потенциально рудоносного Тангаралахского интрузива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(6):115–130. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-6-0-115-130
Miroshnikova L.K., Mezentsev A.Yu., Semenyakina N.V., Kotel'nikova E.M. Geological and geochemical signs and criteria of potential mineralization in the Tangaralakh intrusion. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(6):115–130. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-6-0-115-130
101. Комарова М.З. Месторождение медно-молибденовых руд на Таймыре. *Руды и металлы*. 2012;(6):74–78.
Komarova M.Z. Copper-molybdenum ores in Taimyr. *Ores and Metalls*. 2012;(6):74–78. (In Russ.)
102. Брагин В.И., Мацко Н.А., Харитонова М.Ю. Оценка эффективности освоения перспективных месторождений меди и золота Красноярского Севера. *Арктика и Север*. 2017;26:5–13. https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2017.26.5
Bragin V.I., Matsko N.A., Kharitonova M.J. Estimation of efficiency of development of copper and gold deposits of Krasnoyarsk North. *Arctic and North*. 2017;26:5–13. (In Russ.) https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2017.26.5
103. Gablina I.F. Genetic types of copper mineralization in the Igarka area, west of the Siberian platform. *Geology and metallogeny of copper deposits. Proceedings of the copper symposium 27th International Geological Congress*. Moscow, 1984. Springer Link; 1986. Pp. 524–539.
104. Ржевский В.Ф., Габлина И.Ф., Василовская Л.В., Лурье А.М. Генетические особенности Гравийского месторождения меди. *Литология и полезные ископаемые*. 1988;(2):86–97.
Rzhevsky V.F., Gablina I.F., Vasilovskaya L.V., Lurie A.M. Genetic features of the Arabian copper deposit. *Lithology and Minerals*. 1988;(2):86–97. (In Russ.)
105. Ломаева Г.Р., Тарасов А.В. Кингашское месторождение сульфидных благороднометалльно-медно-никелевых руд – первое в Восточном Саяне. *Разведка и охрана недр*. 2010;(9):28–31.
Lomaeva G.R., Tarasov A.V. The Kingash Sulfide, precious metal and nickel-copper deposit, the first discovered in the Eastern Sayan. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2010;(9):28–31. (In Russ.)
106. Кравцова О.А., Моторин Ю.М., Козырев С.М. и др. Перспективное медно-никелевое сырье Кингашского рудного района на примере Верхнекингашского рудопроявления. *Разведка и охрана недр*. 2006;(8):32–37.
Kravtsova O.A., Motorin Y.M., Kozyrev S.M. et al. Promising copper-nickel raw materials of the Kingash ore region on the example of the Verkhnekingash ore occurrence. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2006;(8):32–37. (In Russ.)

107. Смагин А.Н., Парначев В.П. О новом Кахтарминском потенциально рудоносном районе Восточно-Саянской никель-платиноносной провинции. *Вестник Томского государственного университета*. 2012;363:214–218.
Smagin A.N., Parnachev V.P. About the new Kakhtarma potentially ore-bearing area of the East Sayan nickel-platinum province. *Tomsk State University Journal*. 2012;363:214–218. (In Russ.)

108. Бурдин Н.В., Лебедев В.И., Лебедев Н.И. Золото-медь-молибден-порфировые руды. *Успехи современного естествознания*. 2009;(5):15–22.
Burdin N.V., Lebedev V.I., Lebedev N.I. Gold-copper-molybdenum-porphyry ores. *Advances in Current Natural Sciences*. 2009;(5):15–22. (In Russ.)

109. Монгуш А.Д.О., Лебедев В.И. Ак-Сугское медно-молибден-порфировое месторождение: вещественный состав пород и руд. *Известия СО РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2013;(1):22–29.
Mongush Ai.D., Lebedev V. Ak-Sug copper-molibdenum-porphyry deposit: mineral composition of rocks and ores. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2013;(1):22–29. (In Russ.)

110. Андреев А.В., Гирфанов М.М., Старостин И.А. и др. Геологическое строение, рудно-метасоматическая и минералого-геохимическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва. *Руды и металлы*. 2021;(1):57–76. https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10004
Andreev A.V., Girfanov M.M., Starostin I.A. et al. Geological structure, ore-metasomatic and mineralogical geochemical zoning of Au-Mo-Cu porphyry Kyzyk-Chadr deposit, Tyva republic. *Ores and Metals*. 2021;(1):57–76. (In Russ.) https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10004

111. Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Kalinin Y.A. et al. Mineralogical and geochemical peculiarities and Pt conditions of ores from the Kyzyl-Tashtyg VMS polymetallic deposit, Eastern Tuva: fluid inclusion and S, O, C isotopic data. *Ore Geology Reviews*. 2022;142:104717. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104717

112. Кислов Е.В. Северо-Байкальская платинометально-медь-никеленосная провинция: геодинамика, петрология, рудообразование. В: *Металлогения древних и современных океанов – 2023. Минералогия и геохимия рудных месторождений: от теории к практике Материалы Двадцать девятой научной молодежной школы имени профессора В. В. Зайкова*. Миасс; 2023. С. 40–44.
Kislov E.V. The North Baikal PGE-Ni-Cu province: geodynamics, petrology, ore genesis. In: *Metallogeny of Ancient and Modern Oceans – 2023. Mineralogy and geochemistry of ore deposits: from theory to practice Proceedings of the Professor V.V. Zaykov XXIXth Scientific Youth School*. Miass; 2023. Pp. 40–44. (In Russ.)

113. Рудашевский Н.С., Крецер Ю.Л., Орсоев Д.А., Кислов Е.В. Палладиево-платиновая минерализация в жильных Cu-Ni-рудах Йоко-Довыренского расслоенного массива. *Доклады Академии наук*. 2003;391(4):519–522. (Trans. ver.: Rudashevsky N.S., Kretser Yu.L., Orsoev D.A., Kislov E.V. Palladium-platinum mineralization in copper-nickel vein ores in the ioko-dovyren layered massif. *Doklady Earth Sciences*. 2003;391(6):858–861.)
Rudashevsky N.S., Kretser Yu.L., Orsoev D.A., Kislov E.V. Palladium-platinum mineralization in copper-nickel vein ores in the ioko-dovyren layered massif. *Doklady Earth Sciences*. 2003;391(6):858–861. (Orig. ver.: Rudashevsky N.S., Kretser Yu.L., Orsoev D.A., Kislov E.V. Palladium-platinum mineralization in copper-nickel vein ores in the ioko-dovyren layered massif. *Doklady Akademii Nauk*. 2003;391(4):519–522. (In Russ.))

114. Конников Э.Г., Цыганков А.А., Орсоев Д.А. Чайское медно-никелевое месторождение. *Месторождения Забайкалья*. 1995;1(1):39–47.
Konnikov E.G., Tsygankov A.A., Orsoev D.A. Chayskoye copper-nickel deposit. *Deposits of Transbaikalia*. 1995;1(1):39–47. (In Russ.)

115. Gongalsky B., Krivolutskaya N. *World-class mineral deposits of Northeastern Transbaikalia, Siberia, Russia*. Cham, Switzerland: Springer; 2019. 323 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03559-4

116. Чечёткин В.С., Володин Р.Н., Наркелюн Л.Ф. и др. Удоканское месторождение медистых песчаников. *Месторождения Забайкалья*. 1995;1(1):10–19.
Chechetkin V.S., Volodin R.N., Narkelyun L.F. et al. Udokan deposit of copper sandstones. *Deposits of Transbaikalia*. 1995;1(1):10–19. (In Russ.)

117. Трубачев А.И., Чечёткин В.С., Секисов А.Г. и др. Стратиформные месторождения зоны бам и проблемы их освоения. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2014;(12):51–64.
Trubachev A.I., Chechetkin V.S., Sekisov A.G. et al. Stratiform deposits of the bam zone and problems of their development. *Transbaikal State University Journal*. 2014;(12):51–64. (In Russ.)

118. Гонгальский Б.И. Ресурсный потенциал Удокан-Чинейского рудного района, Забайкальский край. *Руды и металлы*. 2011;(3–4):45.
Gongal'sky B.I. Potential resources of the Udokan-Chinei ore cluster, Transbaikalia. *Ores and Metals*. 2011;(3–4):45. (In Russ.)

119. Якубчук А.С., Адырхаев В.В., Бачуля Л.И., Шматов С.А. Что хранят недра рядом с Удоканом? *Рациональное освоение недр*. 2020;(1):58–61. https://doi.org/10.26121/RON.2020.61.32.005
Yakubchuk A.S., Bachulya L.I., Adyrkhayev V.V., Shmatov S.A. What else is hidden near Udokan? *Ratsionalnoe Osvoenie Nedr*. 2020;(1):58–61. (In Russ.) https://doi.org/10.26121/RON.2020.61.32.005

120. Гонгальский Б.И. Медные и урановые месторождения Кодаро-Удоканского района. *Разведка и охрана недр*. 2023;(2):12–21. https://doi.org/10.53085/0034-026X_2023_02_12
Gongalskiy B.I. Copper and uranium deposits of the Kodaro-Udokan district. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2023;(2):12–21. (In Russ.) https://doi.org/10.53085/0034-026X_2023_02_12

121. Цымбалист С.И., Рябкин В.К., Литвинцев Э.Г. и др. Рациональная технология предварительного радиометрического обогащения медно-сульфидных платинометалльных руд участка Рудный Чинейского месторождения. *Разведка и охрана недр*. 2017;(2):37–40.
Tsymbalist S.I., Ryabkin V.K., Litvintsev E.G. et al. Rational technology pre-sky radiometriche enrichment copper sulphide platinum metal ore area ore deposits chineyskoye. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2017;(2):37–40. (In Russ.)

122. Хомич В.Г., Борискина Н.Г. Совершенствование минерагенического районирования Восточного Забайкалья на основе геофизических исследований. *Геология и геофизика*. 2017;58(7):1029–1046. https://doi.org/10.15372/GiG20170706 (Trans. ver.: Khomich V.G., Boriskina N.G. Advancement of mineragenic regionalization of eastern transbaikalia based on geophysical studies. *Russian Geology and Geophysics*. 2017;58(7):822–835. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.06.005)
Khomich V.G., Boriskina N.G. Advancement of mineragenic regionalization of eastern transbaikalia based on geophysical studies. *Russian Geology and Geophysics*. 2017;58(7):822–835. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.06.005 (Orig. ver.: Khomich V.G., Boriskina N.G. Advancement of mineragenic regionalization of eastern transbaikalia based on geophysical studies. *Geologiya i Geofizika*. 2017;58(7):1029–1046. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/GiG20170706)

123. Коваленкер В.А., Абрамов С.С., Киселева Г.Д. и др. Крупное Быстринское Cu-Au-Fe-месторождение (Восточное Забайкалье) – первый в России пример ассоциированной с адакитами скарново-порфировой рудообразующей системы. *Доклады Академии наук*. 2016;468(5):547–552. https://doi.org/10.7868/S0869565216170205 (Trans. ver.: Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D. et al. The large bystrinskoe Cu–Au–Fe deposit (Eastern Trans-Baikal region): Russia's first example of a skarn–porphyry ore-forming system related to adakite. *Doklady Earth Sciences*. 2016;468(2):566–570. https://doi.org/10.1134/S1028334X1606012X)
Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D. et al. The large bystrinskoe Cu–Au–Fe deposit (Eastern Trans-Baikal region): Russia's first example of a skarn–porphyry ore-forming system related to adakite. *Doklady Earth Sciences*. 2016;468(2):566–570. https://doi.org/10.1134/S1028334X1606012X (Orig. ver.: Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D. et al. The large bystrinskoe Cu–Au–Fe deposit (Eastern Trans-Baikal region): Russia's first example of a skarn–porphyry ore-forming system related to adakite. *Doklady Akademii Nauk*. 2016;468(5):547–552. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0869565216170205)

124. Ковалев К.Р., Калинин Ю.А., Туркина О.М. и др. Култуминское золото-медно-железо-скарновое месторождение (Восточное Забайкалье, Россия): петрогеохимические особенности магматизма и процессы рудообразования. *Геология и геофизика*. 2019;60(6):749–771. https://doi.org/10.15372/GiG2019078
Kovalev K.R., Kalinin Yu.A., Turkina O.M. et al. Kultuminskoe gold-copper-iron-skarn deposit (Eastern Transbaikalia, Russia): petrogeochemical features of magmatism and ore-forming processes. *Russian Geology and Geophysics*. 2019;60(6):749–771. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/GiG2019078

125. Редин Ю.О., Редина А.А., Прокопьев И.Р. и др. Лугоканское золото-медно-скарновое месторождение (Восточное Забайкалье): минеральный состав, возраст и условия формирования. *Геология и геофизика*. 2020;61(2):216–242. https://doi.org/10.15372/GiG2019085
Redin Yu.O., Redina A.A., Prokopiev I.R. et al. The lugokanskoe Au–Cu skarn deposit (Eastern Transbaikalia): mineral composition, age, and formation conditions. *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(2):216–242. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/GiG2019085

126. Салихов В.С., Игнатьев А.А. Структурно-динамические особенности Лугоканского рудного узла и его перспективы (Юго-Восточное Забайкалье). *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2023;29(3):16–25. https://doi.org/10.2109/2227-9245-2023-29-3-16-25
Salikhov V.S., Ignatiev A.A. Structural and dynamic features of the lugokan ore node and its prospects (South-Eastern Transbaikalia). *Transbaikal State University Journal*. 2023;29(3):16–25. (In Russ.) https://doi.org/10.2109/2227-9245-2023-29-3-16-25

127. Редин Ю.О., Калинин Ю.А., Неволько П.А. и др. Минеральные ассоциации и зональность оруденения Лугоканского рудного узла (Восточное Забайкалье). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2014;(2):83–92.
Redin Yu.O., Kalinin Yu.A., Nevolko P.A. et al. Mineral assemblages and zonation of the Lugokanskiy ore cluster mineralization (Eastern Transbaikalia). *Geology and mineral resources of Siberia*. 2014;(2):83–92. (In Russ.)

128. Дербеко И.М., Агафоненко С.Г., Козырев С.К., Вьюнов Д.Л. Умлекано-Огоджинский вулканогенный пояс (проблемы выделения). *Литосфера*. 2010;(3):70–77.
Derbeko I.M., Agafonenko S.A., Kozyrev S.K., Vyunov D.L. The Umlekan-Ogodzha volcanic belt (the problem bodily separation). *Lithosphere* (*Russia*). 2010;(3):70–77. (In Russ.)

129. Перестоpонин А.Е., Вьюнов Д.Л., Степанов В.А. Месторождения золото-медно-молибден-порфировой формации Приамурской золотоносной провинции. *Региональная геология и металлогения*. 2017;70:78–85.
Perestoronin A.E., Vyunov D.L., Stepanov V.A. Deposits of gold-copper-molybdenum-porphyry formation Priamurskaya gold-bearing province. *Regional Geology and Metallogeny*. 2017;70:78–85. (In Russ.)

130. Мельников А.В., Степанов В.А., Остапенко Н.С., Моисеенко В.Г. Благороднометалльное оруденение месторождений и рудопроявлений медно-молибден-порфировой формации Верхнего Приамурья (Дальний Восток). *Разведка и охрана недр*. 2020;(7):20–26.
Melnikov A.V., Stepanov V.A., Ostapenko .S., Moiseenko V.G. Blagorodnometallny mineralization of deposits and ore occurrence copper molybdenum – a porphyritic formation upper priamurye (Far East, Russia). *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2020;(7):20–26. (In Russ.)

131. Смирнов С.С. Тихоокеанский рудный пояс в пределах СССР. *Природа*. 1946;(2):52–60.
Smirnov S.S. Pacific ore belt within the USSR. *Priroda*. 1946;(2):52–60. (In Russ.)

132. Архипов Г.И. Состояние и перспективы недропользования в Хабаровском крае. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2010;(1):10–19.
Arkhipov G.I. The state and prospects of subsoil use in the Khabarovsk Territory. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2010;(1):10–19. (In Russ.)

133. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S. Geology, mineralization, stable isotope, and fluid inclusion characteristics of the Vostok-2 reduced W-Cu skarn and Au-W-Bi-As stockwork deposit, Sikhote-Alin, Russia. *Ore Geology Reviews*. 2017;86:338–365. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.02.029

134. Soloviev S.G., Voskresensky K.I., Kryazhev S.G. et al. The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, Eastern Russia: igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics. *Ore Geology Reviews*. 2019;113:103–112. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103112

135. Прилукова В.А., Доржиев Б.Б., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Геологическое строение и характер оруденения Центрально-Анаджаканской площади (Хабаровский край). В: *Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения. Технологические решения, геологическое строение, сейсмичность, аэрокосмический мониторинг, геодезическое обеспечение. Материалы Третьей национальной научно-практической конференции с международным участием*. Южно-Сахалинск, 2–4 декабря 2020 года. Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН; 2021. С. 25–30.
Prilukova V.A., Dorzhiev B.B., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. Geology aspects and type of mineralization of the Central Anadzhakan area (Khabarovsk territory). In: *Oil and Gas Complex: Problems and Solutions. Technological Solutions, Geological Structure, Seismicity, Aerospace Monitoring, Geodetic Support Materials. The Third National Scientific and Practical Conference with International Participation*. Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, 2–4 December 2020. Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS; 2021. Pp. 25–30. (In Russ.)

136. Юшманов Ю.П. Структура и зональность Au-Cu оруденения месторождения Лазурное в Центральном Сихотэ-Алине. *Тихоокеанская геология*. 2002;21(2):85–90.
Yushmanov Yu.P. Structure and zonality of Au-Cu mineralization, the Lazurny deposit, Central Sikhote-Alin. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2002;21(2):85–90. (In Russ.)

137. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Avilova O.V. et al. The Lazurnoe deposit in the Central Sikhote-Alin, Eastern Russia: combined shoshonite-related porphyry Cu-Au-Mo and reduced intrusion-related au mineralization in a post-subduction setting. *Ore Geology Reviews*. 2019;112:103063. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103063

138. Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д. и др. *Геология и полезные ископаемые Приморского края: Очерк*. Владивосток: Дальнаука; 1995. 81 с.
Khanchuk A.I., Ratkin V.V., Ryazantseva M.D. et al. *Geology and minerals of the Primorsky Territory: An essay*. Vladivostok: Dalnauka; 1995. 81 p. (In Russ.)

139. Ханчук А.И., Архипов Г.И., Иванов В.В. Ресурсы меди Дальнего Востока России: состояние, проблемы и перспективы использования. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2019;(2):12–24. https://doi.org/10.25808/08697698.2019.204.2.002
Khanchuk A.I., Arkhipov G.I., Ivanov V.V. Copper resources of the Russian Far East: situation, problems and prospects of development. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2019;(2):12–24. (In Russ.) https://doi.org/10.25808/08697698.2019.204.2.002

140. Приходько В.С., Перестоpонин А.Н., Гурьянов В.А. и др. Джугджур-Становой пояс мелких тел мафитов-ультрамафитов и связанная с ними Cu-Ni сульфидная минерализация. *Вестник Отделения наук о Земле РАН*. 2010;(2):NZ10005. https://doi.org/10.2205/2010NZ000054
Prikhod'ko V.S., Perestoronin A.N., Gur'yanov V.A. et al. Dzhugdzhur-Stanovoy belt of small bodies of mafic-ultramafic and related Cu-Ni sulphide mineralization. *Vestnik Otdeleniya nauk Zemle RAS*. 2010;(2):NZ10005. (In Russ.) https://doi.org/10.2205/2010NZ000054

141. Гурьянов В.А., Петухова Л.Л., Абражевич А.В. и др. Геологическая позиция, минералы редких и благородных металлов в рудах медно-никелевого месторождения Кун-Маньё (юго-восточное обрамление Сибирской платформы). *Тихоокеанская геология*. 2022;41(6):3–23. https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-6-3-23 (Trans. ver.: Guryanov V.A., Petukhova L.L., Abrazhevich A.V. et al. The geological

position, minerals of rare and noble metals in the ores of the Kun-Manie copper-nickel deposit (southeastern fringe of the Siberian Platform). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2022;16(6):525–543. https://doi.org/10.1134/s1819714022060057)
Guryanov V.A., Petukhova L.L., Abrazhevich A.V. et al. The geological position, minerals of rare and noble metals in the ores of the Kun-Manie copper-nickel deposit (southeastern fringe of the Siberian Platform). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2022;16(6):525–543. https://doi.org/10.1134/s1819714022060057 (Orig. ver.: Guryanov V.A., Petukhova L.L., Abrazhevich A.V. et al. Geological position, minerals of rare and noble metals in the ores of the Kun-Manie copper-nickel deposit (southeastern fringe of the Siberian Platform). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2022;41(6):3–23. (In Russ.) https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-6-3-23)

142. Приходько В.С., Гурьянов В.А., Петухова Л.Л., Пересторонин А.Н. Сульфидная Cu-Ni минерализация палеопротерозойских мафит-ультрамафитов юго-востока Алдано-Станового щита. В: *Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Материалы 3-й международной научной конференции*. Качканар, 28 августа–2 сентября 2009 г. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН. С. 111–114.
Prikhodko V.S., Gur'yanov V.A., Petukhova L.L., Perestoronin A.N. Sulfide Cu-Ni mineralization of paleo-proterozoic mafite-ultramafites on the South-East of the Aldan-Stanovoi shield. In: *The third international conference "Mafic-ultramafic complexes of folded regions and related deposits"*. Kachkanar, August 28–September 2, 2009 Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry named after Academician A.N. Zavaritsky, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Pp. 111–114. (In Russ.)

143. Гуревич Д.В., Белогуб Е.В., Петров С.В. и др. Модель формирования Cu-Pt-Pd оруденения в платиноносном массиве урало-аляскинского типа: массив Кондер, Хабаровский край, Россия. В: *Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований. Труды к 90-летию ИГЕМ РАН*. М.: ИГЕМ; 2020. С. 87–90.
Gurevich D.V., Belogub E.V., Petrov S.V. et al. Formation model of Cu-Pt-Pd mineralization in the Uralian-Alaskan-type Konder Pt-bearing pluton, Khabarovsk krai, Russia. In: *Rock, Mineral and Ore Formation: Achievements and Prospects of Research. Proceedings for the 90th Anniversary of the IGEM RAS*. Moscow: IGEM RAN; 2020. Pp. 87–90. (In Russ.)

144. Малышев Ю.Ф., Горошко М.В., Каплун В Б. и др. Геофизическая характеристика и металлогения востока Алданостанового щита (Дальний Восток). *Тихоокеанская геология*. 2012;31(4):3–16. (Trans. ver.: Malyshev Y.F., Goroshko M.V., Kaplun V.B. et al. Geophysical characteristics and meallogeny of the eastern Aldan-Stanovoi shield, Far East. *Russian Journal of Pacific Geology.* 2012;6(4):263–274. https://doi.org/10.1134/S1819714012040033)
Malyshev Y.F., Goroshko M.V., Kaplun V.B. et al. Geophysical characteristics and meallogeny of the eastern Aldan-Stanovoi shield, Far East. *Russian Journal of Pacific Geology.* 2012;6(4):263–274. https://doi.org/10.1134/S1819714012040033 (Orig. ver.: Malyshev Y.F., Goroshko M.V., Kaplun V.B. et al. Geophysical characteristics and meallogeny of the eastern Aldan-Stanovoi shield, Far East. *Tikhookeanskaya Geologiya.* 2012;31(4):3–16. (In Russ.))

145. Кутырев Э.И., Соболев А.Е., Толстых А.Н., Шлейкин П.Д. Медистые песчаники и медистые базальты южной части Билякчанской зоны. *Разведка и охрана недр*. 1986;(11):11–13.
Kutyrev E.I., Sobolev A.E., Tolstykh A.N., Shuleikin P.D. Copper sandstones and copper basalts from the southern part of the Bilyakcha zone. *Prospect and Protection of Mineral Resources.* 1986;(11):11–13. (In Russ.)

146. Майборода А.А. Медистые песчаники Билякчанской шовной зоны, их потенциальная платиноносность и некоторые вопросы стратиграфии. *Региональная геология и металлогения*. 2007;(30–31):144–152.
Mayboroda A.A. The copper sandstones of the Bilyakchan seam zone: their potential for platinum bearing and stratigraphic issues. *Regional Geology and Metallogeny.* 2007;(30–31):144–152. (In Russ.)

147. *Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России*. Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука; 2006. Книга 1. 572 с. Книга 2. С. 573–981.
Khanchuk A.I. (ed.) *Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia*. Vladivostok: Dalnauka; 2006. Book 1. 572 p. Book 2. Pp. 573–981. (In Russ.)

148. Глухов А.Н., Тюкова Е.Э. Геолого-генетические особенности Ороекского рудопроявления медистых сланцев (Приколымский террейн, Северо-Восток России). *Отечественная геология*. 2020;(1):52–65.
Glukhov A. N., Tyukova E. E. Geology and geochemistry of Oroyok sediment-hosted copper occurrence (Kolyma terrane, northeastern Russia). *Otechestvennaya Geologiya.* 2020;(1):52–65. (In Russ.)

149. Савва Н.Е., Волков А.В., Галямов А.Л. и др. Медистые сланцы Приколымского террейна (Северо-Восток России): минералого-геохимические особенности и условия рудообразования. *Тихоокеанская геология*. 2023;42(6):20–38. https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-20-38
Savva N.E., Volkov A.V., Galyamov A.L. et al. Copper shales of the Prikolymsky terrane (North-East of Russia): mineralogical and geochemical features and ore-forming conditions. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2023;42(6):20–38. https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-20-38 (In Russ.)

150. Костин А.В. Минеральные типы Fe-оксидных-Cu-Au руд проявлений Джалкан, Росомаха и Хурат (Сетте-Дабан, Восточная Якутия). *Отечественная геология*. 2016;(6):11–15.
Kostin A.V. Mineral types of Fe-oxide-Cu-Au ores manifestations Jalkan, Rosomakha and Hurat (Sette-Daban, Eastern Yakutia). *Otechestvennaya Geologiya.* 2016;(6):11–15. (In Russ.)

151. Читалин А.Ф., Усенко В.В., Фомичев Е.В. Баимская рудная зона – кластер крупных месторождений цветных и драгоценных металлов на западе Чукотского АО. Минеральные ресурсы России. *Экономика и управление*. 2013;(6):68–73.
Chitalin A.F., Usenko V.V., Fomichyov Y.V. The Baimskaya ore zone – a cluster of large deposits of non-ferrous and precious metals in the West of the Chukotka autonomous district. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2013;(6):68–73. (In Russ.)

152. Мигачев И.Ф., Гирфанов М.М., Шишаков В.Б. Меднопорфировое месторождение Песчанка. *Руды и металлы*. 1995;(3):48–58.
Migachev I.F., Girfanov M.M., Shishakov V.B. The Peschanka copper porphyry deposit. *Ores and Metals*. 1995;(3):48–58. (In Russ.)

153. Нагорная Е.В., Бакшеев И.А., Брызгалов И.А., Япаскурт В.О. Минералы системы Au-Ag-Pb-Te-Se-S медно-молибден-порфировых месторождений рудного поля Находка (Чукотка). *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2012;(4):26–31.
Nagornaya E.V., Baksheev I.A., Bryzgalov I.A., Yapaskurt V.O. Minerals of the Au-Ag-Pb-Te-Se-S system in copper-molybdenum porphyry deposits in the Nakhodka ore field, Chukotka. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 4: Geologia*. 2012;(4):26–31. (In Russ.)

154. Сабельников И.С. Рудная минерализация медно-молибден-порфирового типа восточной части Чукотского автономного округа. *Современные проблемы науки и образования*. 2013;(5):543–550.
Sabelnikov I.S. Porphyry Cu-Mo miniralization in the eastern part of the Chukotka autonomous okrug. *Modern Problems of Science and Education*. 2013;(5):543–550. (In Russ.)

155. Авилова О.В., Гирфанов М.М., Андреев А.В., Старостин И.А. Особенности вещественного состава руд медно-порфировых проявлений Танюрерского и Ольховского рудных районов (Центральная Чукотка). В: *Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных, цветных металлов и алмазов. Сборник тезисов докладов VII научно-практической конференции*. Москва, 13–14 апреля 2017 г. М.: ЦНИГРИ; 2017. С. 56–57.
Avilova O.V., Girfanov M.M., Andreev A.V., Starostin I.A. Features of the material composition of ore of copper-porphyry occurrences of the Tanyurer and Olkhovsky districts (Central Chukotka). In: *Scientific and methodological bases of forecasting, exploration and evaluation of deposits of precious and non-ferrous metals, and diamonds. Abstracts of the VII Scientific and Practical Conference*. Moscow, 13–14 April 2017, Moscow: TSNIGRI; 2017. Pp. 56–57. (In Russ.)

156. Глухов А.Н., Тюкова Е.Э. Перспективы расширения минерально-сырьевой базы меди Магаданской области. *Руды и металлы*. 2013;(5):21–33.
Glukhov A.N., Tyukova E.E. Prospectives for development of resources of the copper in the Magadan region. *Ores and Metals*. 2013;(5):21–33. (In Russ.)

157. Колова Е.Е., Глухов А.Н., Ползуненков Г.О., Акинин В.В. Медно-порфировая минерализация Тальникового рудного поля (Охотский сегмент Охотско-Чукотского вулканогенного пояса). *Тихоокеанская геология*. 2023;42(6):39–61. https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-39-61
Kolova E.E., Glukhov A.N., Polzunenkov G.O., Akinin V.V. Porphyry-copper mineralization of Tal'nikovoye ore field (Okhotsk segment of the Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2023;42(6):39–61. (In Russ.) https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-39-61

158. Алексеенко А.В., Коробейников С.В., Сидоров В.А. Новые данные о медно-молибден-порфировой минерализации на Омолонском массиве. В: *Рудные формации Северо-Востока СССР*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН; 1990. С. 157–162.
Alekseenko A.V., Korobeynikov S.V., Sidorov V.A. New data on copper-molybdenum-porphyry mineralization in the Omolon Massif. In: *Ore formations of the North-East of the USSR*. Magadan: SVKNII FEB RAS; 1990. Pp. 157–162. (In Russ.)

159. Городинский М.Е., Гулевич В.В., Титов В.А. Медные проявления Северо-Востока СССР. В: *Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР*. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР; 1978. С. 151–158.
Gorodinsky M.E., Gulevich V.V., Titov V.A. Copper manifestations of the North-East of the USSR. In: *Materials on geology and minerals of the North-East of the USSR*. Magadan: SVKNII DVNTs of the USSR Academy of Sciences; 1978. Pp. 151–158. (In Russ.)

160. Яроцкий Г.П., Чотчаев Х.О. Вулканогены окраинных орогенных поясов северо-западного сектора Северо-Восточной Азии. *Геология и геофизика Юга России*. 2019;9(3):18–35. https://doi.org/10.23671/VNC.2019.3.36486
Yarotskii G.P., Chotchaev Kh.O. Volcanogens of marginal orogenic belts of the northwestern sector of Northeast Asia. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019;9(3):18–35. (In Russ.) https://doi.org/10.23671/VNC.2019.3.36486

161. Ledneva G.V., Matukov D.I. Timing of crystallization of plutonic rocks from the Kuyul ophiolite terrane (Koryak highland): U-Pb microprobe (SHRIMP) zircon dating. *Doklady Earth Sciences*. 2009;424(1):11–14.

162. Новаков Р.М., Сидоров М.Д. Никеленосность медно-колчеданных проявлений в серпентинитах Восточной Камчатки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(S31):13–26.

Novakov R.M., Sidorov M.D. Nickel-copper-pyrite ore occurrences in the serpentinites of the Eastern Kachatka. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(S31):13–26. (In Russ.)

163. Кутыев Ф.Ш., Байков А.И., Сидоров Е.Г. и др. Металлогения мафит-ультрамафитовых комплексов Корякско-Камчатского региона. В: *Магматизм и рудоносность вулканических поясов*. Хабаровск: ИТиГ; 1998. С. 73–74.
Kutyev F.Sh., Baykov A.I., Sidorov E.G. et al. Metallogeny of mafic-ultramafic complexes of the Koryak-Kamchatka region. In: *Magmatism and ore content of volcanic belts*. Khabarovsk: ITiG; 1998. Pp. 73–74. (In Russ.)

164. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е. Шанучское медно-никелевое рудное поле (Камчатка). *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2011;(1):20–26.
Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D., Kungurova V.Ye. Shanuch Cu-Ni ore field (Kamchatka). *The Bulletin of the North-East Scientific Center*. 2011;(1):20–26. (In Russ.)

165. Тарарин И.А., Чубаров В.М., Игнатьев Е.К., Москалева С.В. Геологическая позиция, минералогия и платиноидная минерализация медно-никелевых рудопроявлений Квинумского рудного поля срединного хребта Камчатки. *Тихоокеанская геология*. 2007;1(1):94–110. (Trans. ver.: Tararin I.A., Chubarov V.M., Moskaleva S.V., Ignat'ev E.K. Geology, mineralogy, and PGE mineralization of the copper-nickel occurrences of the Kvinum ore field, Sredinny range, Kamchatka. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2007;1(1):82–97. https://doi.org/10.1134/S1819714007010095)
Tararin I.A., Chubarov V.M., Moskaleva S.V., Ignat'ev E. K. Geology, mineralogy, and PGE mineralization of the copper-nickel occurrences of the Kvinum ore field, Sredinny range, Kamchatka. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2007;1(1):82–97. https://doi.org/10.1134/S1819714007010095 (Orig. ver.: Tararin I.A., Chubarov V.M., Ignat'ev E.K., Moskaleva S.V. Geology, mineralogy, and PGE mineralization of the copper-nickel occurrences of the Kvinum ore field, Sredinny Range, Kamchatka. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2007;1(1):94–110. (In Russ.))

166. Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е. Определение продуктивности рудно-магматических систем Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны по плотностной модели (Камчатский срединный массив). *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2019;(2):3–10. https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-2-3-10
Sidorov M.D., Kungurova V.Ye. Determining productivity of ore-magmatic systems within the Quinum-Kuvalorog nickel-bearing zone by the density model (Kamchatka's Median Massif). *The Bulletin of the North-East Scientific Center*. 2019;(2):3–10. (In Russ.) https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-2-3-10

167. Soloviev S.G., Ezhov A.I., Voskresensky K.I. et al. The Kirganik alkalic porphyry Cu-Au prospect in Kamchatka, Eastern Russia: a shoshonite-related, silica-undersaturated system in a late cretaceous island arc setting. *Ore Geology Reviews*. 2021;128:103893. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103893

168. Гаськов И.В., Борисенко А.С., Бабич В.В., Наумов Е.А. Стадийность и длительность формирования золоторудной минерализации на медно-скарновых месторождениях (Алтае-Саянская складчатая область). *Геология и геофизика*. 2010;51(10):1399–1412. (Trans. ver.: Gaskov I.V., Borisenko A.S., Babich V.V., Naumov E.A. The stages and duration of formation of gold mineralization at copper-skarn deposits (Altai-Sayan folded area). *Russian Geology and Geophysics*. 2010;51(10):1091–1101. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.09.001)
Gaskov I.V., Borisenko A.S., Babich V.V., Naumov E.A. The stages and duration of formation of gold mineralization at copper-skarn deposits (Altai-Sayan folded area). *Russian Geology and Geophysics*. 2010;51(10):1091–1101. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.09.001 (Orig. ver.: Gaskov I.V., Borisenko A.S., Babich V.V., Naumov E.A. The stages and duration of formation of gold mineralization at copper-skarn deposits (Altai-Sayan folded area). *Geologiya i Geofizika*. 2010;51(10):1399–1412. (In Russ.))

169. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S., Uyutov V.I. Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics of the Sinyukhinskoe Cu-Au skarn deposit, Russian Altai, SW Siberia. *Ore Geology Reviews*. 2019;112:103039. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103039

170. Soloviev S.G., Voskresensky K.I., Kryazhev S.G. et al. The Ulandryk and related Iron Oxide-Cu-Ree(-Au-U) prospects in the Russian Altai: a large emerging IOCG-type system in a phanerozoic continental setting. *Ore Geology Reviews*. 2022;146:104961. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104961

171. Han C., Xiao W., Sul B. et al. Mid-late paleozoic metallogenesis and evolution of the Chinese Altai and East Junggar orogenic belt, NW China, Central Asia. *Journal of Geosciences (Japan)*. 2014:59(3):255–274. https://doi.org/10.3190/jgeosci.173

172. Proskurnin V., Petrov O., Paderin P. Taimyr carbonatite province. In: *The 33rd International Geological Congress*. Oslo, Norway, 2008, 6–14 August.

173. Силаев В.И., Проскурнин В.Ф., Гавриш А.В. и др. Карбонатитовый комплекс необычных горных пород и минерализации в Восточном Таймыре. В: *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского*. 2016;19:119–136.
Silaev V.I., Proskurnin V.F., Gavrish A.V. Carbonatite complex unusual rocks and mineralization in the Eastern Taimyr. In: *Problems of Mineralogy, Petrography and Metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky*. 2016;19:119–136. (In Russ.)

174. Угрюмов А.Н., Дворник Г.П. Щелочные рудоносные метасоматиты Рябинового массива (Алданский щит). *Советская геология*. 1984;(9):84–94.
Ugryumov A.N., Dvornik G.P. Alkaline ore-bearing metasomatites of the Rowan massif (Aldan shield). *Sovetskaya Geologiya*. 1984;(9):84–94. (In Russ.)
175. Кочетков А.Я. Молибден-медно-золото-порфировое месторождение Рябиновое. *Отечественная геология*. 1993;(7):50–58.
Kochetkov A.Ya. Molybdenum-copper-gold-porphyry deposit Ryabinovoe. *Otechestvennaya Geologiya*. 1993;(7):50–58. (In Russ.)
176. Шатова Н.В., Молчанов А.В., Терехов А.В. и др. Рябиновое медно-золото-порфировое месторождение (Южная Якутия): Геологическое строение, геохимия изотопов благородных газов и изотопное (U-Pb, Rb-Sr, Re-Os) датирование околорудных метасоматитов и оруденения. *Региональная геология и металлогения*. 2019;77:75–97.
Shatova N.V., Molchanov A.V., Terekhov A.V. Ryabinovoe copper-gold-porphyry deposit (Southern Yakutia): geology, noble gases isotope systematics and isotopic (U-Pb, Rb-Sr, Re-Os) dating of wallrock alteration and ore-forming processes. *Regional Geology and Metallogeny*. 2019;77:75–97. (In Russ.)
177. Бодуэн А.Я., Мельничук М.С., Петров Г.В., Фокина С.Б. Исследование обогатимости медно-порфировых руд Алданского региона. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018;(3):68–74. https://doi.org/https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.69.015
Bodouin A.Ya., Melnichuk M.S., Petrov G.V., Fokina S.B. Investigation of washability of copper-porphyritic ores of Aldan region. *International Research Journal*. 2018;(3):68–74. (In Russ.) https://doi.org/https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.69.015
178. Петров О.В., Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В. Морозкинское золоторудное месторождение (особенности геологического строения и краткая история открытия). *Региональная геология и металлогения*. 2018;75:112–116.
Petrov O.V., Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V. Morozkinskoe gold deposit (geological structure and short story of the exploration). *Regional Geology and Metallogeny*. 2018;75:112–116. (In Russ.)
179. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S. Geology, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Agylki reduced tungsten (W-Cu-Au-Bi) skarn deposit, Verkhoyansk fold-and-thrust belt, Eastern Siberia: tungsten deposit in a gold-dominant metallogenic province. *Ore Geology Reviews*. 2020;120:103452. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103452
180. Жегалов Ю.В. Командорские острова. В: *Геология СССР. Камчатка, Курильские и Командорские острова*. 1964;XXXI(I):645–660.
Zhegalov Yu.V. Commander Islands. In: *Geology of the USSR. Kamchatka, the Kuril Islands and the Commander Islands*. 1964;XXXI(I):645–660. (In Russ.)

Информация об авторах

Григорий Юрьевич Боярко – доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-0715-7807, Scopus ID 56350674500; e-mail gub@tpu.ru

Анна Михайловна Лаптева – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая отделом анализа минерально-сырьевого комплекса, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, г. Москва, Российская Федерация; e-mail lapteva@vims-geo.ru

Людмила Михайловна Болсуновская – кандидат филологических наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-1499-8970, Scopus ID 56350747600; e-mail bolsunovskl@tpu.ru

Information about the authors

Grigory Yu. Boyarko – Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Geol. and Min.), Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; ORCID 0000-0002-0715-7807, Scopus ID 56350674500; e-mail gub@tpu.ru

Anna M. Lapteva – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Associate Professor, Head of the Department of Analysis of the Mineral Resource Complex, All-Russian Scientific Research Institute of Raw Mineral Synthesis (VNIISIMS), Moscow, Russian Federation; e-mail lapteva@vims-geo.ru

Liudmila M. Bolsunovskaya – Cand. Sci. (Philolog.), Assistant Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; ORCID 0000-0002-1499-8970, Scopus ID 56350747600; e-mail bolsunovskl@tpu.ru

Поступила в редакцию	14.05.2024	**Received**	14.05.2024
Поступила после рецензирования	07.06.2024	**Revised**	07.06.2024
Принята к публикации	10.06.2024	**Accepted**	10.06.2024

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-160
УДК 622.023.23:556.16(470.21)

Влияние водопритоков на прочностные характеристики пород Ловозерского редкометалльного месторождения

А.И. Калашник
Горный институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Российская Федерация
a.kalashnik@ksc.ru

Аннотация
Ловозерское редкометалльное месторождение представлено свитой пластообразных пологопадающих рудных залежей малой и средней мощности, выходящих на поверхность на северо-западных склонах Ловозерского массива. Целью работы является оценка влияния водопритоков на прочностные характеристики пород Ловозерского редкометалльного месторождения, разрабатываемого рудником «Карнасурт». Рассмотрены данные о поступлении воды в горные выработки рудника «Карнасурт», отрабатывающего две согласно залегающие рудные залежи Ловозерского редкометалльного месторождения. Выполнена статистическая обработка объемов воды, собираемой рудником за последние 4 года, с оценкой динамики их поступления в течение календарного года. Выявлены особенности, связанные с календарными климатическими изменениями. Основной целью работы являлась оценка влияния водопритоков на прочностные характеристики пород, слагающие опорные целики. Выполнены анализ и расчеты осадконакопления в пределах горного отвода рудника и формирующихся водопритоков в горные выработки, а также сравнение их с фактическими данными по рудничной воде. Отобраны образцы наиболее представительных пород месторождения и выполнены испытания их на прочность на сжатие и растяжение в сухом и водонасыщенном состояниях. Определены количественные показатели изменения прочностных характеристик пород вследствие водонасыщения. Установлено, что водонасыщение привело к снижению прочности пород до 10–20 %, особенно для значений на сжатие. Полученные результаты дают основание для необходимости учета обводненности пород при расчете устойчивости как опорных целиков, так и обнажений пород в выработках рудника «Карнасурт».

Ключевые слова
рудник, добыча, водопритоки, горные породы, целики, свойства, прочность, водонасыщенность, удароопасность, Ловозерское редкометалльное месторождение, рудник «Карнасурт»

Благодарности
Статья написана на основе исходных данных, подготовленных доктором технических наук Ловчиковым Александром Васильевичем. А.В. Ловчиков более 60 лет занимался вопросами геомеханической безопасности отработки Ловозерского месторождения, и фактически последней задачей его жизни было исследование влияния обводненности пород на устойчивость и удароопасность целиков рудника Карнасурт.

Для цитирования
Kalashnik A.I. Effect of water inflows on the strength characteristics of the Lovozero rare-metal deposit rocks. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):387–394. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-160

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Effect of water inflows on the strength characteristics of the Lovozero rare-metal deposit rocks

A. I. Kalashnik
Mining Institute of the Kola Scientific Center of the RAS, Apatity, Russian Federation
a.kalashnik@ksc.ru

Abstract
The Lovozero rare-metal deposit is represented by a series of sheet-like ore bodies of small and medium thickness exposing on the northwestern slopes of the Lovozero massif. The purpose of the work is to assess the impact of water inflows on the strength characteristics of the rocks of the Lovozero rare-metal deposit developed by the Karnasurt mine. The data on water inflow into Karnasurt mine workings, which exploits two ore bodies of the Lovozero rare-metal deposit, are considered. Statistical processing of the data on

© Калашник А. И., 2024

water volumes collected by the mine over the latest 4 years was performed, with assessment of their changes during a calendar year. The peculiarities associated with calendar climatic changes were identified. The main purpose of the study was to assess the effect of water inflows on the strength characteristics of the rocks composing the support pillars. The analysis and calculations of precipitation accumulation within the mine allotment and water inflows into the mine workings were performed and compared with actual data on mine waters. The samples of the most representative rocks of the deposit were collected and tested for dry and water-saturated compressive and tensile strength. The quantitative indicators of the changes in the strength characteristics of rocks due to water saturation were determined. It was found that the water saturation led to a decrease in the rock strength by up to 10–20%, especially for compressive strength values.

Keywords
mine, extraction, water inflows, rocks, pillars, properties, strength, water saturation, rockburst hazard, Lovozero rare metal deposit, Karnasurt mine

Acknowledgments
The paper was written on the basis of initial data prepared by Alexander V. Lovchikov, Dr. Sci. (Eng.). For more than 60 years A.V. Lovchikov dealt with the issues of the geotechnical safety of the Lovozero deposit mining, and, in fact, the last task of his life was to study the effect of rock watering on the stability and rockburst hazard of the pillars of the Karnasurt mine.

For citation
Kalashnik A.I. Effect of water inflows on the strength characteristics of the Lovozero rare-metal deposit rocks. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):387–394. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-160

Введение

Ловозерское редкометалльное месторождение представлено свитой пластообразных пологопадающих рудных залежей малой и средней мощности, выходящих на поверхность на северо-западных склонах Ловозерского массива [1]. В настоящее время две рудные залежи (I-4 (уртиты) и II-4 (малиньиты)) мощностью 1,0–1,2 м каждая, залегающие согласно на расстоянии около 100 м по вертикали друг от друга отрабатываются рудником «Карнасурт». Применяется камерно-столбовая система разработки со сплошной выемкой руды и поддержанием подработанной толщи пород ленточными целиками. Отработка обеих залежей ведется панелями по их простиранию. Панели нарезаются через 20–40 м по вертикали штреками (штольнями на верхних горизонтах), у которых оставляются опорные ленточные околоштрековые целики. Панели разделяются на блоки длиной 60–120 м, между которыми оставляются опорные ленточные междублоковые целики [1]. Месторождение по условиям ведения горных работ отнесено к удароопасным и характеризуется повышенной сейсмичностью и проявлениями горнотектонических ударов [2, 3].

Опорные околоштрековые и междублоковые целики на современном этапе отработки рудных залежей имеют ширину от 3 до 10 м. Их суммарная площадь для каждой отрабатываемой залежи может достигать 25 % от выработанного пространства. Глубина горных работ по нижней рудной залежи II-4 составляет от 30 м до поверхности на верхних горизонтах до 700 м на самом глубоком горизонте +280 м.

Рудник «Карнасурт» имеет большие размеры горного отвода: длина по нижней залежи II-4 составляет около 8 км при максимальной ширине 2,6 км. Более того, прорабатывается вопрос о прирезке горного отвода еще на 1,5 км к западу [2]. Таким образом, длина шахтного поля по нижней залежи на конечном этапе разработки достигнет 10 км при ширине до 2,6 км, что по площади составит 26 км^2. По верхней залежи площадь получается чуть меньше, но имеет такой же порядок величин. Это позволяет уверенно отнести рудник «Карнасурт» к категории самых больших из рудников западной части российского сектора Арктики.

В настоящее время залежь II-4 в пределах горного отвода отработана только наполовину, от выходов на поверхность до гор. +280 м. Размеры отработанной площади оставляют 6,5 км по простиранию при максимальной ширине по падению 1,3 км. По залежи I-4, отработанной только на участке «Карнасурт», протяженность выработанного пространства составляет по простиранию залежи 3,1 км при максимальной ширине по падению 0,8 км и глубине от 50 до 350 м до поверхности.

Водопритоки в выработки рудника «Карнасурт» обусловлены главным образом поверхностными атмосферными осадками. Образующаяся на дневной поверхности вода вследствие дождей, весеннего таяния снега и стоков с близлежащих гор проникает через многочисленные трещины и структурные неоднородности в покрывающем массиве пород и попадает в горные выработки.

Вода из горных выработок всех отрабатываемых участков собирается на откаточных горизонтах штреков и по водоотводным канавкам штреков выводится на их поверхность – почву штреков. Таким образом, по почве всех штреков рудника текут водные потоки к более низким горизонтам. Частично они собираются на откаточных горизонтах и водонасосными станциями откачиваются из выработок на поверхность. Из оставшихся объемов происходит как дальнейшая фильтрация воды вглубь подстилающего массива пород, так и обильное повсеместное водонасыщение пород почвы выработок и стенок опорных целиков.

Вопросы формирования водопритоков при отработке угольных пластов подземным (шахтным) способом исследованы в работах [4, 5], в том числе с изменением поверхностных природных источников [6, 7] и механизмом формирования инфильтрации по-

верхностных вод в выработки [8]. Для рудных месторождений в скальных массивах рассмотрено влияние обводненности пород на энергонасыщенное состояние [9] и проявление сейсмичности [10]. Особенности обводненности скальных пород исследованы в работах [11, 12], а влияние фактора обводненности на устойчивое состояние и безопасность окружающей природной среды – в [13–15].

Вместе с тем, учитывая, что для рассматриваемых в данной работе условий водные потоки омывают непосредственно нижние части опорных околоштрековых целиков удароопасного месторождения, необходимо уделить особое внимание влиянию обводненности пород. Поэтому целью работы является оценка влияния водопритоков на прочностные характеристики пород Ловозерского редкометалльного месторождения, разрабатываемого рудником «Карнасурт».

Результаты

По данным гидрогеологической службы рудника «Карнасурт» объем воды, собираемой рудником, составляет порядка 8 млн м^3 в год. При этом динамика объемов за последние 4 года наблюдений остается практически однообразной: с января по май объемы уменьшаются, в июне значительно увеличиваются, далее с чуть меньшими значениями в июле–сентябре, а с октября по декабрь объемы водопритоков вновь уменьшаются (рис. 1).

Из гистограмм рисунка видно, что ежемесячный водоприток в выработки рудника составляет от 40 до 110 тыс. м^3. Наименьшее количество воды – от 40 до 50 тыс. м^3 – наблюдается в мае каждого года. Это обусловлено тем, что с октября по апрель осадки выпадают в виде снега и вследствие отрицательных температур аккумулируются на поверхности без инфильтрации воды с поверхности в выработки рудника. Наибольшее количество воды, от 70 до 110 тыс. м^3, наблюдается в июне–сентябре (летне-осенний период) каждого года. Очевидно, что увеличение количества воды, поступающей в летне-осенний период в рудник, обусловлено как интенсивным таянием снега (в мае–июне) на горных склонах поверхности шахтного поля рудника, так и осадками в виде дождя в этот период (рис. 2). Данные по объемам дождевых и снеговых осадков на территорию горного отвода рудника «Карнасурт» в течение календарного года получены на основе анализа и обработки информации из источников[1].

Для сопоставительного анализа рассмотрена динамика суммарных объемов осадков на поверхность горного отвода и фактических объемов собранной в горных выработках воды за 2017–2020 гг. (рис. 3). Анализ данных рис. 3 подтверждает вышесказанное о преобладающем влиянии двух периодов: снегонакопления (примерно по 2400–3000 тыс. м^3/мес с октября по апрель) и снеготаяния (май–июнь), а также дождей (примерно по 1200–1800 тыс. м^3/мес с мая по сентябрь).

[1] Атлас Мурманской области 1971 г.; Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2022 году. 2023. 151 с. URL: https://ru.weatherspark.com/y/98660/Обычная-погода-в-Ревда-Россия-весь-год

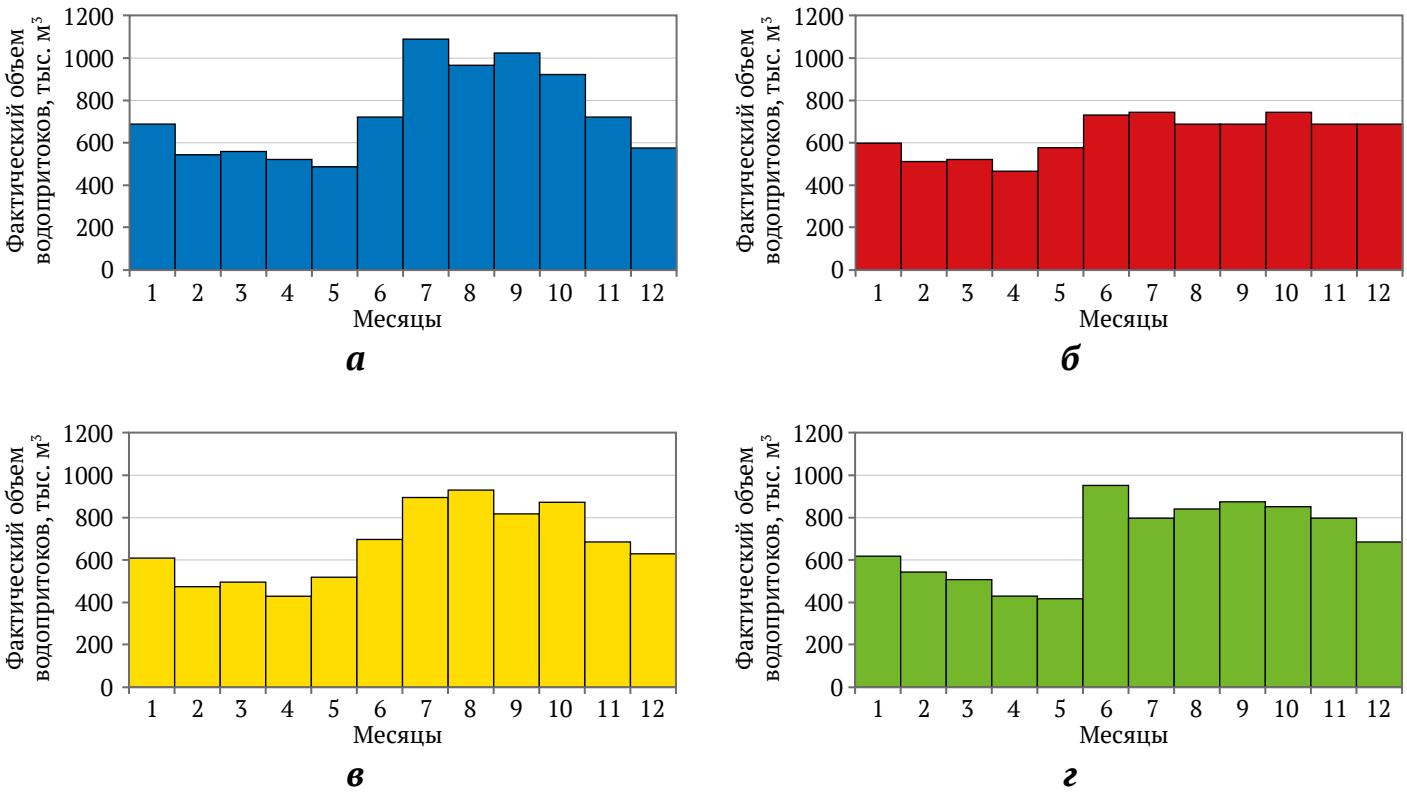


Рис. 1. Данные фактических объемов воды, собранной и откачанной рудником «Карнасурт»: *а* – 2017 г.; *б* – 2018 г.; *в* – 2019 г.; *г* – 2020 г.

Расчетами определено, что за период с октября по апрель снегонакопление на территории горного отвода рудника превысит 21 700 тыс. м³. В то же время объемы фактических водопритоков в выработки рудника уменьшатся с 800 до почти 400 тыс. м³ в силу снижения и практически отсутствия фильтрации воды с поверхности. Обильное снеготаяние и дожди в мае–июне приводят к резкому, более чем в 2 раза (с 400 до 850 тыс. м³/мес), увеличению водопритоков в выработки, достигающему 70–80 % от поверхностных осадков. Такие объемы водопритоков фиксируются ежемесячно с мая вплоть до октября, когда дождевые осадки сменяются снеговыми и устанавливается отрицательная температура на почве с последующим снижением до апреля следующего года включительно.

Таким образом, водопритоки в горные выработки рудника формируются за счет дождевых осадков, снеготаяния в периоды с положительными значениями температуры воздуха и почвы, а также от природных поверхностных водоемов и подземных водоносных горизонтов, подпитываемых осадками. Характер их накопления носит более плавный, чем для осадков, характер в силу вышеперечисленных причин. Визуально граничное изменение объемов водопритоков четко коррелирует с выделенными климатическими периодами (см. рис. 3).

Для определения влияния водонасыщенности на прочностные свойства пород рудника были проведены специальные эксперименты на образцах пород. На залежи I-4 были отобраны штуфы пород уртита как наиболее распространенной породной разновидности на штреке гор. +400 м (пикет ПК4), из которых в дальнейшем изготавливались образцы пород для испытаний. Для каждого вида испытаний было изготовлено 8–9 образцов кубической формы (всего 34) с длиной грани куба 4 см. Образцы для испытаний в водонасыщенном состоянии помещались на месяц в сосуд с водой, а затем испытывались на растяжение и сжатие. Испытания образцов проводились на сжатие и растяжение в сухом и водонасыщенном их состояниях в соответствии с ГОСТами[2].

Результаты испытаний образцов на сжатие и растяжение в сухом состоянии приведены в табл. 1 и 2. Как видно из этих таблиц, установленные значение предела прочности на сжатие, составляющее σ_c = 181 МПа, и значение предела прочности на растяжение σ_p = 14,3 МПа коррелируют с аналогичными данными предыдущих исследований [1, 2].

Образцы на сжатие и растяжение в водонасыщенном состоянии имели такие же размеры, как и сухие, но за счет водонасыщения их вес незначительно (3–5 %) увеличился. Результаты их испытаний представлены в табл. 3 и 4.

[2] ГОСТ 21153.2–84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии (Дата актуализации описания: 01.07.2023); ГОСТ 21153.3–85 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении (Дата актуализации описания: 01.07.2023).

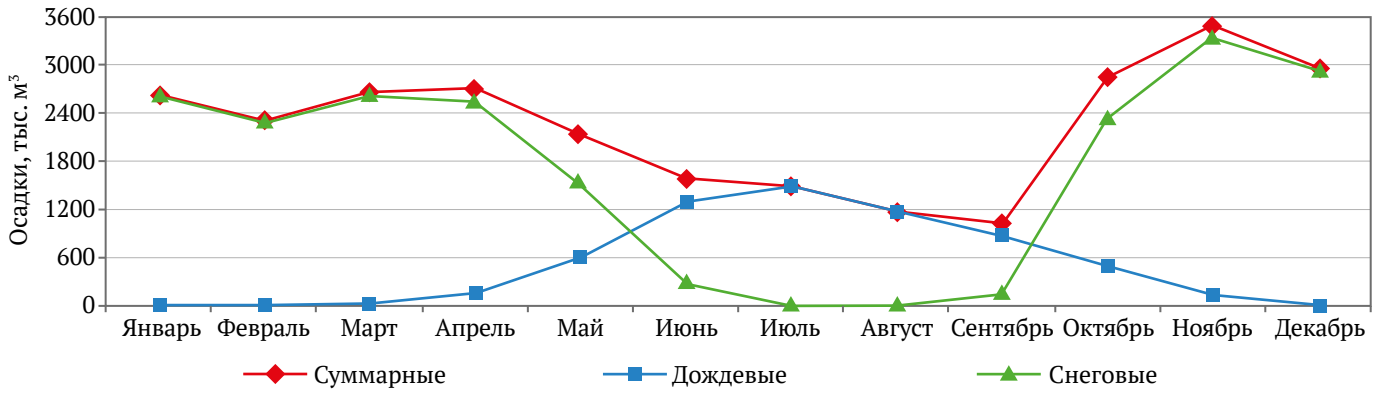


Рис. 2. Распределение объемов осадков на поверхность горного отвода рудника «Карнасурт» в течение календарного года

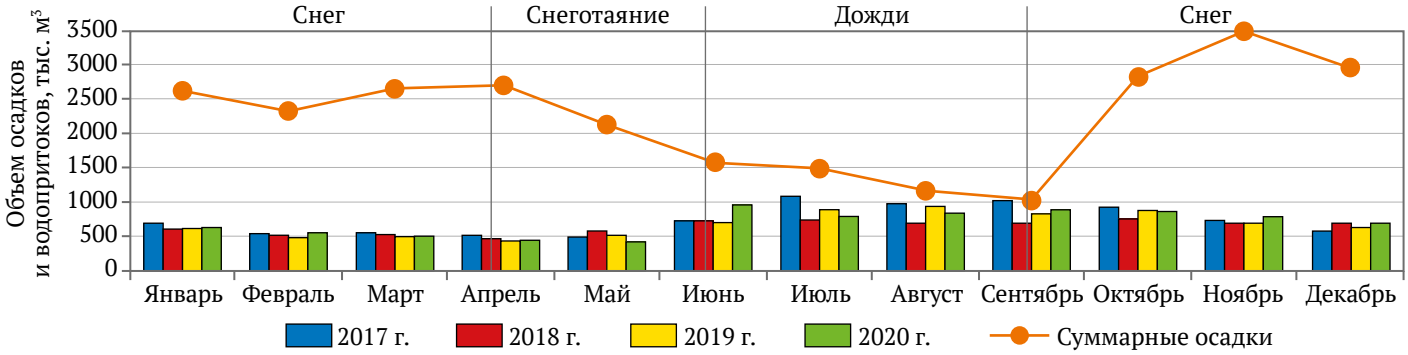


Рис. 3. Динамика суммарных объемов осадков на поверхность горного отвода и фактических объемов собранной в горных выработках воды за 2017–2020 гг.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов пород на сжатие в сухом состоянии

Индекс	*X*, см	*Y*, см	*Z*, см	Объем, см³	Вес, г	Объемный вес, г/см³	Площадь нагружения, см²	Нагрузка разрушения, кН	Предел прочности, МПа
2	4,53	4,57	4,60	95,1	247,54	2,60	20,67	374,9	145
3	4,52	4,49	4,57	92,8	242,05	2,61	20,29	408,2	161
4	4,52	4,53	4,59	93,7	243,65	2,60	20,44	579,7	227
5	4,56	4,70	4,58	98,1	248,73	2,53	21,43	520,0	194
6	4,52	4,51	4,64	94,5	246,40	2,61	20,39	494,4	194
11	4,56	4,52	4,61	94,9	229,60	2,42	20,60	493,6	192
14	4,50	4,50	4,60	93,3	243,26	2,61	20,28	358,6	141
16	4,51	4,53	4,54	92,8	242,42	2,61	20,44	497,4	195
17	4,65	4,65	4,54	98,2	259,51	2,64	21,61	489,5	181
Мин	4,50	4,49	4,54	92,8	229,60	2,42	20,28	358,6	141
Макс	4,65	4,70	4,64	98,2	259,51	2,64	21,61	579,7	195
Среднее	4,54	4,56	4,59	94,82	244,80	2,58	20,68	468,48	181,11

Таблица 2

Результаты испытаний образцов пород на растяжение в сухом состоянии

Индекс	*X*, см	*Y*, см	*Z*, см	Объем, см³	Вес, г	Объемный вес, г/см³	Площадь нагружения, см²	Нагрузка разрушения, кН	Предел прочности, МПа
1	4,56	4,67	4,56	97,1	254,92	2,26	21,30	39,4	19
7	4,66	4,56	4,62	98,2	245,20	2,50	21,27	31,9	15
8	4,55	4,50	4,59	94,1	247,63	2,63	20,50	26,9	13
9	4,63	4,56	4,62	97,4	244,90	2,52	21,08	30,1	14
10	4,55	4,56	4,61	95,5	248,27	2,60	20,72	42,5	21
12	4,56	4,56	4,60	95,7	250,62	2,62	20,82	31,5	15
13	4,62	4,55	4,59	96,4	242,00	2,51	20,98	19,3	9
15	4,57	4,53	4,59	95,1	231,85	2,44	20,72	17,7	9
18	4,54	4,54	4,63	95,4	250,47	2,62	20,59	29,3	14
Мин	4,54	4,50	4,56	94,1	231,85	2,26	20,50	17,7	9
Макс	4,66	4,67	4,63	98,2	254,92	2,63	21,30	42,5	21
Среднее	4,58	4,56	4,60	96,10	246,21	2,52	20,89	29,84	14,33

Таблица 3

Результаты испытаний образцов пород на сжатие в водонасыщенном состоянии

Индекс	Площадь нагружения, см²	Нагрузка разрушения, кН	Предел прочности на сжатие, МПа
4	20,68	417,3	161
5	21,15	376,0	142
7	20,82	360,5	138
8	21,22	441,2	166
9	21,14	381,8	145
10	20,19	279,0	111
11	20,80	458,8	176
14	21,44	297,6	111
Мин	20,19	297,6	111
Макс	21,44	458,8	176
Среднее	20,93	376,525	143,75

Таблица 4

Результаты испытаний образцов пород на растяжение в водонасыщенном состоянии

Индекс	Площадь нагружения, см²	Нагрузка разрушения, кН	Предел прочности на растяжение, МПа
1	21,24	23,9	11
2	20,80	28,6	14
3	20,13	32,6	16
6	20,87	30,6	15
12	21,30	31,9	15
13	20,53	27,0	13
15	20,99	27,6	13
16	21,28	30,8	14
Мин	20,13	23,9	11
Макс	21,30	32,6	16
Среднее	20,89	29,13	13,88

Обсуждение результатов

Для детального анализа были построены диаграммы прочностных свойств всех испытанных образцов, ранжированные по полученным значениям (рис. 4). Сплошной линией отмечено среднее значение, пунктирной – уменьшение от среднего на 20 %.

Из рис. 4 следует, что водонасыщение пород снизило их прочность на сжатие в целом на 20 %, а для двух образцов – до 40 %. В то же время нижний предел прочности на сжатие остался достаточно высоким – более 110 МПа.

Прочность водонасыщенных образцов на растяжение также в целом снизилась, но в меньшей степени, и нижний предел не снизился ниже 10 МПа. Для наглядного сопоставления данные статистической обработки приведены на рис. 5.

Таким образом, в результате испытаний установлено, что водонасыщение снижает прочность пород на сжатие и растяжение от 10 до 20 % и более. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете устойчивости как опорных целиков, так и обнажений пород в выработках рудника «Карнасурт», подвергающихся обильному водонасыщению.

Заключение

Обработаны и проанализированы данные фактических объемов воды, собранной в выработках рудника Карнасурт за последние 4 года. Определено, что годовой объем собранной воды достигает 8 млн м^3 с распределением по месяцам в соответствии с сезонно-климатическими осадками. Выполнены анализ и расчеты осадконакопления в пре-

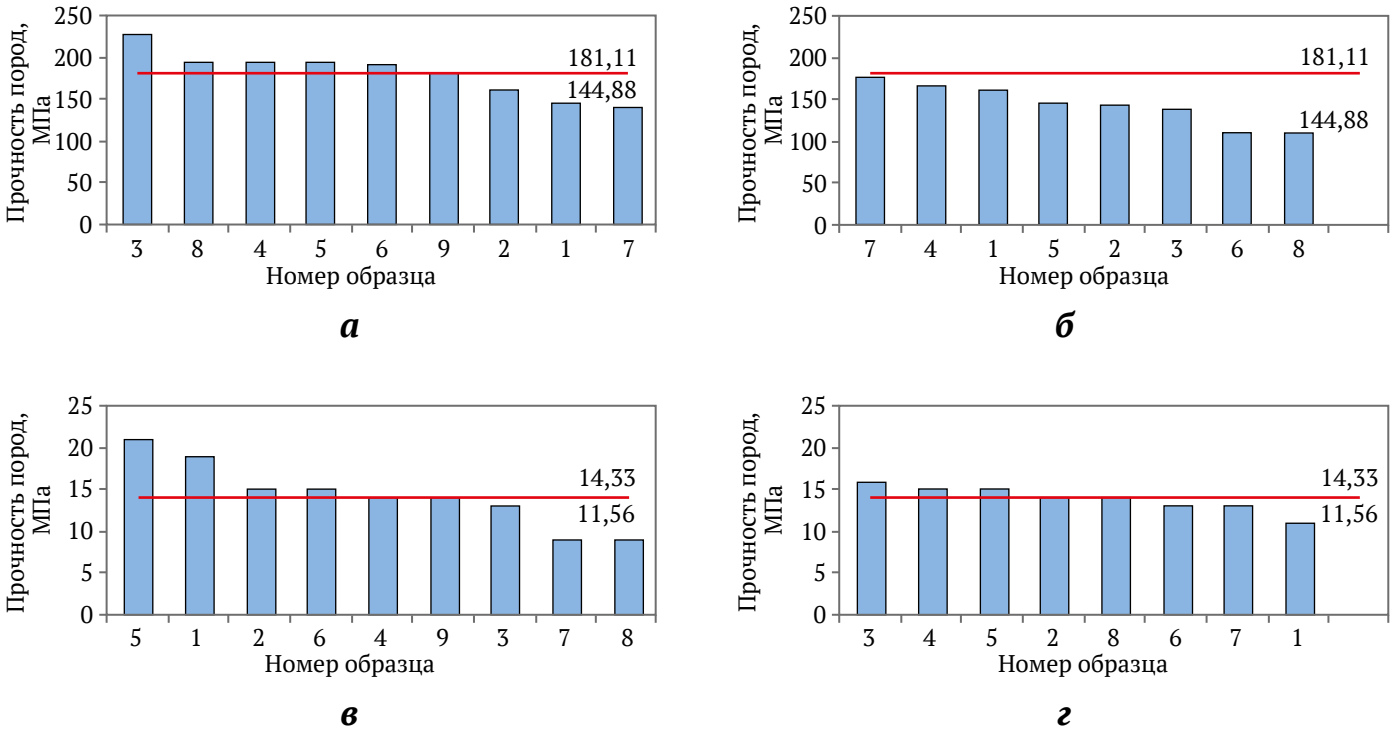


Рис. 4. Распределение значений прочности образцов при испытании на сжатие (верхний ряд) и растяжение: *а*, *в* – сухая порода; *б*, *г* – водонасыщенная порода

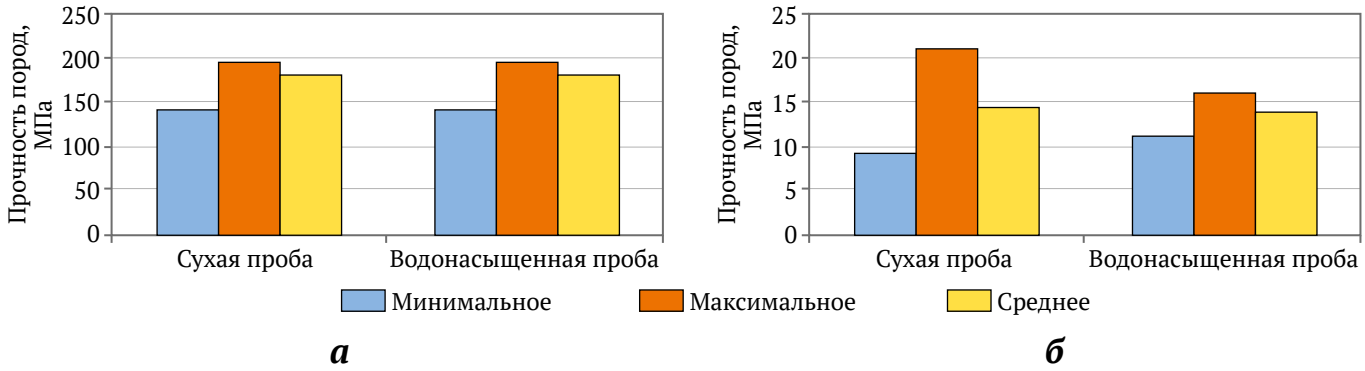


Рис. 5. Статистическое распределение прочностных характеристик испытанных образцов: *а* – при сжатии; *б* – при растяжении

делах горного отвода рудника и формирующихся водопритоков в горные выработки. Произведено их сравнение с фактическими данными по рудничной воде. Отобраны образцы наиболее представительных пород месторождения, из которых изготовлены 34 кубика размерами 4 × 4 × 4 см, половина из которых были на месяц помещены в воду. Проведены испытания образцов (по 8–9 для каждого состояния и испытания) на прочность на сжатие и растяжение в сухом и водонасыщенном состояниях. Установлено, что водонасыщение привело к снижению прочности пород до 10–20 %, особенно для значений на сжатие. Полученные результаты дают основание для необходимости учета обводненности пород при расчете устойчивости как опорных целиков, так и обнажений пород в выработках рудника «Карнасурт».

Список литературы / References

1. Бессонов И.И., Боборыкин В.Н., Калашник А.И. и др. *Совершенствование технологии подземной разработки маломощных рудных месторождений Кольского полуострова*. Монография. Апатиты: КНЦ АН СССР; 1989. 156 с.
Bessonov I.I., Boborykin V.N., Kalashnik A.I. et al. *Improving the technology of underground mining of thin ore deposits of the Kola Peninsula*. Monograph. Apatity: Kola Science Centre AS SSSR Publ.; 1989. 156 p. (In Russ.)
2. Ловчиков А.В. *Сильнейший горно-тектонический удар на подземных рудниках и в шахтах России: рудник «Умбозеро», 17 августа 1999 года* (*магнитуда m = 5, энергетический класс k = 11,8*). Монография. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН; 2022. 127 с. https://doi.org/10.37614/978.5.91137.456.3
Lovchikov A.V. *The strongest mining-tectonic impact in underground mines and mines in Russia: Umbozero mine, August 17, 1999* (*magnitude m = 5, energy class k = 11.8*). Monograph. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences Publ.; 2022. 127 p. (In Russ.) https://doi.org/10.37614/978.5.91137.456.3
3. Адушкин В.В., Ловчиков А.В., Гоев А.Г. О возникновении катастрофического горно-тектонического удара на руднике «Умбозеро» в Ловозерском массиве в Центральной части Кольского полуострова. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2022;504(1):85–90. https://doi.org/10.31857/S2686739722050036
Adushkin V.V., Lovchikov A.V., Goev A.G. The occurrence of a catastrophic rockburst at the Umbozero Mine in the Lovozero Massif, Central Part of the Kola Peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 2022;504(1):85–90. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S2686739722050036
4. Пургина Д.В., Кузеванов К.И. Водопритоки в подземные горные выработки под влиянием внешних граничных условий при разработке угольных месторождений (на примере шахты Алексиевская). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018;329(4):79–96.
Purgina D.V., Kuzevanov K.I. Water inflow into mine under the influence of external boundary conditions at coal deposit exploitation (Kuzbass). *Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesursov*. 2018;329(4):79–96. (In Russ.)
5. Gui H., Lin M., Song X. Identification and application or roof bed separation (water) in coal mines. *Mine Water and the Environment*. 2018;37(2):376–384. https://doi.org/10.1007/s10230-018-0518-0
6. Davis A., Zhan G., Sims N. et al. Is treatment of mine dewatering water necessary prior to rapid infiltration basin recharge? A case study. *Mine Water and the Environment*. 2022;41:58–73. https://doi.org/10.1007/s10230-021-00839-2
7. Enany P., Shevchenko O., Drebenstedt C. Experimental evaluation of airlift performance for vertical pumping of water in underground mines. *Mine Water and the Environment*. 2021;40:970–979. https://doi.org/10.1007/s10230-021-00807-w
8. Fan K., Li W., Wang Q. et al. Formation mechanism and prediction method of water inrush from separated layers within coal seam mining: A case study in the Shilawusu mining area, China. *Engineering Failure Analysis*. 2019;103:158–172. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.057
9. Кузнецов Н.Н. Исследование влияния обводненности на энергонасыщенное состояние иерархично-блочной геологической среды. *Проблемы недропользования*. 2017;(1):64–71. https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.064
Kuznetzov N.N. Study of watercut influence on the energy saturated state of hierarchically block geological medium. *Problemy Nedropol'zovaniya*. 2017;(1):64–71. (In Russ.) https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.01.064
10. Козырев А.А., Батугин А.С., Жукова С.А. О влиянии обводненности массива на его сейсмическую активность при разработке апатитовых месторождений Хибин. *Горный журнал*. 2021;(1):31–36. https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.06
Kozyrev A.A., Batugin A.S., Zhukova S.A. Influence of water content on seismic activity of rocks mass in apatite mining in Khibiny. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):31–36. (In Russ) https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.06
11. Калашник А.И., Дьяков А.Ю. Оценка нарушенности скальных пород георадарным зондированием с использованием водонасыщения для контрастности. *Вестник МГТУ*. 2019;22(1):129–137. https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-129-137
Kalashnik A.I., Dyakov A.Yu. Evaluation of rock disturbance by GPR sensing using water saturation for contrast. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2019;22(1):129–137. (In Russ.) https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-129-137

12. Аузина Л.И. Особенности обводненности золоторудных месторождений Витимо-Патомского нагорья. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2017;40(1):127–136.
Auzina L.I. Water encroachment features of Vitim-Patom highland gold deposits. *Izvestiya Sibirskogo Otdeleniya Sekcii Nauk o Zemle Rossijskoj Akademii Estestvennyh Nauk. Geologiya, Razvedka i Razrabotka Mestorozhdenij Poleznyh Iskopaemyh*. 2017;40(1):127–136. (In Russ.)
13. Kalashnik A., Zaporozhets D. Information Technologies in Monitoring of Urbanized Territories in the Western Russian Arctic Sector. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;509:837–844. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_84
14. Wu L., Bai H., Ma D. Prediction and Prevention of Water Inrush Hazards from Bed Separation Space. *Mine Water and the Environment*. 2021;40:657–670. https://doi.org/10.1007/s10230-020-00748-w
15. Мелихов М.В., Калашник А.И. Космомониторинг геологических рисков в горной промышленности Баренцева Евро-Арктического региона России. *Горная промышленность*. 2023;(S1):128–134. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-128-134
Melikhov M.V., Kalashnik A.I. Space monitoring of geological risks in the mining industry of the Barents Euro-Arctic region of Russia. *Russian Mining Industry*. 2023;(S1):128–134. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-128-134

Информация об авторе

Анатолий Ильич Калашник – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории геофлюидомеханики, Горный институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-6567-2877, Scopus ID 7004943696, Researcher ID E-3197-2017; e-mail a.kalashnik@ksc.ru

Information about the author

Anatoly I. Kalashnik – Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Mining Institute of the Kola Scientific Center of the RAS, Apatity, Murmansk region, Russian Federation; ORCID 0000-0001-6567-2877, Scopus ID 7004943696, Researcher ID E-3197-2017; e-mail a.kalashnik@ksc.ru

Поступила в редакцию	29.09.2023	**Received**	29.09.2023
Поступила после рецензирования	20.03.2024	**Revised**	20.03.2024
Принята к публикации	01.04.2024	**Accepted**	01.04.2024

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-235
УДК 622.807:613.62:614.8.084

Определение запыленности рабочего места оператора дробильно-щебеночного завода в целях специальной оценки условий труда

Е.А. Король[1], **Е.Н. Дегаев**[1], **Д.С. Конюхов**[2,3] ✉

[1] *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация*

[2] *АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация*

[3] *МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация*

✉ *gidrotehnik@inbox.ru*

Аннотация

Горнодобывающая отрасль является одним из ключевых секторов экономики России, обеспечивая другие отрасли необходимым сырьем и материалами. Однако эта отрасль характеризуется тяжёлыми условиями труда, которые могут негативно сказаться на здоровье работников. Воздействие вредных веществ и значительные физические нагрузки способствуют развитию профессиональных болезней. Для обеспечения безопасности производственных процессов и сохранения здоровья работников горнодобывающей отрасли необходимо проведение специальной оценки условий труда. Эта оценка позволяет определить уровень вредности и опасности на рабочих местах, а также разработать меры по снижению негативного воздействия на здоровье работников. Целью работы является определение запыленности рабочего места оператора дробильно-щебеночного завода в рамках специальной оценки условий труда. Определение концентрации пыли в воздухе рабочего места оператора дробильно-щебеночного завода производили в соответствии со стандартной весовой методикой. Испытания проводились в четыре этапа и длились 400 мин, что составляет 83% от общего времени рабочей смены. По результатам обработки данных выявлено превышение предельно допустимой концентрации пыли в 1,28 раза. Установлен класс (подкласс) условий труда – 3.1. Установлено, что средние концентрации пыли на разных этапах испытания различаются в 3–4 раза, что связано с интенсивностью и направлением ветра на производственной площадке. По полученным данным спрогнозированы концентрации пыли на рабочем месте в зависимости от скорости ветра на производственной площадке с величиной достоверности аппроксимации R^2 = 0,95. Установлено, что максимально допустимая скорость ветра на производственной площадке не должна быть выше 2,6 м/с. С помощью аппроксимированных данных спрогнозировано, что при отсутствии ветра на производственной площадке концентрация пыли в воздухе рабочего места оператора сохранится на уровне 0,5 мг/м^3. Для снижения запыленности рабочего места оператора необходимы комплексные мероприятия по сокращению пылеобразования на дробильно-сортировочном заводе, включающие мойку колес автомобильного транспорта, установку систем подавления пыли и замену открытого ленточного конвейера на закрытый. Для предотвращения развития профессиональных заболеваний операторам рекомендуется использовать средства индивидуальной защиты органов дыхания, кожи и глаз на протяжении всей смены.

Ключевые слова

производство, щебень, дробильно-щебеночный завод, пыль, концентрация, выбросы, запыленность, пылеобразование, оператор, условия труда, вред, прогнозирование, защита

Для цитирования

Korol E.A., Degaev E.N., Konyukhov D.S. Assessing dust concentration at the workplace of a crushing and screening plant operator for special labor conditions evaluation. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):395–405. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-235

© Король Е. А., Дегаев Е. Н., Конюхов Д. С., 2024

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Assessing dust concentration at the workplace of a crushing and screening plant operator for special labor conditions evaluation

E.A. Korol[1], **E.N. Degaev**[1], **D.S. Konyukhov**[2,3] ✉

[1] *National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation*

[2] *Mosinzhproekt JSC, Moscow, Russian Federation*

[3] *MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation*

✉ *gidrotehnik@inbox.ru*

Abstract

The mining industry is one of the key sectors of the Russian economy, supplying other industries with essential raw materials. However, this sector is characterized by harsh working conditions that may adversely affect workers' health. Exposure to harmful substances and significant physical workloads contribute to the development of occupational diseases. To ensure safety in production processes and protect the health of mining industry workers, it is necessary to conduct a special labor conditions assessment. This assessment allows for determining the level of harmfulness and hazard in workplaces, as well as developing measures to reduce the negative impact on workers' health. The purpose of this study is to assess dust concentration at the workplace of a crushing and screening plant operator as part of a special labor conditions evaluation. Dust concentration at the operator's workplace was measured using a standard gravimetric method. The testing was conducted in four stages and lasted 400 minutes, which is 83% of the total work shift duration. Data analysis revealed an exceedance of the permissible dust concentration by a factor of 1.28. The labor conditions class (subclass) was established as 3.1. It was found that the average dust concentrations varied by a factor of 3–4 across different testing stages due to the intensity and direction of air velocity at the production site. Based on the obtained data, dust concentrations at the workplace were predicted according to air velocity at the site, with an approximation accuracy of R^2 = 0.95. It was determined that the maximum allowable air velocity at the site should not exceed 2.6 m/s. Using approximated data, it was forecasted that, in the absence of air movement, the dust concentration at the operator's workplace would remain at 0.5 mg/m^3. To reduce dust concentration at the operator's workplace, comprehensive measures to minimize dust generation at the crushing plant are necessary, including washing vehicle wheels, installing dust suppression systems, and replacing the open belt conveyor with a closed one. To prevent the development of occupational diseases, operators are advised to use personal respiratory, skin, and eye protection throughout the shift.

Keywords

production, crushed stone, crushing and screening plant, dust, concentration, emissions, dust concentration, dust generation, operator, labor conditions, harm, forecasting, protection

For citation

Korol E.A., Degaev E.N., Konyukhov D.S. Assessing dust concentration at the workplace of a crushing and screening plant operator for special labor conditions evaluation. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):395–405. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-235

Введение

По данным[1] Роструда добывающая промышленность остается наиболее травмоопасной сферой экономической деятельности [1, 2]. Связано это прежде всего с особенностями производственных процессов, сложными климатическими и географическими условиями. Объем производства щебня в 2023 г. превысил 221 млн т, что на 24,5% больше, чем в 2017 г. (рис. 1). Щебень является одним из основных материалов, используемых в строительстве и производстве строительных материалов. Снижения темпов добычи и производства в ближайшие годы не предвидится в связи с реализацией различных крупных федеральных проектов, а значит отрасли необходимо увеличивать мощности и количество рабочих мест [3, 4].

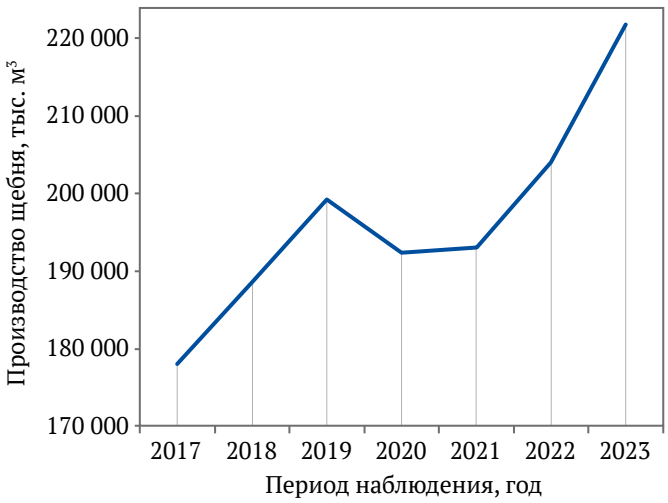


Рис. 1. Динамика производства щебня в России за 2017–2023 гг.

[1] Результаты мониторинга условий и охраны труда в Российской Федерации в 2022 году. Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации. М., 2022.

Производство щебня связано с рядом профессиональных рисков и опасностей для здоровья работников [4, 5]. На щебеночных заводах работают люди разных профессий, и каждая из них имеет свои особенности и риски для здоровья. Например, водители самосвалов и погрузчиков подвергаются воздействию шума и вибрации, что может привести к снижению слуха и развитию вибрационной болезни. Однако наиболее опасным фактором при производстве щебня является пыль, которая на 60% и более состоит из диоксида кремния (SiO_2). Операторы дробилок и грохотов работают в условиях повышенной запыленности, что может вызывать развитие силикоза и других заболеваний легких [6, 7].

Исследования в этой области в основном направлены на изучение влияния кремнеземной пыли на здоровье человека и замеров запыленности воздуха в целом по заводу или карьеру в различной отдаленности от источников загрязнения для моделирования и разработки методов снижения пыли. Так, В.С. Кузнецов и Л.Ф. Суламанидзе отмечают, что при работе щебеночного завода концентрация пыли на границе санитарно-защитной зоны превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 5–10 раз [8]. Дзифа Фрэнсис Ахадзи исследовал влияние кремнеземной пыли на состояние работников каменных карьеров и симптомы их заболеваний. Автор рекомендует использовать средства индивидуальной защиты (СИЗ) зрения и дыхания [9]. Фредерик Анлима в своих исследованиях отмечает увеличение случаев силикоза в ряде стран и ставит под сомнение методы борьбы с пылью и их эффективность в предотвращении воздействия вдыхаемого кристаллического кремнезема [10]. Чжичао Лю на основе результатов моделирования предложил оптимальный метод снижения пыли, подходящий для дробильной станции, и смоделировал закон диффузии пыли при этом методе [11].

С 2014 г. в России введена специальная оценка условий труда (СОУТ), которая регламентируется федеральным законодательством[2] и направлена на выявление и оценку вредных и опасных производственных факторов на отдельных рабочих местах, а также на разработку мероприятий по улучшению условий труда и профилактику профессиональных заболеваний.

Целью работы является определение запыленности рабочего места оператора дробильно-щебеночного завода в рамках специальной оценки условий труда.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– провести испытания и определить среднесменную концентрацию пыли в рабочей зоне оператора;

– выявить факторы, влияющие на запыленность рабочего места оператора;

– по аппроксимированным данным спрогнозировать концентрацию пыли на рабочем месте при различных скоростях ветра;

– оценить адекватность и точность полученных результатов;

– установить класс (подкласс) условий труда оператора;

– разработать рекомендации по снижению запылённости рабочего места оператора и улучшению условий труда.

Новизна работы заключается в комплексном подходе оценки запылённости рабочего места оператора дробильно-щебёночного завода с учётом специфики отрасли и воздействия скорости ветра на уровень запылённости.

Научное значение работы заключается в аппроксимации полученных данных для прогнозирования запыленности рабочего места оператора в зависимости от скорости ветра на производственной площадке.

Практическая ценность работы заключается в прогнозировании концентрации пыли в воздухе рабочего места оператора от скорости ветра на производственной площадке, а также в разработке рекомендаций по снижению запылённости на дробильно-сортировочном заводе.

Методы исследований

Для измерения концентрации пыли в воздухе рабочего места оператора дробильно-сортировочного завода использовался аспирационный метод, основанный на просасывании определенного объема воздуха через специальные фильтры с последующим измерением массы пыли и расчетом концентрации[3].

Массовую концентрацию всей пыли в воздухе $K_п$ в каждом отдельном испытании определяют по формуле:

$$K_п = \frac{(m_n - m_0)\cdot 1000}{V_{20}}, \quad (1)$$

где $K_п$ – концентрация пыли в воздухе, мг/м^3; m_0 – масса чистого фильтра, мг; m_n – масса фильтра с осевшими частицами пыли, мг; V_{20} – объем воздуха, приведенный к стандартным условиям, дм^3;

$$V_{20} = \frac{V_t \cdot 293P}{(273+T)\cdot 101{,}33}, \quad (2)$$

где V_t – объем воздуха, прошедший через фильтр, дм^3; P – атмосферное давление, кПа; T – температура воздуха на рабочем месте, °С.

Если время отдельных измерений разное, то рассчитывают средневзвешенную концентрацию по формуле:

$$K_{oi} = \frac{K_{п1}t_1 + K_{п2}t_2 + \ldots + K_{пn}t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}, \quad (3)$$

где $t_1, t_2, \ldots, t_n$ – время измерений, мин.

Среднесменная концентрация пыли на рабочем месте рассчитывается по формуле:

$$K_{сс} = \frac{K_{o1}T_{o1} + K_{o2}T_{o2} + \ldots + K_{on}T_{on}}{\sum T}, \quad (4)$$

где $K_{o1}, K_{o2}, \ldots, K_{on}$ – средневзвешенные концентрации пыли за технологическую операцию, мг/м^3;

[2] Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда».

[3] Методика измерений массовой концентрации пыли гравиметрическим методом для целей специальной оценки условий труда. МИ АПФД–18.01.2018; МУК 4.1.2468–09 Измерение массовых концентраций пыли в воздухе рабочей зоны предприятий горнорудной и нерудной промышленности.

T_{o1}, T_{o2}, ..., T_{on} – продолжительность технологических операций, мин; ΣT – суммарная продолжительность рабочей смены, мин.

Для оценки распределения данных определяют медиану *Me* и стандартное геометрическое отклонение σ_g:

$$Me = e^{\ln Me}, \quad (5)$$

где

$$\ln Me = \frac{t_1 \ln K_{п1} + t_1 \ln K_{п1} + \ldots + t_n \ln K_{пn}}{\sum t}, \quad (6)$$

$$\sigma_g = e^{\sqrt{2 \ln \frac{K_{пn}}{Me}}}. \quad (7)$$

Окончательный результат записывают в виде:

$$K \pm 0{,}01\delta\tilde{K} \text{ при P = 0,95}, \quad (8)$$

где $\tilde{K}$ – среднее арифметическое значение результатов измерений *n*, мг/м^3; δ – границы относительной погрешности, %.

Для оценки точности и адекватности расчетов возможно также использовать вероятностный метод обработки данных. Для этого рассчитывают стандартное геометрическое отклонение по формуле:

$$\sigma_g = \left(\frac{K_{84}}{Me} + \frac{Me}{K_{16}} \right) : 2, \quad (9)$$

где K_{84} и K_{16} – значения концентраций, соответствующие 84 % и 16 % вероятности накопления частот, мг/м^3.

Среднесменную концентрацию пыли при этом определяют по формуле:

$$K_{cc} = e^{\ln K_{cc}}, \quad (10)$$

где

$$\ln K_{cc} = \ln Me + 0{,}5(\ln \sigma_g)^2. \quad (11)$$

Результаты исследований

Измерения запыленности производились в рамках процедуры специальной оценки условий труда [12, 13] на дробильно-щебеночном заводе, находящемся в Подмосковье. Рабочее место оператора находится в отдельно стоящем помещении контейнерного типа на высоте трех метров от уровня земли. Помещение оборудовано климатическим оборудованием для кондиционирования воздуха.

Пылеобразование на дробильно-сортировочном заводе происходит на всем производственном цикле (рис. 2). Основными факторами генерации пыли на производственной площадке являются:

– движение грузового автотранспорта;
– загрузка сырья в приемочный бункер;
– работа дробильного агрегата;
– работа вибрационного грохота;
– поступление щебня в навалы.

Наиболее интенсивное пылеобразование на исследуемом объекте происходит при поступлении отсортированного щебня в навалы. При свободном падении с ленточного конвейера более легкие частицы пыли отрываются от поверхности щебня за счет сопротивления воздуха. Чем с большей высоты падает щебень, тем больше кинетической энергии он приобретает. Эта энергия передаётся частицам пыли, вызывая их движение и столкновение друг с другом. В результате увеличивается число столкновений и разрушений частиц пыли, что приводит к образованию большего объема пыли. Еще одним фактором, определяющим высокое пылеобразование на производственной площадке, является ветер, который усиливает не только движение пыли, но и поднимает с поверхности навалов и технологического оборудования осевшие частицы, тем самым увеличивая концентрацию пыли в воздухе. Поэтому в данной работе в дополнение к стандартной методике проводили

Рис. 2. Схема дробильно-щебеночного завода с иллюстрацией основных источников пылеобразования

измерение скорости ветра и анализ его влияния на запыленность рабочего места оператора.

В качестве математической модели, описывающей пылевые выбросы, можно использовать систему уравнений, включающих [14]:

– уравнение Навье–Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial \tau}+V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_x}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_x}{\partial z}= \\ =-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x}+\frac{\eta}{\rho}\left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}\right), \\ \frac{\partial V_y}{\partial \tau}+V_x\frac{\partial V_y}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_y}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_y}{\partial z}= \\ =-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial y}+\frac{\eta}{\rho}\left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2}\right)-g, \\ \frac{\partial V_z}{\partial \tau}+V_x\frac{\partial V_z}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_z}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_z}{\partial z}= \\ =-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}+\frac{\eta}{\rho}\left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2}\right); \end{cases} \quad (12)$$

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau}+\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_y}{\partial y}+\frac{\partial V_z}{\partial z}\right)\rho=0; \quad (13)$$

– уравнение Менделеева–Клайперона:

$$P=\frac{\rho}{M}RT; \quad (14)$$

– уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau}+V_x\frac{\partial T}{\partial x}+V_y\frac{\partial T}{\partial y}+V_z\frac{\partial T}{\partial z}= =\frac{1}{c(T)\rho}\left(\frac{\partial\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right)}{\partial z}\right); \quad (15)$$

– уравнение изменения концентрации пыли:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau}+V_x\frac{\partial C}{\partial x}+(V_y+V_c)\frac{\partial C}{\partial y}+V_z\frac{\partial C}{\partial z}=F_c, \quad (16)$$

где x, y, z – декартовы координаты; τ – время; V – скорость движения воздуха; P – давление воздуха; ρ – плотность материала; T – температура воздуха; M – молярный объем; R – универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/моль·К); η – динамическая вязкость; g – ускорение свободного падения; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности материала; $C(T)$ – удельная теплоемкость материала; C – концентрация пылевых выбросов; V_c – скорость оседания пылевых выбросов (0,04 м/с); F_c – мощность источника пыли [14].

Во время испытаний производственный процесс был разделен условно на четыре этапа по два часа, равномерно распределенных в течение смены. Время проведения измерения для каждой отдельной пробы – 25 мин. Общее время измерений составляет 400 мин, что соответствует 83 % рабочей смены. Отбор проб производился фильтрами АФА (аналитические аэрозольные фильтры) с помощью аспиратора типа ПУ. В процессе испытаний ветер дул в направлении

Таблица 1

Результаты отбора проб воздуха для определения среднесменных концентраций расчетным методом

№ этапа	Длительность этапа T, мин	Масса фильтра m_0, мг	Масса фильтра m_n, мг	Расход воздуха, л/мин	Атмосферное давление, кПа	Время измерения t, мин	Температура воздуха в рабочей зоне, °C	Скорость ветра V, м/с	Частные значения концентрации пыли в воздухе K, мг/м³	Среднеарифметическая концентрация по этапу K_{ol}, мг/м³	Среднесменная концентрация пыли в воздухе K_{cc}, мг/м³	Медиана Me	Стандартное геометрическое отклонение σ_g
I	120	62574,6	62577,0	20	102,0	25	21,4	1	4,79	3,70	7,7	6,22	1,92
		62020,2	62022,7			25	21,5	2	4,99				
		62828,1	62829,1			25	21,9	1	2,00				
		62532,8	62534,3			25	22,0	1	3,00				
II	120	64731,1	64737,2		102,2	25	22,3	4	12,19	14,21			
		60150,5	60159,4			25	22,5	5	17,80				
		60741,8	60750,1			25	22,7	5	16,61				
		61799,2	61804,3			25	23,5	4	10,23				
III	120	63384,4	63389,2		102,6	25	24,8	4	9,64	9,41			
		61474,8	61479,0			25	25,4	4	8,45				
		61696,4	61702,2			25	25,9	4	11,69				
		61495,3	61499,2			25	26,1	3	7,86				
IV	120	60473,5	60475,6		102,8	25	25,5	2	4,22	3,41			
		63826,8	63829,0			25	25,2	1	4,41				
		63638,6	63640,0			25	24,7	1	2,80				
		63937,4	63938,6			25	24,4	1	2,40				

помещения, в котором располагается рабочее место оператора. В табл. 1 представлены результаты измерений и последующая их обработка согласно стандартной расчетной методике.

Полученные результаты свидетельствуют о стабильной концентрации пыли в воздухе рабочей зоны, т.к. стандартное геометрическое отклонение $\sigma_g<3$. Однако, стоит отметить, что средние концентрации этапов различаются в 3–4 раза, что связано с интенсивностью и направлением ветра на производственной площадке. Усиление ветра до 5 м/с наблюдалось с 10:00 до 13:30, что соответствует максимальным значениям концентрации пыли на рабочем месте (рис. 3).

По полученным данным, приведенным на рис. 4, можно спрогнозировать концентрации пыли $K_{пр}$ на рабочем месте в зависимости от скорости ветра V на производственной площадке с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}95$:

$$K_{пр} = 0{,}2185V^3 - 1{,}1571V^2 + 3{,}6493V + 0{,}4968. \quad (17)$$

С помощью графика, представленного на рис. 4, определим предельно допустимую скорость ветра на исследуемом объекте:

$$V_{п.д} = 2{,}6 \text{ м/с}.$$

Для того чтобы определить зависимость пылеобразования от технологического оборудования, движения автотранспорта, загрузки приемочного бункера и высоты свободного падения щебня, по формуле (17) рассчитаем концентрацию пыли при $V = 0$ м/с:

$$K_{пр.0} = 0{,}5 \text{ мг/м}^3.$$

Для оценки достоверности измерений использован вероятностный метод обработки полученных результатов [15, 16]. Данный метод позволяет получить полное представление о всех концентрациях пыли в воздухе рабочей зоны с помощью логарифмической вероятностной сетки. Чтобы исследовать соответствие данных нормальному распределению, применили метод гистограммы частот, который является одним из способов графического представления распределения данных (рис. 5).

Полученная гистограмма имеет колоколообразную форму и напоминает график нормальной кривой, что позволяет предположить, что данные следуют нормальному закону [17]. Данные для вероятностной обработки приведены в табл. 2, в которой значения отдельных измерений концентраций ранжировали в порядке возрастания с определением накопленных частот.

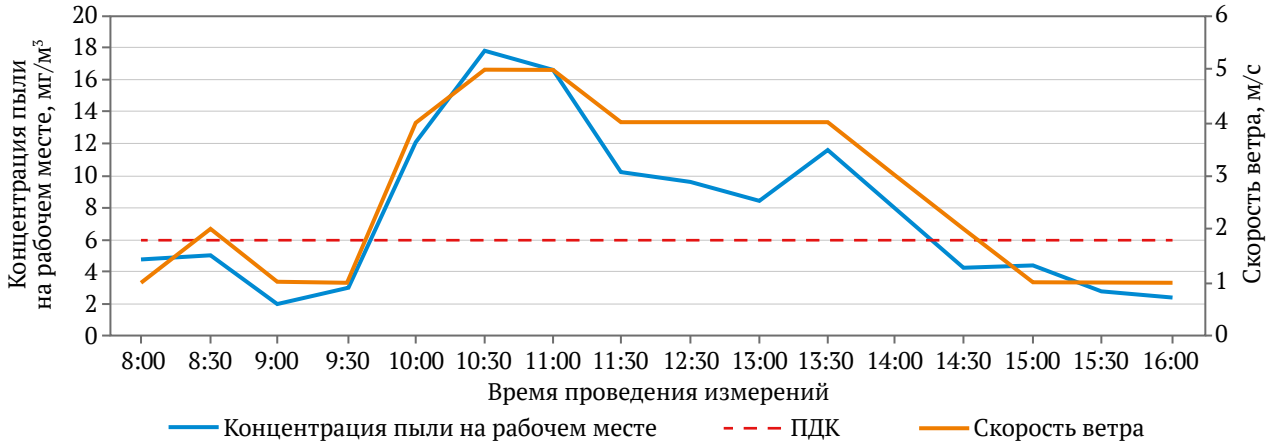


Рис. 3. Изменение концентрации пыли на рабочем месте на различных этапах испытания

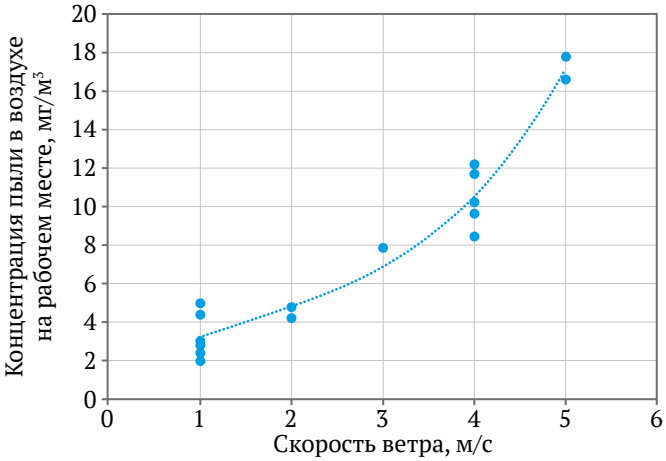


Рис. 4. Зависимость концентрации пыли на рабочем месте от скорости ветра

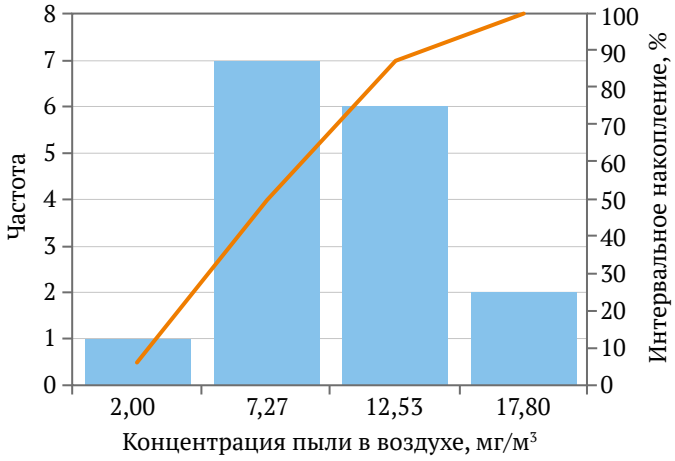


Рис. 5. График нормального распределения при $n = 16$

На вероятностную сетку (рис. 6) нанесены результаты концентраций, соответствующие накопительные частоты и построена через точки интегральная прямая, по которой определены: медиана $Me = 6$ и значения концентраций для 84 и 16% ($K_{84} = 12{,}1$ мг/м³; $K_{16} = 3{,}2$ мг/м³).

Для проверки предположения соответствия модели нормальному закону распределения рассчитаем критерий Шапиро–Уилка:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} a_i x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \tilde{x})^2} = 0{,}91, \qquad (18)$$

где n – количество наблюдений; x_i – значения упорядоченной выборки; a_i – табличные коэффициенты, зависящие от количества испытаний.

Таблица 2

Расчет среднесменной концентрации пыли в воздухе рабочей зоны вероятностным методом

№ п/п	Частные значения концентрации пыли в воздухе K в порядке ранжирования, мг/м³	Время измерения T, мин	Длительность отбора пробы от общей продолжительности проведения испытания, %	Накопленная частота, %	Среднесменная концентрация пыли в воздухе $K_{сс}$, мг/м³	Медиана Me	Стандартное геометрическое отклонение σ_g
1	2,00	25	6,25	6,25	7,6	6,00	1,94
2	2,40	25	6,25	12,50			
3	2,80	25	6,25	18,75			
4	3,00	25	6,25	25,00			
5	4,22	25	6,25	31,25			
6	4,41	25	6,25	37,50			
7	4,79	25	6,25	43,75			
8	4,99	25	6,25	50,00			
9	7,86	25	6,25	56,25			
10	8,45	25	6,25	62,50			
11	9,64	25	6,25	68,75			
12	10,23	25	6,25	75,00			
13	11,69	25	6,25	81,25			
14	12,19	25	6,25	87,50			
15	16,61	25	6,25	93,75			
16	17,80	25	6,25	100,00			

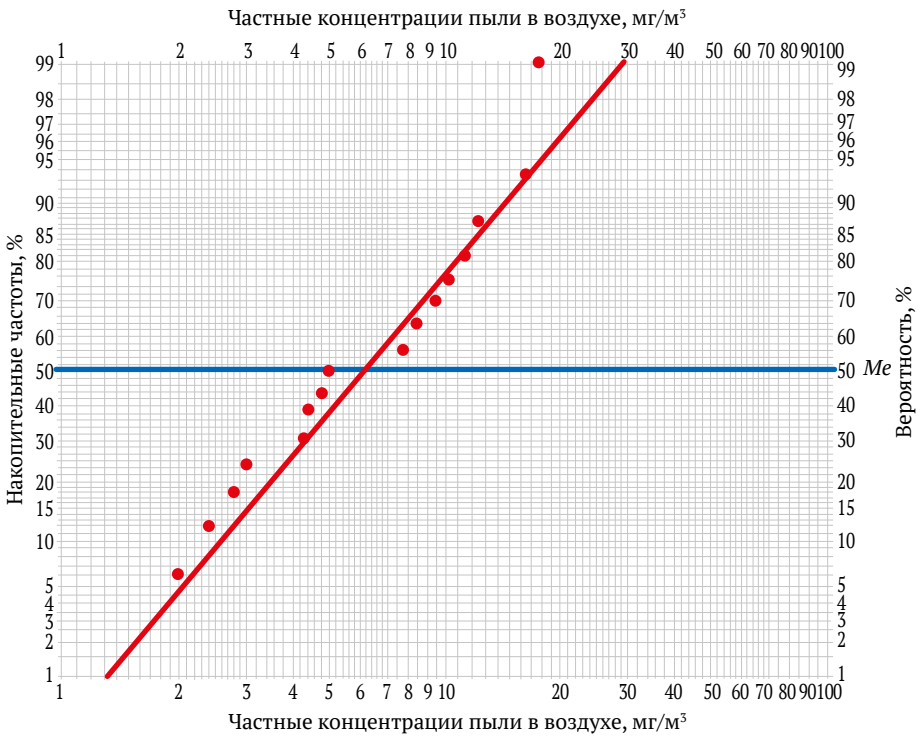


Рис. 6. Вероятностная координационная сетка

Таблица 3

Результаты промежуточных расчетов критерия Шапиро–Уилка

$\tilde{x}$	x_i	$(x_i - \tilde{x})^2$	a_i	$a_i \cdot x_i$
7,69	2,00	32,38	0,51	1,02
	2,40	27,98	0,33	0,79
	2,80	23,91	0,25	0,70
	3,00	22,00	0,19	0,57
	4,22	12,04	0,15	0,63
	4,41	10,76	0,10	0,44
	4,79	8,41	0,06	0,29
	4,99	7,29	0,02	0,10
	7,86	0,03	–0,02	–0,16
	8,45	0,58	–0,06	–0,51
	9,64	3,80	–0,10	–0,96
	10,23	6,45	–0,15	–1,53
	11,69	16,00	–0,19	–2,22
	12,19	20,25	–0,25	–3,05
	16,61	79,57	–0,33	–5,48
	17,80	102,21	–0,51	–9,08
Сумма	–	373,66	–	–18,45

В табл. 3 приведены промежуточные расчеты критерия Шапиро–Уилка.

Рассчитанный критерий W больше табличного значения $W_t = 0{,}887$ (уровень значимости $\alpha = 0{,}05$), что с вероятностью 0,95 подтверждает соответствие модели распределения нормальному закону.

Полученная среднесменная концентрация пыли при вероятностном методе составила 7,6 мг/м³. Отклонение в 0,1 мг/м³ доказывает точность и адекватность проведенных испытаний, т.к. доверительный интервал согласно выражению (8) равен ±1,85 мг/м³. За результат принимаем расчетное значение:

$$K_{cc} = 7{,}7 \pm 1{,}85 \text{ мг/м}^3.$$

Сводные результаты по определению класса (подкласса) условий труда представлены в табл. 4. Пыль от производства щебня относится к аэрозолям преимущественно фиброгенного действия, что соответствует 3-му классу опасности. Полученный результат выше предельно допустимой концентрации (ПДК) в 1,28 раза, что относится к классу 3.1 (подклассу) условий труда и требует установления дополнительных выплат за вредность.

Заключение

Полученные результаты определения запыленности рабочего места оператора дробильно-сортировочного завода свидетельствуют о превышении ПДК в 1,28 раз, что относится к классу 3.1 (подклассу) условий труда. Среднесуточная концентрация пыли в воздухе рабочего места оператора равна 7,7 мг/м³, однако, стоит отметить, что средние концентрации этапов различаются в 3–4 раза, что связано с интенсивностью и направлением ветра на производственной площадке.

По полученным данным спрогнозированы концентрации пыли $K_{пр}$ на рабочем месте в зависимости от скорости ветра V на производственной площадке с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0{,}95$. Установлено, что максимально допустимая скорость ветра на производственной площадке не должна быть выше 2,6 м/с.

При превышении ПДК пыли в воздухе рабочих мест согласно законодательству[4] работодатель должен приостановить производство и принять меры для снижения содержания пыли в воздухе до минимально возможного уровня.

Для снижения запыленности рабочего места оператора необходимы комплексные мероприятия по сокращению пылеобразования на дробильно-сортировочном заводе, включающие [18–22]:

– мойку колес автомобильного транспорта при въезде на производственную площадку и выезде из неё;

– установку стационарных или мобильных систем подавления пыли с помощью распыления воды форсунками низкого и среднего давления, создающими туман.

– замену открытого ленточного конвейера на закрытый.

Кроме того, рекомендуется замена фильтров климатического оборудования на угольные, способствующие более качественному очищению воздуха.

С помощью аппроксимированных данных спрогнозировано, что при отсутствии ветра на произ-

[4] «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 № 197-ФЗ

Таблица 4

Результаты оценки условий труда рабочего места

Профессия / должность	Величина ПДК* пыли в воздухе на рабочем месте, мг/м³	Класс опасности	Особенности действия на организм	Среднесуточная концентрация пыли в воздухе рабочего места, мг/м³	Отклонение от ПДК	Класс (подкласс) условий труда**
Оператор дробильно-сортировочного цеха	6	3	Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия	7,7	1,28	3.1

Источники: * ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны»; ** ГОСТ Р 54578–2011 «Воздух рабочей зоны. Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия. Общие принципы гигиенического контроля и оценки воздействия».

водственной площадке концентрация пыли в воздухе рабочего места оператора сохранится на уровне 0,5 мг/м^3. Вдыхание кристаллического диоксида кремния может привести к образованию узелков соединительной ткани в лёгких и рубцеванию области вокруг частиц. Естественные защитные клетки организма не могут удалить токсичную пыль, что приводит к постоянному воспалению и возможному повреждению клеток лёгких. У некоторых людей при контакте с пылью возможны проявления аллергии в виде кожных высыпаний и/или зуда. Для предотвращения развития профессиональных заболеваний операторам рекомендуется использовать средства индивидуальной защиты органов дыхания, кожи и глаз на протяжении всей смены.

Представленные результаты могут быть использованы для прогнозирования концентрации пыли на рабочих местах операторов других щебеночных заводов с учетом полученных индивидуальных эмпирических данных.

Список литературы / References

1. Nikulin A., Nikulina A.Y. Assessment of occupational health and safety effectiveness at a mining company. *Ecology, Environment and Conservation*. 2017;23(1);351–335.
2. Король Е.А., Дегаев Е.Н., Конюхов Д.С. Обеспечение безопасных условий труда при перекладке подземных инженерных коммуникаций. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(2):129–139. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_2_0_129
Korol E.A., Degaev E.N., Konyukhov D.S. Labor safety in laying of underground utilities. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024; (2):129–139. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_2_0_129
3. Лапшин Н.С. Виноградов И.П., Дзюрич Н.С. Анализ тенденций развития рынка нерудных строительных материалов в Российской Федерации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018:(7):205–211. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-0-205-211
Lapshin N.S. Vinogradov I.P., Dzurich N.S. Analysis of development trend in the market of nonmetallic constructional materials in the Russian Federation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018:(7):205–211. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-0-205-211
4. Буткевич Г.Р. Промышленность нерудных строительных материалов. Взгляд в будущее. *Строительные материалы*. 2019;(11):32–36. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-32-36
Butkevich G.R. Industry of non-metallic building materials. Prospection. *Building Materials*. 2019;(11):32–36. (In Russ.) https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-776-11-32-36
5. Баловцев С.В. Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах. *Горные науки и технологии*. 2023;8(4):350–359. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-163
Balovtsev S.V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2023;8(4):350–359. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-163
6. Растанина Н.К., Колобанов К.А. Воздействие техногенного пылевого загрязнения на экосферу и здоровье человека закрытого горного предприятия Приамурья. *Горные науки и технологии*. 2021:6(1):16–22. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22
Rastanina N.K., Kolobanov K.A. Impact of technogenic dust pollution from the closed mining enterprise in the Amur Region on the ecosphere and human health. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2021;6(1):16–22. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22
7. Rathebe P. Occupational exposure to silicon dioxide and prevalence of chronic respiratory symptoms in the cement manufacturing industries: *Journal of Public Health Research*. 2023;12(4):1–10. https://doi.org/10.1177/22799036231204316
8. Суламанидзе Л.Ф. Кузнецов Л.Ф. Оценка пылевого загрязнения атмосферы при переработке нерудных материалов. В: *Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки: материалы XVII молодёжной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных*. СПб.: Lulu Press; 2019. С. 38–41.
Sulamanidze L.F. Kuznetsov L.F. Assessment of dust pollution of the atmosphere during the processing of non-metallic materials. In: *Step into the future: theoretical and applied research of modern science: materials of the XVII Youth International Scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists*. St. Petersburg: Lulu Press; 2019. Pp. 38–41. (In Russ.)
9. Ahadzi D.F., Afitiri A.R., Ekumah B. et al. Self-reported disease symptoms of stone quarry workers exposed to silica dust in Ghana. *Health Science Reports*. 2020;3(4):189. https://doi.org/10.1002/hsr2.189
10. Anlimah F., Gopaldasani V., MacPhail C. et al. A systematic review of the effectiveness of dust control measures adopted to reduce workplace exposure. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023:30(19);54407–54428. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26321-w
11. Liu Z., Ao Z., Zhou W. et al. Research on the physical and chemical characteristics of dust in open pit coal mine crushing stations and closed dust reduction methods. *Sustainability*. 2023;*15*(16):12202. https://doi.org/10.3390/su151612202

12. Пахомова Л.А., Олейник П.П. Выбор и оценка параметров аттестации рабочих мест СОУТ (специальная оценка условий труда). *Строительное производство*. 2019:(1);49–52. https://doi.org/10.54950/26585340_2019_1_49
Pakhomova L., Oleynik P. Selection and evaluation of work place certification parameters (special assessment of labor conditions). *Construction Production*. 2019:(1);49–52. (In Russ.) https://doi.org/10.54950/26585340_2019_1_49
13. Занина И.А., Макеева Л.А., Жабаева М.У и др. Выявление причин травматизма в угольной промышленности и меры по снижению рисков (на примере ТОО «Богатырь комир»). *Наука и реальность*. 2023;4(16):90–95.
Zanina I.A., Makeeva L.A., Zhabaeva M.U. et al. Identification of the causes of injuries in the coal industry and measures to reduce risks (using the example of Bogatyr Komir LLP). *Science & Reality*. 2023;4(16):90–95. (In Russ.)
14. Матюшинец Т.В., Яцкевич Ю.В., Чичко А.Н. Математическое моделирование распределения пылевых выбросов в пространственной структуре цеха. *Литье и металлургия*. 2018;(4):107–113. https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-107-113
Matyushinets T.V., Jatskevich Yu.V., Chychko A.N. Mathematical modeling of the distribution of dust emissions in the spatial structure of the workshop. *Foundry Production and Metallurgy*. 2018;(4):107–113. (In Russ.) https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-107-113
15. Веревкина О.И. О гибридном методе прогнозирования рисков на железнодорожном транспорте на основании общего логико-вероятностного метода. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2017;14(4):615–627.
Verevkyna O.I. On the hybrid method of forecasting the risks on railway transport based on the general logical-and-probabilistic method. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2017;14(4):615–627.
16. Kuligin D., Shkoliar F. Influence of the probabilistic method to summarize loads on the reliability and material consumption of building structures. *Architecture and Engineering*. 2023:8(2):49–57. https://doi.org/10.23968/2500-0055-2023-8-2-49-57
17. Дуплякин В.М. Особенности идентификации нормального закона распределения. Вестник Самарского университета. *Экономика и управление*. 2020:11(3):176–183. https://doi.org/10.18287/2542-0461-2020-11-3-176-183
Duplyakin V.M. Nuances of identification for normal distribution. Vestnik of Samara University. *Economics and Management*. 2020:11(3):176–183. https://doi.org/10.18287/2542-0461-2020-11-3-176-183
18. Zeng L.-M., Yang X.-Y., Wang L.-H. et al. Determination of weight concentration of free silicon dioxide for dust using X-ray diffraction technique and Rietveld refinement method. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 2008;(36):599–603.
19. Jing D., Ma J., Dong Z. et al. Research on factors affecting the spread of dust pollution in conveyor belt workshop and research on wet dust reduction technology. *PLoS One*. 2024;19(2):e0299328. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299328
20. Jing D., Ma J., Zhang T. et al. Numerical simulation of the fine kinetics of dust reduction using high-speed aerosols. *PLoS One*. 2023;18(12):e0286101. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286101
21. Bajracharya N., Magar P., Karki S. et al. Occupational health and safety issues in the construction industry in south asia: a systematic review and recommendations for improvement. *Journal of Multidisciplinary Research Advancements*. 2023;1(1):27–31. https://doi.org/10.3126/jomra.v1i1.55101
22. 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
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

Информация об авторах

Елена Анатольевна Король – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой жилищно-коммунального комплекса, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-5019-3694, Scopus ID 57197844794, ResearcherID C-2635-2019, AuthorID 678276; e-mail KorolEA@mgsu.ru

Евгений Николаевич Дегаев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры жилищно-коммунального комплекса, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-6384-8277, Scopus ID 57195225439, ResearcherID S-1854-2018, AuthorID 798266; e-mail degaev@inbox.ru

Дмитрий Сергеевич Конюхов – доктор технических наук, АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация; МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-8635-232X, Scopus ID 6507981388, AuthorID 350235; e-mail gidrotehnik@inbox.ru

Information about the authors

Elena A. Korol – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Housing and Communal Services, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-5019-3694, Scopus ID 57197844794, ResearcherID C-2635-2019, AuthorID 678276; e-mail KorolEA@mgsu.ru

Evgeniy N. Degaev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Housing and Communal Complex, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0001-6384-8277, Scopus ID 57195225439, ResearcherID S-1854-2018, AuthorID 798266; e-mail degaev@inbox.ru

Dmitry S. Konyukhov – Dr. Sci. (Eng.), Mosinzhproekt JSC, Moscow, Russian Federation; MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0001-8635-232X, Scopus ID 6507981388, AuthorID 350235; e-mail gidrotehnik@inbox.ru

Поступила в редакцию	27.03.2024	**Received**	27.03.2024
Поступила после рецензирования	23.05.2024	**Revised**	23.05.2024
Принята к публикации	01.06.2024	**Accepted**	01.06.2024

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-206
УДК 631.453:631.618:504.53:622

Химико-экологические свойства почв и индекс NDVI на рекультивированных сернистоугольных отвалах бореальной зоны

Н.В. Митракова ✉, Е.А. Хайрулина, А.А. Перевощикова, Н.В. Порошина, Е.Е. Малышкина, Е.С. Яковлева, Н.А. Кобелев

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация

✉ *mitrakovanatalya@mail.ru*

Аннотация

Рекультивация угольных отвалов путем создания устойчивого почвенного и растительного покрова на их поверхности способствует восстановлению экологических систем. В связи с этим актуальным является изучение свойств почв техногенных ландшафтов. Проблема биологической рекультивации изучалась на территории Кизеловского угольного бассейна. Оценена эффективность рекультивации на нескольких сернистоугольных отвалах. Методы рекультивации, как и период формирования почвенно-растительного покрова, различались. Агрохимические свойства почв отвалов изучали стандартными методами. Индекс NDVI (нормализованный относительный индекс растительности) рассчитан по снимкам Sentinel-2 и Landsat 7,8. Для оценки биологической активности использовали фитотестирование. Литостраты варьировались от слабокислых до нейтральных (pH–H_2O = 6,1–6,8); эмбриозем имел слабощелочную реакцию (7,9). Эмбриозем благодаря наличию частиц угля имел наибольшее содержание органического вещества (12–7,7 %). В зависимости от «возраста» почвы количество органического вещества в литостратах варьировало: для 7-летнего литострата оно колебалось от 2,4 до 8,9 %, а для 4-летнего было меньше 1 %. Поглотительная способность литостратов была аналогична с фоновой почвой. Почвы отвалов характеризовались низким уровнем питательных элементов (NPK), а 4-летний литострат имел самое низкое содержание N. Почвы отвалов показали благоприятные условия для роста растений, о чем свидетельствуют высота и масса кресс-салата и овса. Рассчитанный индекс NDVI для всех отвалов имел значения от 0,4 до 0,6, что свидетельствует о наличии устойчивого растительного покрова. Реализованные рекультивационные мероприятия доказали свою эффективность.

Ключевые слова

уголь, отвалы, отходы, рекультивация, почвообразование, литострат, почва, индекс NDVI, эмбриозем, Fe^{2+}, SO_4^{2-}, H^+, pH

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00324, https://rscf.ru/project/24-27-00324/.

Для цитирования

Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Perevoshchikova A.A., Poroshina N.V., Malyshkina E.E., Yakovleva E.S., Kobelev N.A. Chemical and ecological properties of soils and the NDVI analysis on reclaimed sulfide coal waste dumps in the boreal zone. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):406–419. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-206

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Chemical and ecological properties of soils and the NDVI analysis on reclaimed sulfide coal waste dumps in the boreal zone

N.V. Mitrakova ✉, E.A. Khayrulina, A.A. Perevoshchikova, N.V. Poroshina, E.E. Malyshkina, E.S. Yakovleva, N.A. Kobelev

Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

✉ *mitrakovanatalya@mail.ru*

Abstract

Reclamation of coal waste dumps through the establishment of a stable soil and vegetation cover on their surface contributes to the restoration of ecological systems. Therefore, studying the properties of soils in technogenic landscapes is of current importance. The problem of biological reclamation was studied in the

© Митракова Н. В., Хайрулина Е. А., Перевощикова А. А., Порошина Н. В., Малышкина Е. Е., Яковлева Е. С., Кобелев Н. А., 2024

Kizel Coal Basin area. The effectiveness of reclamation was evaluated on several sulfide coal waste dumps. The reclamation methods, as well as the period of soil-vegetation cover formation, varied. Agrochemical properties of the dump soils were studied using unified methods. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was calculated based on Sentinel-2 and Landsat 7,8 images. To assess biological activity, phytotesting was used. The lithostrats ranged from slightly acidic to neutral (pH–H_2O = 6.1–6.8); the embryonic soil showed a slightly alkaline reaction (7.9). The embryonic soil, due to the presence of coal particles, had the highest organic matter content (12–7.7%). Depending on the "age" of the soil, the amount of organic matter in the lithostrats varied: for the 7-year-old lithostrat, it ranged from 2.4 to 8.9%, while for the 4-year-old lithostrat, it was less than 1%. The absorption capacity of the lithostrats was similar to that of the background soil. The dump soils were characterized by low levels of nutrients (NPK), with the 4-year-old lithostrat having the lowest N content. The dump soils demonstrated favorable conditions for plant growth, as evidenced by the height and biomass of cress and oats. The calculated NDVI for all dumps ranged from 0.4 to 0.6, indicating the presence of a stable vegetation cover. The implemented reclamation measures proved to be effective.

Keywords
coal, dump, waste, reclamation, soil formation, lithostrat, soil, NDVI index, embryonic soil, Fe^{2+}, SO_4^{2-}, H^+, pH

Funding
The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-27-00324, https://rscf.ru/project/24-27-00324/.

For citation
Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Perevoshchikova A.A., Poroshina N.V., Malyshkina E.E., Yakovleva E.S., Kobelev N.A. Chemical and ecological properties of soils and the NDVI analysis on reclaimed sulfide coal waste dumps in the boreal zone. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):406–419. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-206

Введение

Горнодобывающая промышленность, в частности угледобыча, во многом способствует преобразованию природных экосистем. Подземные разработки вызывают изменение рельефа и оседание поверхности, так, в исследовании [1] смещение определено по записям годичных колец деревьев лиственницы Европейской Larix decidua, при этом авторы подтвердили наибольшую активность оседания в период интенсивной добычи полезных ископаемых. В результате горной добычи происходит изъятие земель под отходы. На территории Кузнецкого угольного бассейна ежегодно образуется около 3,6 млрд т отходов, при этом к настоящему времени площадь нарушенных открытым способом добычи земель увеличена до 16,4 га на 1 млн т добытого угля [2]. В почвах, прилегающих к отвалам, наблюдается высокое содержание полиаренов [3], их источником служат выбросы горящих отвалов, которые в результате атмосферного переноса распространяются на близлежащие территории. В выбросах горящих отвалов обнаружен нафталин, при этом его количество выше в отходах, содержащих пирогенный битум. Также выявлены антрацен, фенантрен, флуорантен и пирен, причем три последних указывают на интенсивное окисление органических веществ [4]. Почвы угледобывающих территорий часто подвержены загрязнению тяжёлыми металлами. В почвах шахтных районов повышена концентрация Cr, Ni и Hg относительно нормативных значений [5]. Причиной загрязнения почв и водных объектов является наличие микроэлементов в угле. Так, авторы [6] обнаружили, что во вмещающих породах угля при выщелачивании высвобождаются Se, Cd, Hg, As, Be и V Cr и Pb. Высокое содержание Fe, Al, Mn, Be и других элементов в реках Кизеловского угольного бассейна описано в работах [7, 8]. Использование коэффициента *Igeo* показало загрязнение Co, V, Nb, Hg, Sn, Zn, Sm, Ni, Cr, Gd донных отложений реки Косьва на территории КУБа [9]. Добыча угля, помимо загрязнения окружающей природной среды, приводит к изменению гидрологического режима. Результаты исследований [10] показали, что сток, глубина стока и весенний сток вследствие добычи угля уменьшились примерно на 25, 30 и 57 % соответственно, рассчитанные модули эрозии почвы и потеря почвы увеличены почти на 200 %.

Угли и углесодержащие породы крупнотоннажных отвалов добычи содержат большое количество сульфидов и органической серы в составе полезных ископаемых отвалов, при этом на различных месторождениях содержание серы в углях отличается. В составе углей Кизеловского угольного бассейна содержание серы составляет около 5–8 %, при этом сера имеет преимущественно пиритную природу [11]. Исследование Singh и Narzary [12] по изучению вскрышных и угольных пластов на шахте Тикок в Индии показали, что содержание серы в разных пластах колебалось от 0,02 до 2,5 %, при этом для угольного пласта максимальное содержание серы составило 1,9 %.

Пирит и другие сульфиды в отвалах вскрышной породы в окислительных условиях химически нестабильны. Первоначально при воздействии воды и кислорода с нейтральным pH происходит химическое окисление пирита с выделением Fe^{2+}, SO_4^{2-} и H^+ [13], в присутствии O_2 железо двухвалентное окисляется до трехвалентного. При этом постепенно возрастает кислотность вод и увеличивается активность ионов Fe^{3+}. Ацидофильные микроорганизмы убыстряют окисление пирита, что приводит к образованию кислых шахтных вод [13]. Кислые шахтные воды насыщены тяжелыми металлами, микроэлементами и сульфатами, обладают сильной кислотностью (pH = 2,5–3) [14]. Поэтому угольные отвалы являются источниками загрязнения окружающей среды.

Естественное восстановление растительного покрова на угольных отвалах происходит медленно вследствие высокой кислотности, вызванной окислением сульфидных минералов вскрышных пород, недостатка питательных веществ и неблагоприятного механического состава породы. Рекультивация значительно сокращает время формирования почвенного и растительного покрова на отвалах. Рекультивация угольных отвалов приводит к повышению величин pH почвы от ультракислых (pH–H_2O 2,7) к нейтральным (pH–H_2O 6,4) [15]. Изменение кислотности способствует восстановлению растительности, что улучшает качество почвы за счет увеличения количества органических и питательных веществ (NPK) в почве. Согласно данным [16–18] на более старых участках рекультивации увеличились как плотность растительного сообщества, так и биоразнообразие растений.

Формирование почвы на отвалах отходов угольной добычи препятствует распространению загрязняющих веществ в окружающую среду [19, 20]. Рекультивация отвалов и нарушенных земель, а также восстановление растительности и почвы необходимы для сохранения природной среды и предотвращения негативных последствий природопользования [21, 22].

Кизеловский угольный бассейн (КУБ) расположен в восточной части Пермского края (рис. 1) и занимает площадь около 1500 км^2 [7]. На территории КУБа проведено тщательное обследование поверхностных вод и донных отложений [7, 8, 23]. Однако современное состояние почв отвалов КУБа изучено недостаточно. Часть угольных отвалов КУБа рекультивирована, но масштабных научных исследований не проводилось. После закрытия шахт были предприняты попытки исследования почв, образованных на отвалах [24, 25]. Однако это были разовые исследования, и они не включали диагностику и классификацию, а также многие химические характеристики.

Целью работы является изучение химико-экологических свойств антропогенных почв, образовавшихся в результате рекультивации угольных отвалов, классификация образовавшихся почв, оценка эффективности рекультивации с использованием индекса NDVI и фитотестирования.

Материалы и методы

Описание территории исследования

Район исследования входит в состав Уральской геохимической провинции элювиально-трансаллювиальной области остаточных горных массивов западного склона Среднего Урала. По ландшафтному районированию территория исследования относится к Верхнеяйвинскому высокому грядово-увалистому ландшафту на палеозойских карбонатных и частично терригенных породах. Климат умеренно-континентальный, среднегодовое количество осадков 700 мм. В системе современного почвенно-экологического районирования территория КУБа относится к Западному предгорному району тяжелосуглинистых подзолистых, дерново-подзолистых и заболоченных почв. Район исследования относится к средне- и южнотаёжным предгорным пихтово-еловым и елово-пихтовым лесам.

Подземная добыча угля продолжалась с конца XVIII до конца XX в.; шахты были закрыты в начале 2000-х годов. На территории КУБа около 100 породных отвалов [7]. По данным спутниковых снимков 2021 г. площадь отвалов достигла 260 га. За время работы шахт накоплено свыше 35 млн м^3 пород. Литология

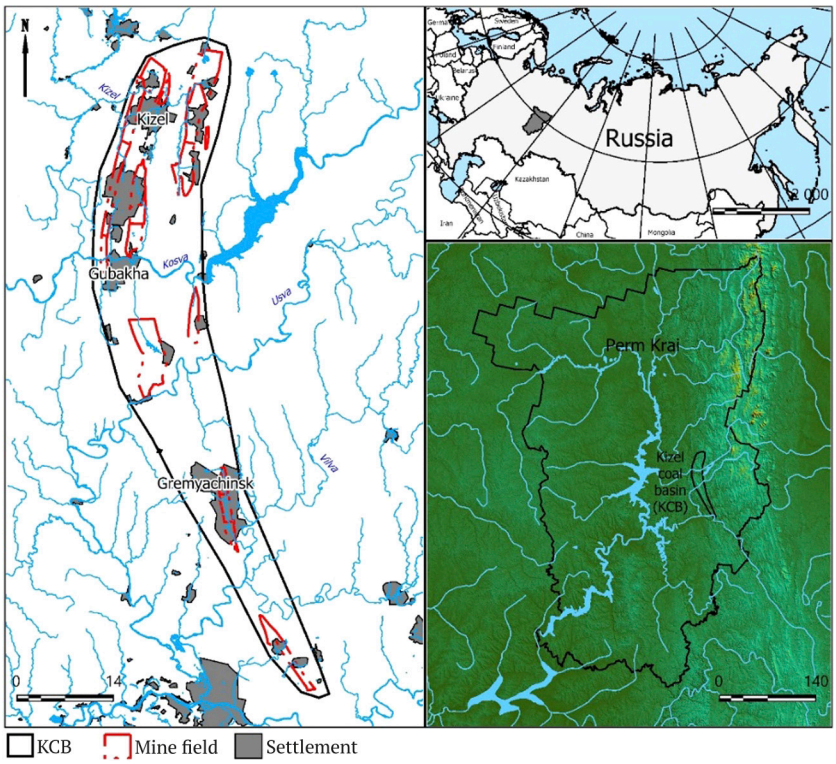


Рис. 1. Географическое положение Кизеловского угольного бассейна

угленосной толщи, технология добычи и складирования, а также возраст отвалов определили неоднородность породы отвалов, в которых установлено около 60 минералов [7]. Отвалы состоят из аргиллитов, алевролитов, песчаников, известняков, угля, пирита, содержат древесину и металлические предметы [26].

Отбор проб почвы

В летний период 2021 и 2022 гг. были отобраны пробы почв с трех рекультивированных отвалов (рис. 2). Глубина прикопок составила 30 см. Большое количество каменистого материала затрудняло отбор с большей глубины. Пробы почв были отобраны из центральной части отвала, поверхность которого была выровнена перед рекультивацией. На площади 5×5 м были заготовлены три прикопки и отобраны пробы с глубин 0–10, 10–20 и 20–30 см. Предварительно в местах отбора каждой пробы почвы поверхность очищалась от растительного покрова. Отбор проб из прикопок осуществлялся с помощью лопатки из нержавеющей стали. Образцы почв с каждого отвала с соответствующих глубин были смешаны. Почва упаковывалась в полиэтиленовые пакеты, маркированные записками с шифром пробы, датой и местом отбора. Масса объединенной пробы почвы составляла не менее 1 кг. В качестве фоновых проб смешанного леса были взяты образцы дерново-подзолистой почвы.

Прикопка 1 заложена на отвале шахты «Северная», пос. Шахта (рис. 2(1)) (59° 4’58.62”N 57°40’59.29”E). Отвал был рекультивирован в начале 2000-х годов путем выравнивания и добавления гашеной извести в верхний слой. В настоящее время отвал ровный.

Прикопка 2 заложена на отвале шахты «Центральная», пос. Углеуральский (рис. 2(2)) (58°56’54.31”N 57°36’15.50”E). В 2016 г. отвал был рекультивирован путем выравнивания и засыпки глинистым материалом толщиной 0,3–0,5 м. На отвале очагово наблюдаются насыпи строительного мусора.

Прикопка 3 заложена на отвале шахты «Гореловская», пос. Шумихинский (рис. 2(3)) (58°45’21.25”N 57°40’17.25”E). В 2018 г. отвал был рекультивирован путем выравнивания и засыпки глинистым материалом толщиной около 0,3 м.

В качестве фоновых проб отобраны образцы дерново-подзолистой почвы во вторичном мелколиственном лесу.

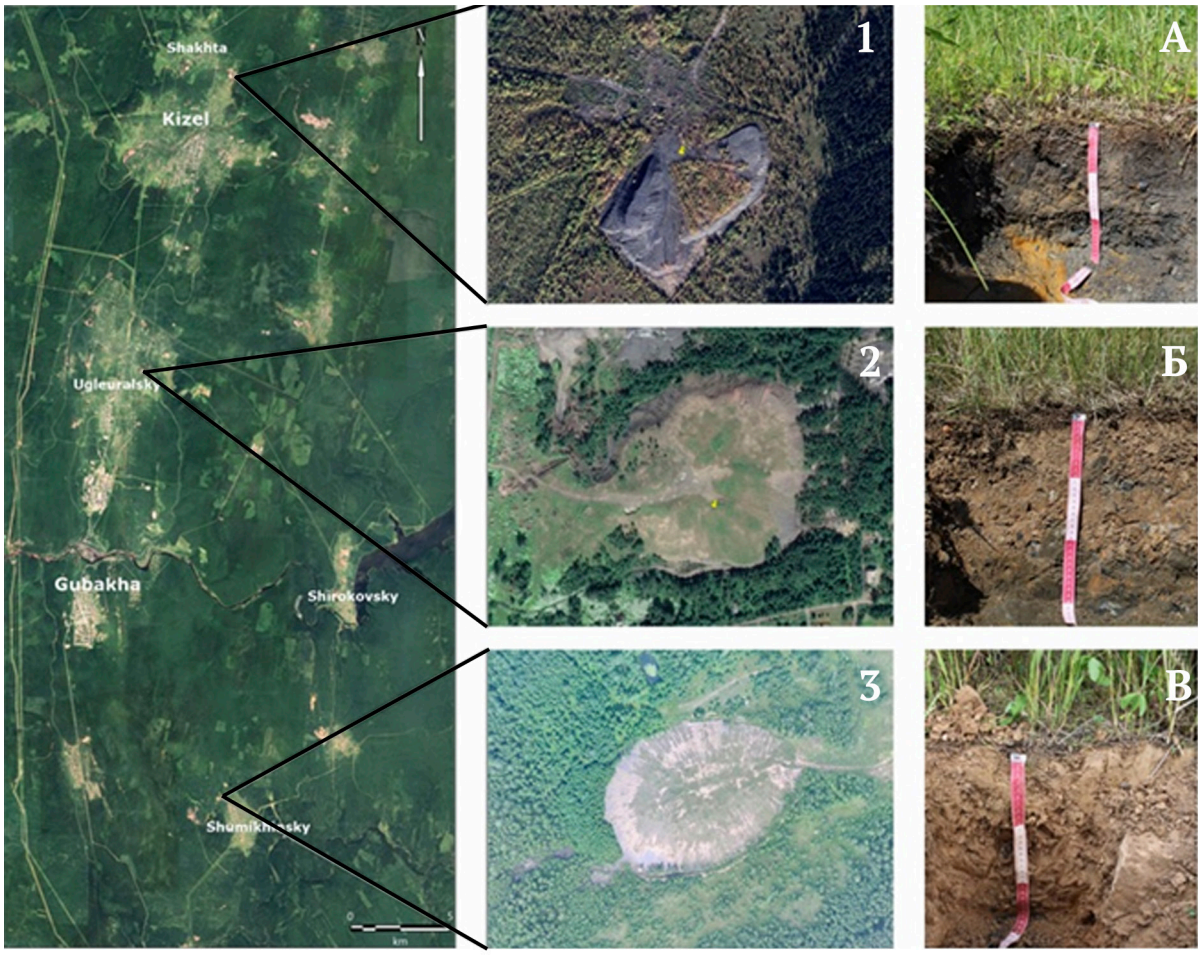


Рис. 2. Место отбора проб и профили почв:
1 – отвал шахты Северная; *А* – эмбриозем дерновый; *2* – отвал шахты Центральная; *Б* – литострат глинистый № 1; *3* – отвал шахты Гореловская; *В* – литострат глинистый № 2

Методы исследования

Актуальная и обменная кислотность в пробах почвы определена потенциометрическим методом. Гидролитическая кислотность – методом Каппена (в вытяжке 1М CH_3COONa), основанном на титровании 1 н щелочью в присутствии фенолфталеина. Обменную кислотность, обменный алюминий и обменный водород по методу Соколова, основанного на обработке почвы раствором 1М KCl, с последующим титрованием одной части щелочью для обнаружения суммы обменных алюминия и водорода, другая часть вытяжки титруется щелочью с добавлением фторида для определения ионов водорода. Определение кислотности почв в перекиси водорода проведено для окисления сульфидных минералов, присутствующих в отвалах; pH с перекисью ниже 2,5 указывает на наличие сульфидных минералов.

Содержание органического вещества определено спектрофотометрическим методом по ГОСТ 26213–91, емкость катионного обмена (ЕКО) по методу Бобко-Аскинази-Алешина (ГОСТ 17.4.4.01–84), содержание обменного кальция и обменного (подвижного) магния определяли комплексонометрическим титрованием по ГОСТ 26487–85; содержание подвижной серы определяли турбидиметрическим методом по ГОСТ 26490–85, подвижное железо – спектрофотометрическим методом с о-фенантролином по ГОСТ 27395–87; сульфат ионы – турбидиметрическим методом по ГОСТ 26426–85. Подвижные фосфаты и калий определены методом Кирсанова, основанном на экстракции подвижных фосфатов и калия из почвы 0,2М раствором HCl. Далее определяли подвижные фосфаты в виде синего фосфорно-молибденового комплекса на фотоэлектроколориметре, подвижный калий – на пламенном фотометре. Содержание подвижного калия и фосфатов в почвах отвалов оценивали по критериям, описанным в работе [27].

Биологическая активность почв исследована по патенту[1]. Фитотестирование верхних слоев почв отвалов (0–10 см) проводили с использованием кресс-салата и овса. Кресс-салат выращивали на почвах отвалов и на фоновой почве в течение 7 дней, овес – в течение 10 дней. Высота и масса растений измерялась в 25-кратной повторности. Снижение показателей кресс-салата на 10–30 % свидетельствует об удовлетворительном состоянии почвы, на 30–50 % – о неудовлетворительном, при снижении более 50 % – об экологически опасном состоянии. В качестве контроля использовали растения, выращенные на вермикулите с питательным раствором Кнопа (1 г/л $Ca(NO_3)_2$, 0,25 г/л KH_2PO_4, 0,25 г/л $MgSO_4$, 0,125 г/л KCl, 0,0125 г/л $FeCl_3$).

Для расчета индекса NDVI на территории отвалов использовались снимки Sentinel-2 (литострат 2) и Landsat 7,8 (эмбриозем и литострат 1) за 2000, 2007, 2014, 2018, 2020 и 2023 гг. Необходимые космические снимки и спектральные каналы получены с помощью сервиса EOS LandViewer.

[1] Еремченко О.З., Митракова Н.В. Способ оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных почвогрунтов: патент РФ. 2017. Бюл. № 15. № 2620555.

Индекс NDVI (нормализованный относительный индекс растительности) является показателем количества активной биомассы и вычисляется как отношение разности ближней инфракрасной и красной зоны спектра к их сумме. Значения индекса NDVI варьируются в диапазоне от –1 до +1 и позволяют определить, насколько сильно развита растительность в период вегетации. Отрицательные значения индекса на практике чаще всего соответствуют водоемам, облакам или застройке. Низкие положительные значения (от 0 до 0,3) говорят либо о полном отсутствии растительности (примерно от 0 до 0,1), либо о редкой кустарниковой или луговой растительности (примерно до 0,3). Значения в диапазоне от 0,3 до 0,5 можно отнести к умеренной растительности, значения индекса от 0,5 до 1 свидетельствуют о наличии густой растительности, чаще представленной лесными насаждениями.

Отслеживание динамики индекса на территории рекультивируемых отвалов позволяет судить об успешности проведенной рекультивации.

Индекс рассчитывался с помощью инструмента Raster Calculator набора инструментов Spatial Analyst в программе ArcMap 10.4. Для полученных растров с целью улучшения визуального отображения использовался метод передискретизации кубической свертки.

Статистические показатели, такие как среднее значение и коэффициент вариации (CV), рассчитывали с использованием программного обеспечения STATISTICA 7 и MC Excel. Для статистической обработки полученных данных использовались регрессионный и корреляционный анализы с доверительной вероятностью 95 %. Образцы почвы по агрохимическим параметрам сравнивали с использованием дисперсионного непараметрического метода (критерий Краскела–Уоллиса). Значимыми различия между сравниваемыми средними значениями считались с уровнем достоверности 95 % и выше ($P<0,05$). Достоверность различий между высотой и массой растений оценена по критерию Стьюдента ($P<0,05$).

Результаты

Классификация почв и изменения растительности

Фоновые почвы района исследований – зональные дерново-подзолистые суглинистые почвы. В связи с эксплуатацией отвалов естественный почвенный покров был преобразован. В целом почвенный покров отвалов неоднороден. На отвалах образовались техногенные почвы или техногенные поверхностные образования (ТПО).

Эмбриозем дерновый идентифицировали на отвале шахты «Северная» по классификации, предложенной в [28]. В соответствии с World Reference Base for Soil Resources (WRB) данную почву можно отнести к Epileptic Technosol (Densic, Carbonic, Skeletic) (см. рис. 2, А). Почва с поверхности имеет темно-серую окраску, под дерниной слой мощностью 2 см, характеризующийся комковатой структурой, ниже залегает плотный материал вперемешку с камнями разного размера, в верхних 10 см отмечено содержание мелкозема. Растительность на шахте «Северная»

имеет проективное покрытие около 25%. Древесная растительность представлена 10–15-летними березами (*Betula*). Всего встречается 9 видов растений, в том числе иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium*), подмаренник северный (*Galium Boreal*), земляника зеленая (*Fragaria viridis*), кукушкин лен обыкновенный (*Polytrichum commune*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*), осока (*Carex*) и манжетка обыкновенная (*Alchemilla vulgaris*) (табл. 1).

По данным WRB литострат глинистый, диагностированный на отвале шахты «Центральная», классифицируется как Spolic Epileptic Technosol (Loamic, Densic, Skeletic) (см. рис. 2, Б). В литострате отсутствует выделение на горизонты или слои, обильны камни и уголь (около 40%), до глубины 10 см комковатая структура и корни травянистых растений. Почва плотная, глинистая, буровато-коричневой окраски. Растительность отвала шахты «Центральная» представлена 20 видами из семейств *Gramineae*, *Asteraceae*, *Rosaceae*, *Rubiaceae*, *Fabaceae*, *Plantainaceae*, *Cyperaceae* (см. табл. 1). Проективное покрытие составляет около 35%.

Глинистый литострат диагностирован также на отвале шахты «Гореловская». По данным WRB эту почву также можно классифицировать как Spolic Epileptic Technosol (Loamic, Densic, Skeletic) (см. рис. 2, В). Почва имеет светло-коричневую окраску, почвенные агрегаты глыбистые, гранулометрический состав глинистый. В нижней части профиля почва влажная, пластичной консистенции. На Гореловском отвале растительность представлена 19 видами. Тимофеевка луговая (*Phleum pratense*) и клевер красный (*Trifolium pratense*) являются доминирующими видами, единично встречаются растения 17 видов из семейств *Gramineae*, *Fabaceae*, *Asteraceae*, *Caryophyllaceae*, *Onagraceae*, *Ranunculaceae* и *Rubiaceae* (см. табл. 1). Проективное покрытие составляет около 50%.

Таблица 1

Список сосудистых растений на рекультивированных отвалах

Семейство	Название вида	Отвал ш. Северная	Отвал ш. Центральная	Отвал ш. Гореловская
Asteráceae	*Achilléa millefólium*	+	++	+
Rosaceae	*Alchemilla vulgaris*	+	++	–
Asteráceae	*Artemísia absínthium*	–	–	+
Asteráceae	*Artemísia vulgáris*	–	+	–
Gramíneae	*Brōmus inērmis*	–	++	–
Asteráceae	*Carduus crispus*	–	–	+
Cyperaceae	*Cárex sp*	++	+	-
Asteráceae	*Centaurea scabiosa*	–	–	+
Onagraceae	*Chamaenérion angustifolium*	+	–	+
Asteráceae	*Cichórium íntybus*	–	–	+
Asteráceae	*Cirsium arvense*	–	+	–
Gramíneae	*Dáctylis glomeráta*	–	+	–
Gramíneae	*Elytrígia répens*	+	+	–
Gramíneae	*Festuca pratensis*	–	+	–
Rosaceae	*Fragária víridis*	+	+	–
Rubiaceae	*Galium boreale*	+	+	+
Hyperiaceae	*Hypericum perforatum*	–	+	+
Fabaceae	*Lótus corniculátus*	–	+	+
Fabaceae	*Medicago falcata*	–	+	+
Fabaceae	*Medicágo satíva*	–	+	-
Fabaceae	*Melilótus officinális*	–	-	+
Gramíneae	*Phleum pratense*	–	+	+++
Asteráceae	*Picris hieracioides*	–	–	+
Gramíneae	*Poa praténsis*	–	+	+
Polytrichaceae	*Polýtrichum commúne*	+	–	–
Gramíneae	*Puccinellia distans*	–	–	+
Ranunculaceae	*Ranunculus repens*	–	–	+
Caryophylláceae	*Siléne vulgáris*	–	–	+
Asteráceae	*Tanacétum vulgáre*	–	+	+
Fabaceae	*Trifolium praténse*	н/д	н/д	+++
Plantaginaceae	*Veronica teucrium*	н/д	+	н/д
Fabaceae	*Vícia crácca*	н/д	+	н/д
Betulaceae	*Bétula péndula*	+	–20	–19

На основе спутниковых снимков Sentinel-2 и Landsat 7.8 выявлены изменения растительности с помощью индекса NDVI (рис. 3–5). Сукцессию на угольных отвалах рассматривали в течение нескольких временных периодов: начальный период (отвал без изменений), несколько лет после рекультивации и 2023 г.

Для отвала шахты «Северная» рассмотрены четыре периода наблюдений (см. рис. 3): исходное состояние отвала, два года после рекультивации, семь лет после рекультивации и современное состояние. Индекс NDVI на территории отвала шахты «Северная» в июне 2000 г. (до рекультивации) составлял около 0,3. После проведения рекультивации индекс NDVI увеличился до 0,5–0,6, что свидетельствует о появлении устойчивого растительного покрова.

В июне 2014 г. (до рекультивации) индекс NDVI практически для всех участков отвала шахты «Центральная» колебался от 0,1 до 0,3, что свидетельствует об отсутствии какой-либо растительности (см. рис. 4). В течение 9 лет большую часть площади отвала заняла кустарниковая растительность, о чём говорит значение индекса NDVI в районе 0,4.

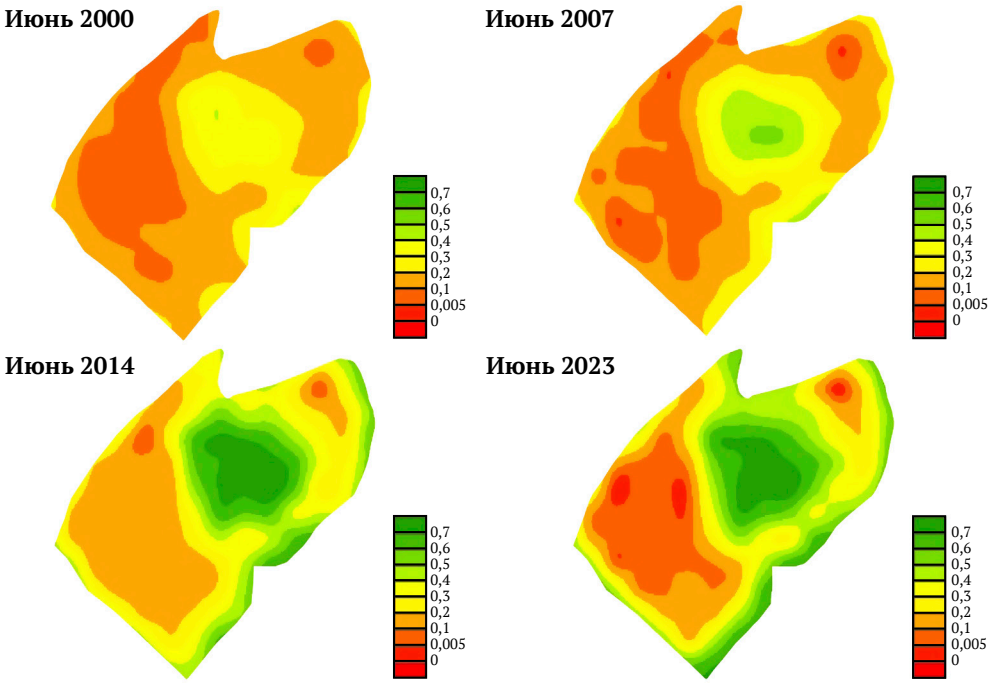


Рис. 3. Индекс NDVI для отвала шахты «Северная»

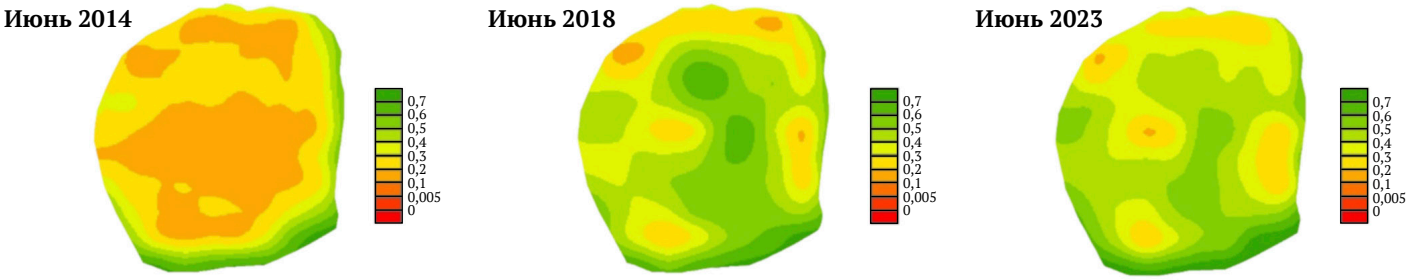


Рис. 4. Индекс NDVI для отвала шахты «Центральная»

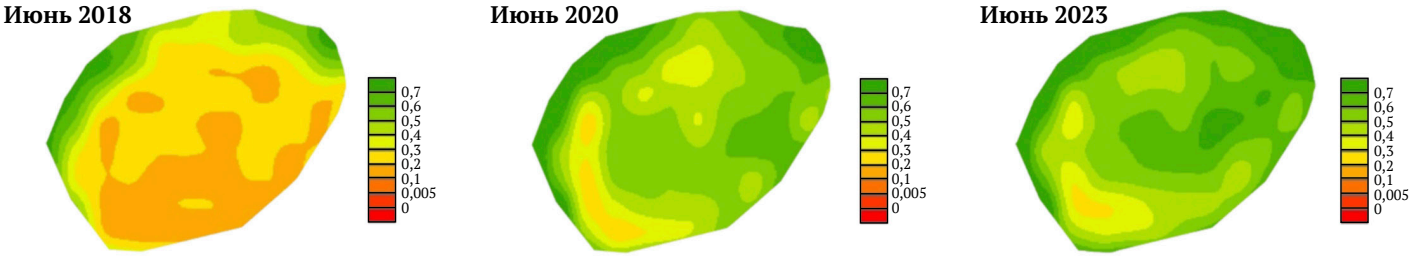


Рис. 5. Индекс NDVI для отвала шахты «Гореловская»

На отвале шахты «Гореловская» в течение 5 лет после рекультивации наблюдался рост значений индекса NDVI от 0,1–0,3 до 0,4–0,55 и выше 0,6 на отдельных участках (см. рис. 5). Динамика индекса NDVI по всем трем отвалам свидетельствует об успешности рекультивации и возникновения устойчивого растительного покрова.

Химические свойства почвы

Поверхностные слои литострата 1 и эмбриозема характеризуются нейтральной реакцией, pH–H_2O составило 6,8 и 7,9 соответственно; pH–KCl = 4,4 в литострате 1 и 5,5 в эмбриоземе (табл. 2). С глубины 20 см они становятся слабокислыми, при этом pH–H_2O снижается до 3,3 в литострате 1 и до 5,0 в эмбриоземе. Поверхностный слой литострата 2 имеет слабокислую реакцию (pH–H_2O = 6,1, pH–KCl = 4,1), кислотность увеличивается с глубиной до значений pH–H_2O = 4,5 (см. табл. 1). Нижние слои литострата 1 содержат сульфидные минералы, на что указывает pH с перекисью водорода (pH–H_2O_2 = 1,98) (см. табл. 2). Это объясняется перемешиванием нижнего слоя почвенного материала и верхнего слоя отвала в результате физической и химической миграции вещества.

Для литострата 2 характерна наибольшая обменная кислотность из всех почв отвалов, она обусловлена тем, что почва образована из срединных горизонтов местных глинистых почв. Гидролитическая кислотность литострата 1 и эмбриозема значительно ниже, чем у фоновой (см. табл. 2). Это связано с тем, что почвы отвалов нейтральные и слабощелочные. Результаты теста Краскела–Уоллиса показали, что кислотность эмбриозема отличается от кислотности фоновой почвы и литостратов.

Содержание подвижного железа в почвах отвалов в 1,5–2 раза ниже, чем в фоновой почве (см. табл. 2). В водных вытяжках почв преобладают сульфат-ионы, их содержание максимально в литострате 1. Увеличение содержания подвижной серы в литостратах с глубиной связано с наличием вскрышных пород отвала на глубине 20–30 см. Содержание подвижной серы в эмбриоземе снижается с глубиной, тогда как в литостратах увеличивается.

Содержание органического вещества варьирует в зависимости от почвы и слоев (табл. 3). Наибольшее содержание органического вещества характерно для эмбриозема. Обилие угля в нижнем слое литострата 1 обуславливает высокое содержание органического вещества, в вышележащих слоях литострата 1 содержание органического вещества в 2–3 раза ниже. По сравнению с литостратом 1 и эмбриоземом литострат 2 имеет самое низкое содержание органического вещества.

Емкость катионного обмена в почвах в целом средняя, с максимальными значениями в верхнем 10-сантиметровом слое. Поглотительная способность фоновой почвы несколько ниже, что, по-видимому, связано с обменными катионами кальция и магния. Содержание обменного кальция в почвах отвалов достоверно не отличается и снижается с глубиной.

Содержание фосфатов в почвах отвалов ниже фонового уровня и классифицируется как «низкое» по шкале Кирсанова (см. табл. 3). Содержание калия подвижного максимально в литострате 1 и минимально в эмбриоземе. Содержание питательных веществ в почве зависит от времени почвообразования и растительности. На отвале шахты Центральная на литострате 1 обнаружено наибольшее разнообразное видов травянистых растений, которые могут обеспечивать наибольшее количество питательных веществ. Все почвы имеют одинаковое содержание азота, за исключением литострата 2.

Верхние слои почв отвалов обладают более благоприятными свойствами для тест-культур, чем фоновая почва (рис. 6). При этом кресс-салат, выращенный на литострате 1 и эмбриоземе, показал лучшие результаты по высоте и массе по сравнению с контролем, выращенным на вермикулите.

Таблица 2

Химические свойства почв

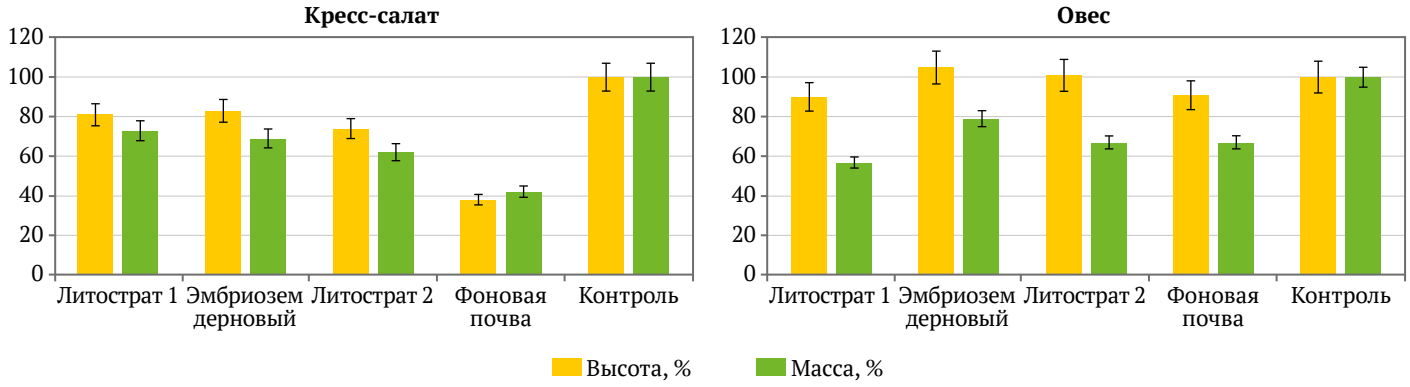
Параметры	Глубина, см	pH–H_2O	pH–H_2O_2	pH–KCl	$H_{гк}$*	ОК** (Al^{3+}+ H^+)	Al_{exch}	Fe_{mobile}	S_{mobile}	SO_4^{2-}
					ммоль/100 г			мг/кг		
Эмбриозем дерновый	0–10	7,9	5,47	6,9	1,2	0	0,05	90	211,0	384,0
	10–20	7,4	5,41	6,3	1,2	0	0,05	220	163,0	480,0
	20–30	5,0	3,83	4,3	2,5	0,06	0,05	110	53,6	480,0
Литострат 1	0–10	6,8	4,41	5,3	3,9	0,08	0,05	250	17,0	312,0
	10–20	6,1	4,04	4,7	4,7	0,07	0,05	200	109,0	288,0
	20–30	3,3	1,97	2,6	16,3	2,33	3,98	260	253,0	816,0
Литострат 2	0–10	6,1	4,10	4,0	4,2	0,60	0,35	70	5,19	168,0
	10–20	5,1	3,80	3,7	15,2	8,40	9,37	110	20,8	240,0
	20–30	4,5	3,30	3,5	21,3	13,60	14,75	250	93,8	230,0
Фоновая дерново-подзолистая почва	0–10	4,5	3,71	3,5	26,4	5,00	43,00	430	12,90	240,0
	10–20	4,6	3,88	3,5	21,4	5,90	52,00	430	4,60	240,0
	20–30	4,7	4,05	3,6	20,8	5,90	52,00	360	0,20	240,0

Примечание: * $H_{гк}$ – гидролитическая кислотность, ** ОК – обменная кислотность.

Таблица 3

Агрохимические свойства почв

Параметры	Глубина, см	Органическое вещество	$Ca_{обменный}$	$Mg_{обменный}$	ЕКО	$K_{подвиж}$	$P_2O_{5подвиж}$	$N_{общий}$
		%	ммоль/100 г			мг/100 г		
Эмбриозем дерновый	0–10	12,1	5,75	0,56	37,0	7,0	2,5	311
	10–20	7,7	6,06	0,56	22,0	7,2	0,7	143
	20–30	9,2	4,25	1,00	19,0	2,8	0,09	70
Литострат 1	0–10	2,43	10,00	1,25	23,0	20,5	2,2	166
	10–20	3,11	7,60	1,13	24,0	10,4	3,1	93
	20–30	8,90	1,75	0,50	27,0	5,3	0,09	143
Литострат 2	0–10	1,04	16,75	6,25	27,0	10,4	3,0	47
	10–20	0,81	5,62	3,62	24,0	10,8	1,9	48
	20–30	1,01	4,75	1,12	28,0	12,0	3,0	49
Фоновая дерново-подзолистая почва	0–10	5,04	3,25	1,25	13,0	15,4	29,7	187
	10–20	5,07	2,25	1,00	21,0	10,7	22,6	240
	20–30	6,10	2,75	1,25	19,0	8,8	7,5	228



а *б*

Рис. 6. Фитотестирование верхних слоев почв

Овес, выращенный на вермикулите (контроль), имел такую же высоту, как и растения, выращенные на почвах отвалов (рис. 6, *б*). Однако масса растений овса, выращенных на контроле, достоверно превышала массу растений, выращенных на почвах отвалов и фоновой почве.

Обсуждение

Литостраты образовались в результате покрытия выположенной вершины угольного отвала слоем глинистого материала, который, судя по всему, представлен нижними горизонтами или материнской породой местных почв. Об этом свидетельствует схожий гранулометрический и агрегатный состав. На почвенных агрегатах (педах) наблюдается железистая пленка на глубине до 20 см. Глубина профиля литостратов около 30–40 см, что обусловлено мощностью отсыпки глины, крутизной склона отвала и степенью измельченности вскрышной породы отвала.

Разницу в кислотности между литостратами можно объяснить тем, что рекультивация литострата 2 завершилась на несколько лет позже и на отвале шахты «Центральная» остался строительный мусор от прежних объектов горного хозяйства, что потенциально может привести к нейтрализации литострата 1. Однако сильная кислотность нижнего слоя литострата 1 обусловлена наличием сульфидов во вскрышных породах отвала.

Эмбриозем образовался на измельченных вскрышных породах предварительно разровненного угольного отвала. Для создания благоприятных условий для роста растений в поверхностный слой отвала добавляли гашеную известь, поэтому почва слабощелочная. Использование извести при рекультивации отвалов является достаточно распространенной практикой, как и использование активного ила в качестве плодородного слоя.

Так, совместное использование свекловичной извести и компостированных биологических веществ помогло нейтрализовать активную и обменную кислотность в почвах и улучшить плодородие почвы на территории медного рудника [15]. На биологическом этапе рекультивации шахты «Капитальная» (Кузнецкий угольный бассейн) в качестве плодородного слоя использовали ил городских очистных сооружений [29].

В почвах отвалов КУБа происходят первичные почвообразовательные процессы. Растительный покров, корни растений, ежегодное образование отмерших растительных остатков способствуют разрыхлению верхнего слоя почвы и накоплению органического вещества.

Подобные типы техногенных почв формируются и в других регионах в сходных условиях – угледобыче, климате и растительности [3, 30, 31]. Техногенные почвы отвалов являются педогенно незрелыми почвами. Они наследуют отрицательные физико-химические свойства отвалов угольных шахт [32], а также содержат большое количество артефактов.

Относительно высокая подвижность железа в фоновой почве по сравнению с почвами отвалов может быть обусловлена кислотностью и высоким содержанием гидроксидов железа в глинистых минералах дерново-подзолистой почвы [33, 34].

Низкое содержание органического вещества в литострате 2 обусловлено отсутствием внесения удобрений при рекультивации. Также его органогенный слой не успел сформироваться из-за незрелости фитоценоза. В литострате 1 высокое содержание органического вещества потенциально можно объяснить наличием угольных включений по всему профилю, а также устойчивым травянистым сообществом. Присутствием частиц угля во вскрышных породах [35] можно объяснить высокое содержание органического вещества в эмбриоземе (7,7–12,1 %) и в нижнем слое литострата 1 (8,9 %).

Количество общего азота и подвижного калия возрастает с увеличением возраста литострата, что подтверждается в [36, 37]. В целом содержание общего азота в литостратах значительно ниже, чем в фоновой дерново-подзолистой почве и эмбриоземе.

Коэффициент вариации (КВ) объясняется влиянием техногенно-антропогенных процессов на почвообразование. Следует отметить, что коэффициент вариации для обменной кислотности, органического вещества, общего железа и подвижной серы в литостратах превышает 40 %. Для эмбриозема диапазон КВ перечисленных показателей значительно ниже. Это связано с однородностью почвообразующего материала эмбриозема, тогда как литостраты – это слой глины, перемешанный с верхним слоем отвала. В результате свойства нижних слоев литостратов не соответствуют ни качествам вскрышной породы, ни глинистому материалу. Коэффициент вариации практически для всех химических показателей фоновой почвы не превышает 25 %, за исключением содержания подвижной серы, где КВ = 110 %, что соответствует значениям коэффициента вариации для подвижной серы в литостратах и эмбриоземе.

Корреляционный анализ выявил прямую и достоверную связь между гидролитической кислотностью, содержанием обменного алюминия и подвижного железа. Источниками железа в исследованных техногенных почвах являются минералы зональных почв и вскрышные породы отвалов. Количество подвижных фосфатов пропорционально вышеуказанным показателям. Это может быть связано со способностью фосфатов образовывать комплексы с алюминием и железом в кислых условиях. В то же время была обнаружена отрицательная корреляция между поглотительной способностью и подвижным железом.

По ростовым показателям овса наилучшее биологическое состояние показал эмбриозем, поскольку он имеет нейтральную реакцию и характеризуется высоким содержанием органического вещества.

Рекультивация угольных отвалов путем создания глинистого экрана или внесения удобрений для стимулирования роста травянистой или древесной растительности имеет решающее значение для предотвращения водной и ветровой эрозии, а также распространения загрязняющих веществ. Это также важно для формирования устойчивых растительных сообществ. Химические свойства техногенных почв существенно различаются по профилю по сравнению с фоновой почвой на исследуемой территории и между собой.

Рекультивационные мероприятия на отвале шахты «Северная», проведённые 25 лет назад, привели к возникновению к настоящему времени эмбриозема дернового, при этом эволюция почвы продолжается. Рекультивация с добавлением гашеной извести обеспечила снижение кислотности до нейтрального уровня, а также высокое содержание органических веществ и поглотительной способности. Поскольку на образовавшихся почвах сложилось устойчивое травянисто-древесное растительное сообщество, этот метод рекультивации можно считать эффективным. Модификация питательной среды путем добавления золы, шлака и осадка сточных вод была изучена на угольных отвалах Бразилии, и этот метод также показал многообещающие результаты при выращивании овса щетинистого (*Avena strigosa*) и кукурузы (*Zea mays*) [38].

Засыпка отвалов глинистым материалом нейтрализует сульфидные минералы вскрышных пород вследствие создания экрана, предотвращающего контакт воды и кислорода с минералами, и образования кислых шахтных вод. Изученные литостраты формировались одинаково, но различались по возрасту. Оценить эффективность рекультивации путем засыпки отвала глиной можно, учитывая первичное состояние грунта отвала (литострат 2) и более зрелого грунта (литострат 1). Число видов растений в растительном сообществе со временем увеличивается. Многовидовое травянистое сообщество способствует накоплению органического вещества в верхнем слое почвы и образованию почвенных агрегатов, что улучшает физические свойства отвальных почв, снижает кислотность и увеличивает содержание NPK.

В работе [39] почвы сравнивались через 5, 10 и 25 лет после добычи. В почвах деградированных земель угольных шахт запасы углерода и азота увеличивались с возрастом рекультивации. Это также может быть связано с попаданием органических веществ из отвалов. Физические свойства почвы со временем улучшились. В почве старого отвала преобладала мелкая фракция. В [18] авторы обнаружили увеличение биоразнообразия растений на давно освоенных территориях. В [17] исследователи отметили благотворное

влияние травянистых растений на физико-химические свойства почв при рекультивации горнодобывающих территорий. Такие свойства почв рекультивированных отвалов, как содержание органического вещества, содержание азота и фосфора, улучшались со временем после проведенной рекультивации [40].

В целом рост растений на сульфидных угольных отвалах после рекультивации предотвращает ветровую и водную эрозию, самовозгорание и распространение загрязняющих веществ [41]. По результатам сравнения литостратов разного возраста в образовавшуюся почву при рекультивации необходимо вносить органические и минеральные удобрения. Применение агромелиоративных мероприятий (формирование почвенного слоя для роста растений, внесение удобрений, посадка травянистых культур) способствует достижению наилучших результатов [42].

Выводы

На исследованных рекультивированных отвалах Кизеловского угольного бассейна выявлены различные типы почв. Классификация основана на реализованных рекультивационных мероприятиях и техногенных почвообразующих породах. Глинистые литостраты, или Spolic Epileptic Technosol (Loamic, Densic, Skeletic), выявлены на отвалах, рекультивированных путем выравнивания поверхности и засыпки глинистым материалом. Эмбриозем, Epileptic Technosol (Densic, Carbonic, Skeletic), образовался после выравнивания угольного отвала и внесения извести в верхний слой за почти 25-летний период.

Отсутствие горизонтов и четко выраженной структуры почвенных агрегатов, а также большое количество артефактов (обломков вскрышных пород разного размера) в почвах, образовавшихся на угольных отвалах, являются показателями их техногенной природы и молодого возраста.

Уровень кислотности литостратов колебался от кислого до нейтрального, причем чем дольше проходило время после рекультивации, тем ниже становились показатели гидролитической кислотности. Эмбриозем имеет слабощелочную реакцию, обменная кислотность отсутствует. Статистический анализ показал отсутствие различий между $pH_{вод}$ и $pH_{сол}$ литостратов и фоновой почвы, однако уровень обменной кислотности литострата 1 ниже, чем в фоновой почве и литострате 2.

Поскольку эмбриозем образовался из измельченных вскрышных пород угольных отвалов, содержание органического вещества в нем максимально. Количество органического вещества в литострате 1 превышает количество органического вещества в литострате 2, что связано с наличием угольных включений по всему профилю.

Травянистая растительность способствует формированию структуры почвы, накоплению органического вещества, обменных ионов кальция и магния и, как следствие, снижению кислотности. Содержание питательных элементов (NPK) также зависит от времени формирования почвы и разнообразия видов растений. Фитотестирование почв с использованием кресс-салата и овса показало, что почвы отвалов имеют более благоприятные экологические условия для роста растений, чем фоновая почва.

В целом рекультивация ускоряет формирование почв и устойчивых растительных сообществ на отвалах и сводит к минимуму поступление загрязняющих веществ в другие природные компоненты. Согласно индексу NDVI уже через два года после рекультивации на сульфидном отвале наблюдается устойчивая травянистая растительность. В рекультивационный период необходимо проводить такие мелиоративные мероприятия, как вспашка и внесение органических и минеральных удобрений, для создания наилучших условий для растительных сообществ.

Список литературы / References

1. Tichavsky R., Lenart J., Fabiánová A., Tolasz R. Tree-ring records of surface displacements in a coal-mining subsided region and their links to hypsometric changes and extreme precipitation. *Catena*. 2023;221(Part A):106758. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106758
2. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Мухина А.С., Мосейкин В.В. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы восстановления нарушенных земель при отвалообразовании на открытой угледобыче в Кузбассе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5):5–24. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_5
   Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Mukhina A.S., Moseykin V.V. Geological, geotechnical and geoecological problems of reclamation of land disturbed by dumping in open pit coal mining in Kuzbass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5):5–24. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_5
3. Bragina P.S., Tsibart A.S., Zavadskaya M.P., Sharapova A.V. Soils on overburden dumps in the forest_steppe and mountain taiga zones of the Kuzbass. *Eurasian Soil Science*. 2014;(47):723–733. https://doi.org/10.1134/S1064229314050032
4. Nádudvari A., Kozielska B., Abramowicz A. et al. Heavy metal- and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *Journal of Hazardous Materials*. 2021;(412):125244. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125244
5. Tozsin G. Hazardous elements in soil and coal from the Oltu coal mine district, Turkey. *International Journal of Coal Geology*. 2014;(131):1–6. https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.05.011
6. Shan Y., Wang W., Qin Y., Gao L. Multivariate analysis of trace elements leaching from coal and host rock. *Groundwater for Sustainable Development*. 2019;8:402–412. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.01.001

7. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. *Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2018. 288 с.
Maksimovich N.G., Pyankov S.V. *The Kizel Coal Basin: ecological problems and solutions*. Perm: Perm State National Research University; 2018. 288 p. (In Russ.)
8. Ushakova E., Menshikova E., Blinov S. et al. environmental assessment impact of acid mine drainage from Kizel coal basin on the Kosva Bay of the Kama Reservoir (Perm Krai, Russia). *Water*. 2022;14(5):727. https://doi.org/10.3390/w14050727
9. Ushakova E., Menshikova E., Blinov S. et al. Distribution of trace elements, rare earth elements and ecotoxicity in sediments of the Kosva bay, Perm region (Russia). *Journal of Ecological Engineering*. 2022;23(4):1–16. https://doi.org/10.12911/22998993/146269
10. Yang J., Wei H., Quan Z. et al. A global meta-analysis of coal mining studies provides insights into the hydrologic cycle at watershed scale. *Journal of Hydrology*. 2023;617(Part B):129023. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129023
11. Имайкин А.К., Имайкин К.К. *Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2013. 112 с.
Imaykin A.K., Imaykin K.K. *Hydrogeological conditions of the Kizelovsky coal basin during and after the end of its operation, forecast of their changes*. Perm: Perm State National Research University; 2013. 112 p. (In Russ.)
12. Singh K.N., Narzary D. Geochemical characterization of mine overburden strata for strategic overburden-spoil management in an opencast coal mine. *Environmental Challenges*. 2021;(3):100060. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100060
13. Welch C., Barbour S.L., Hendry M.J. The geochemistry and hydrology of coal waste rock dumps: A systematic global review. *Science of the Total Environment*. 2021;(795):148798. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148798
14. Jiao Y., Zhang C., Su P. et al. A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023;(170):1240–1260. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.083
15. Fernández-Caliani J.C., Giráldez M.I., Waken W.H. et al. Soil quality changes in an Iberian pyrite mine site 15 years after land reclamation. *Catena*. 2021;(206):105538. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105538
16. Ahirwal J., Maiti S.K. Development of Technosol properties and recovery of carbon stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India. *Catena*. 2018;(166):114–123. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.026
17. Li Y., Zhou W., Jing M. et al. Changes in reconstructed soil physicochemical properties in an opencast mine dump in the Loess Plateau Area of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;19(2):706. https://doi.org/10.3390/ijerph19020706
18. Arshi A. Reclamation of coalmine overburden dump through environmental friendly method. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2017;24(2):371–378. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.09.009
19. Rahmonov O., Czajka A., Nádudvari Á. et al. Soil and vegetation development on coal-waste dump in Southern Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022:(19):9167. https://doi.org/10.3390/ijerph19159167
20. Lei H., Peng Z., Yigang H., Yang Z. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines. *Ecological Engineering*. 2016:(94):638–646. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.108
21. Feng Y., Wang J., Bai Z. Reading Lucy Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. *Earth-Science Reviews*. 2019;(191):12–25. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015
22. Guan Y., Wang J., Zhou W. et al. Identification of land reclamation stages based on succession characteristics of rehabilitated vegetation in the Pingshuo opencast coal mine. *Journal of Environmental Management*. 2022;(305):114352. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114352
23. Pyankov S.V., Maximovich N.G., Khayrulina E.A. et al. Monitoring acid mine drainage's effects on surface water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images. *Mine Water and the Environment*. 2021;(40):606–621. https://doi.org/10.1007/s10230-021-00761-7
24. Каракульева А.А., Кондратьева М.А. Свойства эмбриоземов угольных отвалов кизеловского бассейна. *Антропогенная трансформация природной среды*. 2018;(4):156–159.
Karakulieva A.A., Kondrateva M.A. Properties of embryoses of coal mines dumps of the Kizelovsky Basin. Anthropogenic Transformation of Nature. 2018;(4):156–159. (In Russ.)
25. Бердинских С.Ю., Боталов В.С., Романов А.В., Зайцев А.Г. Агрохимическая характеристика верхнего слоя грунта на угольных терриконах и влияние глинования на их естественное заращивание (на примере Кизеловского угольного бассейна). В: *Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформация природной среды. Сборник материалов всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2022. С. 437–441.
Berdinskikh S.Yu., Botalov V.S., Romanov A.V., Zaytsev A.G. Agrochemical characteristics of the top layer of soil on coal waste heaps and the effect of claying on their natural overgrowth on the example of the

Kizelovsky Coal Basin. In: *Ecological Safety in the Conditions of Anthropogenic Transformation of the Natural Environment. Collection of papers of the All-Russian School-Seminar Dedicated to the Memory of N. F. Reimers and F. R. Shtilmark*. Perm: Perm State National Research University; 2022. Pp. 437–441. (In Russ.)

26. Menshikova E., Osovetsky B., Blinov S., Belkin P. Mineral formation under the influence of mine waters (the Kizel Coal Basin, Russia). *Minerals*. 2020;10(4):364. https://doi.org/10.3390/min10040364
27. Мотузова Г.В., Безуглова О.С. *Экологический мониторинг почв*. М.: Академический проект, Гаудеамус; 2007.
Motuzova G.V., Bezuglova O.S. *Ecological monitoring of soils*. Moscow: Academic Project, Gaudeamus; 2007. (In Russ.)
28. Андроханов В.А. Специфика и генезис почвенного покрова техногенных ландшафтов. *Сибирский экологический журнал*. 2005;(5):795–800.
Androkhanov V.A. Specificity and genesis of the soil cover of man-made landscapes. *Siberian Journal of Forest Science*. 2005;(5):795–800. (In Russ.)
29. Некрасова А.Е., Бобренко Е.Г., Кныш А.И., Сологаев В.И. Рекультивация породного отвала ОАО «Шахта «Капитальная» Кемеровской области. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2016;(1):154–160.
Nekrasova A.E., Bobrenko E.G., Knych A.I., Sologaev V.I. Reclamation of waste dump open joint-stock company "Mine "Capital" of the Kemerovo Region. *Vestnik of Omsk SAU*. 2016;(1):154–160. (In Russ.)
30. Uzarowicz Ł., Zagórski Z., Mendak E. et al. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part I. Properties, classification, and indicators of early pedogenesis. *Catena*. 2017;(157):75–89. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.010
31. Krupskaya L.T., Androkhanov V.A., Belanov I.P. Technogenic surface formations within the limits of mining-industrial system of the Dalnegorsky District of the Primorsky Krai as the reclamation site. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;459:032046. https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/3/032046
32. Filcheva E., Hristova M., Haigh M. et al. Soil organic matter and microbiological development of technosols in the South Wales Coalfield. *Catena*. 2021;(201):105203. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105203
33. Козлова А.А., Халбаев В.Л., Айсуева Т.С. и др. Содержание различных форм железа в почвах Южного Предбайкалья. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014;(5):56–61.
Kozlova A.A., Khalbaev V.L., Aysueva T.S. et al. Contents of different forms of iron in the soils of Southern Predbaikal'ye. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2014;(5):56–61. (In Russ.)
34. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М. и др. Изучение динамики изменения содержания подвижного железа в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой доломитом. *Агрохимия*. 2019;(3):44–53. https://doi.org/10.1134/S0002188119030098
Litvinovich A.V., Lavrishchev A.V., Bure V.M. et al. Studying the dynamics of mobile iron contentin sod-podzolic light loam soil ameliorated by dolomite. *Agrohimia*. 2019;(3):44–53. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S0002188119030098
35. Меньшикова Е.А. Подходы к оценке техногенной формации горнопромышленных территорий. *Геология и полезные ископаемые Западного Урала*. 2020;(3):277–281.
Menshikova E.A. Technogenical formation of mining areas in the Perm region. *Geology and mineral resources of Western Urals*. 2020;(3):277–281. (In Russ.)
36. Li X., Lei S., Liu F., Wang W. Analysis of plant and soil restoration process and degree of refuse dumps in open-pit coal mining areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(6):1975. https://doi.org/10.3390/ijerph17061975
37. Zhang N., Huang S., Lei H. et al. Changes in soil quality over time focusing on organic acid content in restoration areas following coal mining. *Catena*. 2022;(218):106567. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106567
38. Firpo B.A., Weiler J., Schneider I.A.H. Technosol made from coal waste as a strategy to plant growth and environmental control. *Energy Geoscience*. 2021;2(2):160–166. https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.09.006
39. Bandyopadhyay S., Novo L.A.B., Pietrzykowski M., Maiti S.K. Assessment of forest ecosystem development in coal mine degraded land by using Integrated Mine Soil Quality Index (IMSQI): the evidence from India. *Forests*. 2020;11(12):1310. https://doi.org/10.3390/f11121310
40. Liu X., Bai Z., Zhou W. et al. Changes in soil properties in the soil profile after mining and reclamation in an opencast coal mine on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*. 2017;(98):228–239. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.078
41. Zheng S., Bai D.-S., Yang X. et al. Changes in soil microecology of gangue reclamation areas after 10 years of in situ restoration with herbaceous plants (Artemisia sacrorum and Imperata cylindrica) and trees (Populus spp.). *Ecological Engineering*. 2022;182:106719. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106719
42. Xu D., Li X., Chen J., Li J. Research progress of soil and vegetation restoration technology in open-pit coal mine: a review. *Agriculture*. 2023;13(2):226. https://doi.org/10.3390/agriculture13020226

Информация об авторах

Наталья Васильевна Митракова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-5571-7725, Scopus ID 57208284684, ResearcherID ABC-8334-2021; e-mail mitrakovanatalya@mail.ru

Елена Александровна Хайрулина – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, профессор кафедры картографии и геоинформатики, географический факультет, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-9074-8551, Scopus ID 56029238900, ResearcherID J-8411-2014; e-mail elenakhay@gmail.com

Анна Александровна Перевощикова – младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-1769-7740, Scopus ID 57694899800; e-mail aaperevoshchikova@yandex.ru

Наталья Витальевна Порошина – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-1761-6720, Scopus ID 57694163400; e-mail navit1@yandex.ru

Елизавета Евгеньевна Малышкина – инженер-исследователь лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-7251-7637, Scopus ID 58017742100; e-mail thelionofcintra@gmail.com

Евгения Симоновна Яковлева – инженер-исследователь лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0009-0005-5344-7361; e-mail evyakovlevaa@gmail.com

Никита Алексеевич Кобелев – инженер-исследователь лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0009-0007-3129-5568; e-mail amst3rz@gmail.com

Information about the authors

Natalya V. Mitrakova – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0002-5571-7725, Scopus ID 57208284684, ResearcherID ABC-8334-2021; e-mail mitrakovanatalya@mail.ru

Elena A. Khayrulina – Dr. Sci. (Geograph.), Leading Researcher at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Professor of the Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0002-9074-8551, Scopus ID 56029238900, ResearcherID J-8411-2014; e-mail elenakhay@gmail.com

Anna A. Perevoshchikova – Junior Researcher at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0003-1769-7740, Scopus ID 57694899800; e-mail aaperevoshchikova@yandex.ru

Natalya V. Poroshina – Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0002-1761-6720, Scopus ID 57694163400; e-mail navit1@yandex.ru

Elizaveta E. Malyshkina – Research Engineer at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0002-7251-7637, Scopus ID 58017742100; e-mail thelionofcintra@gmail.com

Evgenia S. Yakovleva – Research Engineer at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID 0009-0005-5344-7361; e-mail evyakovlevaa@gmail.com

Nikita A. Kobelev – Research Engineer at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID 0009-0007-3129-5568; e-mail amst3rz@gmail.com

Поступила в редакцию	13.04.2024	**Received**	13.04.2024
Поступила после рецензирования	08.06.2024	**Revised**	08.06.2024
Принята к публикации	22.06.2024	**Accepted**	22.06.2024

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-175
УДК 622.734:658.58

Вибрационные показатели для информационного обеспечения оценки технического состояния шаровых мельниц

В.Ф. Борисенко[1], В.А. Сидоров[1] ✉, А.Е. Сушко[2], В.Н. Рыбаков[3]

[1] *Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация*

[2] *ООО НПО «ДИАТЕХ», г. Москва, Российская Федерация*

[3] *ООО НПП «ПромТЭК» г. Самара, Российская Федерация*

✉ *sidorov_va58@mail.ru*

Аннотация

Техническое состояние шаровых мельниц, используемых в процессе подготовки минералов, руд, угля, цементного клинкера и др. для тонкого измельчения материалов, определяется технологической нагрузкой и фактическим состоянием. Вибрационные показатели в данном случае являются наиболее универсальным диагностическим показателем при формировании информационной картины работающего оборудования. Уникальность условий эксплуатации мощных агрегатов шаровых мельниц с регулированием частоты вращения на базе систем ПЧ – АД (преобразователь частоты – асинхронный двигатель), ПЧ – СД (преобразователь частоты – синхронный двигатель) требует разработки универсальных подходов к оценке вибрационной нагруженности с учётом индивидуальных конструкторских особенностей и режимов работы. В статье впервые выполнен анализ основных взаимосвязанных технических характеристик промышленных шаровых мельниц: объём барабана, диаметр, частота вращения, шаровая нагрузка, общий вес, мощность привода, что позволит более обоснованно подойти к выбору технических параметров и режимов работы. Установка стационарной системы вибрационного контроля на шаровых мельницах размола минерального сырья потребовала индивидуального определения границ категорий технического состояния отдельно для двигателя, вал-шестерни и барабана. Границы категорий определялись индивидуально для каждого вала методом статистической классификации в предположении, что сопрягаемые узлы находятся в состоянии, формируемом энергетическим потенциалом повреждения при ступенчатом развитии. Определены «эталонные» соотношения между значениями вибрации в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Установлены характерные образы и последовательность развития повреждений по прямым спектрам виброскорости и виброускорения. При анализе временных реализаций вибрационного сигнала выделен режим биений как признак развития повреждения элементов зубчатых передач. Информативное обеспечение технического состояния шаровых мельниц в достаточной степени достигается анализом общего уровня вибрации, прямых трендов виброскорости и виброускорения, анализом временных реализаций вибрационного сигнала, длительным и краткосрочным анализом трендов. Тренды виброскорости позволяют оценить техническое состояние по стабильности работы, частоте запусков, времени ремонтов.

Ключевые слова

шаровая мельница, электропривод, электродвигатель, редуктор, конструкция, вал, подшипники, эксплуатация, работоспособность, повреждения, отказы, контроль, диагностика, вибрация, сигнал, виброанализатор, виброскорость, виброускорение, частота, амплитуда, гармоника, спектр, анализ, корреляция, прогнозирование, тренд

Для цитирования

Borisenko V.F., Sidorov V.A., Sushko A.E., Rybakov V.N. Vibration metrics for informational support in assessing the technical condition of ball mills. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):420–432. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-175

© Борисенко В. Ф., Сидоров В. А., Сушко А. Е., Рыбаков В. Н., 2024

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research article

Vibration metrics for informational support in assessing the technical condition of ball mills

V.F. Borisenko [1], V.A. Sidorov[1] ✉, A.E. Sushko[2], V.N. Rybakov [3]

[1] *Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation*

[2] *SPA DIATECH LLC, Moscow, Russian Federation*

[3] *PromTEK R&D LLC, Samara, Russian Federation*

✉ *sidorov_va58@mail.ru*

Abstract

The technical condition of ball mills, employed in the fine grinding of minerals, ores, coal, cement clinker, and other materials, is dictated by both the operational load and the actual physical state of the equipment. Vibration metrics serve as the most versatile diagnostic parameter for developing an informational profile of equipment in active use. The distinct operational environments of high-powered ball mills with frequency-controlled drive systems – one with an induction motor (FC-IM) and the other with a synchronous motor (FC-SM) – necessitate the development of universal approaches to assessing vibration loading that consider each mill's unique design features and operational modes. This study presents the first analysis of the key interrelated technical characteristics of industrial ball mills, including drum volume, diameter, rotational speed, ball load, total weight, and drive power, enabling a more substantiated approach to selecting technical parameters and operational modes. The installation of a permanent vibration control system on ball mills used for grinding mineral raw materials required the individual determination of technical condition category thresholds for the motor, gear-shaft, and drum. The category thresholds were determined individually for each shaft using statistical classification, under the assumption that coupled components are in a state influenced by the energy potential of damage during staged progression. Standard 'reference' ratios of vibration values across three mutually perpendicular directions were established. Characteristic patterns and sequences of damage progression were identified based on the direct spectra of vibration velocity and acceleration. During the analysis of vibration signal time series, a beat frequency mode was detected, indicating potential damage development within gear elements. Effective informational support for the operational condition of ball mills is achieved through the analysis of overall vibration levels, direct trends in vibration velocity and acceleration, time series of the vibration signal, and both long-term and short-term trend analyses. Vibration velocity trends provide insights into technical condition by assessing operational stability, startup frequency, and maintenance intervals.

Keywords

ball mill, electric drive, electric engine, gear unit, design, shaft, bearing, operation, operational capacity, damage, failures, control, diagnostics, vibration, signal, vibration analyzer, vibration velocity, vibration acceleration, frequency, amplitude, harmonic, spectrum, analysis, correlation, forecasting, trend analysis

For citation

Borisenko V.F., Sidorov V.A., Sushko A.E., Rybakov V.N. Vibration metrics for informational support in assessing the technical condition of ball mills. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2024;9(4):420–432. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-175

Введение

Техническое состояние шаровых мельниц, используемых в процессе подготовки минералов, руд, угля, цементного клинкера и др. для тонкого измельчения материалов до размера 0,074–0,4 мм, определяется технологической нагрузкой, фактическим состоянием, качеством технического обслуживания и ремонтов. Вибрационные показатели в данном случае являются наиболее универсальным диагностическим показателем при формировании информационной картины работающего оборудования.

Анализ публикаций

Измерение вибрации элементов шаровых мельниц в некоторых отраслях промышленности показало, что уникальность, большие габариты, низкая частота вращения и др. факторы ограничивают использование традиционных подходов, используемых при вибрационном диагностировании. Изложенные в монографии [1] вопросы вибродиагностики безусловно являются классическими, но возникают отклонения в оценке категорий технического состояния при оценке общего уровня вибрации. Появляются

некоторые особенности при анализе временных реализаций вибрационного сигнала в отличие от рассмотренных в работе [2]. Примеры спектров вибрации, приведенные в работе [3], также следует дополнить результатами, полученными при диагностировании данного оборудования. В соответствии со стандартом[1] шаровые мельницы попадают в класс III – большие машины на жёстком основании без разделения по виду привода. Стандарт[2] регламентирует нормы вибрации для машин с «номинальной скоростью от 120 до 15000 мин$^{-1}$». Некоторые общие положения, касающиеся измерений и анализа вибрации, приведенные в стандартах[3], послужили основанием для проведения данной работы, целью которой является уточнение отдельных положений вибрационного анализа при оценке состояния шаровых мельниц.

Конструкция, расчёт, условия работы шаровых мельниц активно изучаются на протяжении длительного периода как в XX, так и в XXI в. Основное внимание уделяется вопросам технологии [4], однако качество помола предполагается оценивать по вибрации стенок барабана [5]. Закономерности размола материала в шаровых мельницах [6] также могут подтверждаться вибрационными характеристиками работающей шаровой мельницы [7] на основании имитационной модели вибрации стенки мельницы. Вопросы, связанные с модернизацией приводов горизонтальных шаровых мельниц [8], показывают стремление повысить долговечность данного оборудования. Практика эксплуатации шаровых мельниц требует информации о вибрационной картине на основании экспериментальных исследований [9], а также определения диагностических признаков повреждения отдельных элементов, например зубчатых передач, с помощью цифрового двойника [10]. Проведенный краткий литературный обзор подтверждает актуальность направления вибрационного диагностирования шаровых мельниц и использования полученных результатов для информационного обеспечения оценки технического состояния, а также своевременность обсуждения полученных в результате промышленных исследований данных, определяющих вибрационную картину шаровой мельницы.

Общие положения

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам оптимизации привода, автоматизации и управления процессом измельчения[4]. Впервые выполнен анализ основных взаимосвязанных технических характеристик промышленных шаровых мельниц (рис. 1), таких как объём барабана – V_b, м^3, его диаметр – D_b, м, частота вращения – W, рад/с, шаровая нагрузка – Q_{mel}, т, общий вес – Q, т, мощность привода – P, кВт. Сравнивая корреляционные зависимости $Q = f(V_b)$ и $P = f(V_b)$, можно констатировать их подобие; для зависимостей $W = f(D_b)$ и $Q_{mel} = f(V_b)$ наблюдается обратное подобие. Установленные корреляционные зависимости для графиков:

$$Q=f(V_b)\colon y=0{,}09x^2+2{,}4252x-7{,}7403,\ R^2=0{,}8516; \quad (1)$$

$$P=f(V_b)\colon y=0{,}933x^2+8{,}5701x-34{,}735,\ R^2=0{,}91474; \quad (2)$$

$$W=f(D_b)\colon y=-13{,}14\ln x+124{,}82,\ R^2=0{,}9334; \quad (3)$$

$$Q_{mel}=f(V_b)\colon y=0{,}0548x^2+1{,}6284x-6{,}296,\ R^2=0{,}9037, \quad (4)$$

дадут возможность специалистам в области конструирования и эксплуатации более обоснованно подойти к выбору технических параметров и режимов работы действующих и планируемых к вводу шаровых мельниц.

Широкий разброс технических характеристик следует учитывать при нормировании параметров вибрации, предполагая индивидуальность или изготовление малыми сериями по специальным заказам. Длительный режим работы дробления/измельчения исходного материала позволяет использовать для привода шаровых мельниц синхронные или асинхронные двигатели. Синхронный двигатель с частотой вращения 75 об/мин, 150 об/мин для получения частоты вращения барабана 13–16 об/мин требует применения одноступенчатого редуктора с передаточным отношением 5,4–9,0 и венцом барабана в виде колеса редуктора.

Использование асинхронного двигателя предполагает установку цилиндрического[5] [8] (с одной или двумя тихоходными шестернями) или планетарного редуктора[6] с большим передаточным числом. Возможен вариант прямого привода от тихоходного вала

[1] ГОСТ ИСО 10816-1–97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования.

[2] ГОСТ Р ИСО 10816-3–99. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Часть III. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин$^{-1}$.

[3] ГОСТ Р ИСО 13373-1–2009 Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы; ГОСТ Р ИСО 13373-2–2009 Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации.

[4] Фам Ван Бьен. Вентильный индукторный электропривод для шаровых мельниц. Автореф. дис. … канд. техн. наук. Место защиты: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск; 2019; Закамалдин А.А. Оптимальное управление процессом измельчения в шаровой мельнице с применением прогнозирующей модели. Дис. и автореф. … канд. техн. наук. Место защиты: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Томск; 2022; Ханин С.И. Разработка научных основ проектирования шаровых мельниц с энергообменными и классифицирующими устройствами. Автореф. дис. … докт. техн. наук. Место защиты: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. Белгород; 2016.

[5] Сайт фирмы. FLSmidth. Редукторы для горизонтальных мельниц. URL: www.FLSmidthMaagGear.com

[6] Сайт фирмы FLENDER. Стандартная серия PLANUREX 3. URL: https://www.flender.com/de/Produkte/Getriebe/PLANUREX-3-Standardbaureihe/p/ATN319

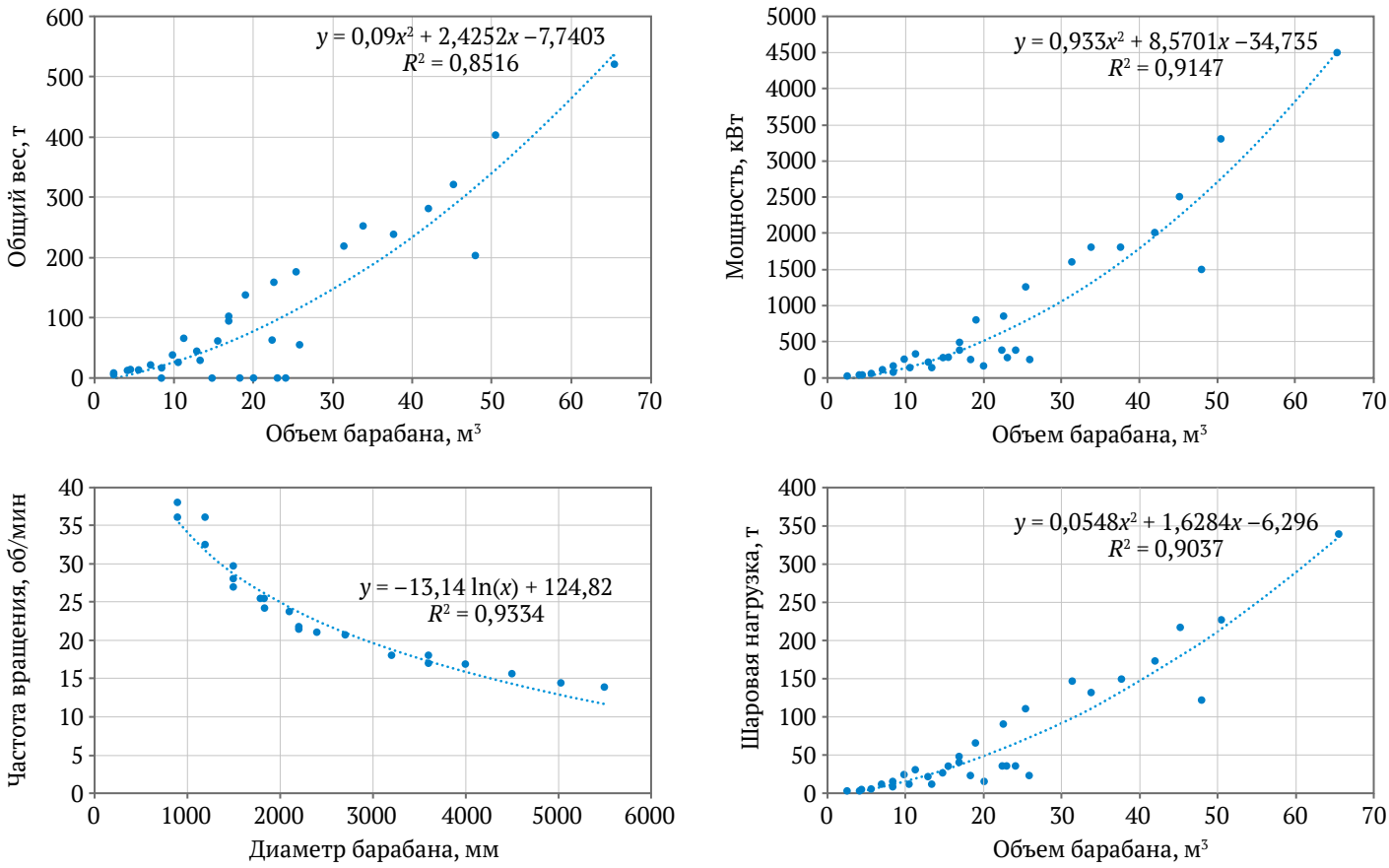


Рис. 1. Зависимости между основными характеристиками выпускаемых типоразмеров шаровых мельниц

редуктора без использования венца барабана в виде колеса редуктора. Применение двухредукторного привода снижает общую надёжность системы из-за увеличения количества компонентов или недостаточной загрузки двигателя. В случае поломки одного из двигателей предполагается, что второй завершит текущий этап технологического процесса. Для обеспечения непрерывности процесса измельчения при использовании группы шаровых мельниц используется частичное резервирование, позволяющее проводить ремонт одной или нескольких машин. Переход к стратегии упреждающего обслуживания (ремонта) должен быть обеспечен информационно для индивидуальных характеристик жёсткости и особенностей вида привода.

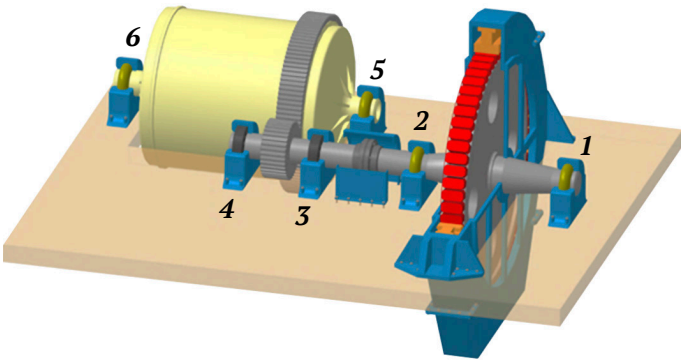


Рис. 2. Расположение контрольных точек на шаровой мельнице

Варианты диагностирования технического состояния мельниц выполнены для случаев использования в качестве приводных синхронного и асинхронного двигателей

Расположение контрольных точек измерения вибрации (рис. 2) определялось в соответствии с рекомендациями стандарта ГОСТ ИСО 10816-1–97: *1* – свободный подшипник электродвигателя; *2* – подшипник электродвигателя от муфты; *3* – приводной подшипник шестерни; *4* – холостой подшипник приводной шестерни; *5* – подшипник барабана с приводной стороны; *6* – подшипник барабана с холостой стороны. Крепление датчика осуществлялось при помощи магнита. Контролируемые частотные диапазоны 2–800 Гц, 10–4000 Гц. Измерения проводились по трём взаимно перпендикулярным направлениям: В – вертикальное, П – поперечное (горизонтальное), О – осевое.

Шаровая мельница в своей конструкции содержит три вала (каждый из них расположен на двух подшипниковых опорах), которые связаны между собой кинематически, имеют отличия по частоте вращения, конструкции и жёсткости подшипниковых опор:

– вал синхронного приводного двигателя – точки *1* и *2*;

– вал приводной шестерни – точки *3* и *4*;

– барабан мельницы – полый вал с зубчатым колесом, установленный на подшипниках скольжения – точки *5* и *6*.

Таблица 1

Значения параметров вибрации для контрольных точек шаровой мельницы

Точка измерения	Среднеквадратичное значение виброперемещения, мкм	Среднеквадратичное значение виброскорости, мм/с	Виброускорение, а-скз/а-пик м/с²
1П	26/1	0,7/0,6	0,4/1,6/0,4/1,3
2П	36/1	0,7/0,5	0,5/2,7/0,6/3,2
3П	398/60	10,6/8,3	5,4/28,7/14/93
4П	470/48	20,6/18,2	8,7/19,8/9/42
5П	145/8	2,9/1,5	1,6/6,3/4,2/24
6П	54/6	2,1/1,3	1,0/3,4/1,5/8,7

Примечание: частотный диапазон: 2–800 Гц/10–4000 Гц.

Проведенные измерения на мельницах для размола угля показали нестабильность при измерении виброперемещения в частотном диапазоне 10–4000 Гц, стабильные значения при измерении виброскорости и большие значения виброускорения в частотном диапазоне 10–4000 Гц (табл. 1). Локализация повышенных значений вибрации в точках *3* и *4* указывает на нарушение взаимного положения зубьев шестерни и колеса, ослабление резьбовых соединений, повреждение фундамента подшипниковых опор приводной шестерни.

Установка стационарной системы вибрационного контроля на шаровых мельницах размола минерального сырья потребовала индивидуального определения границы категорий технического состояния по общему уровню вибрации для контрольных точек. Последовательность решения диагностической задачи требовала включения следующих положений.

Изучение характеристик объекта

Вал двигателя мельницы соединяется с приводной вал-шестерней при помощи промежуточного вала, включающего упругие муфты и вал длиной 3800 мм диаметром 450 мм. Конструкция допускает компенсацию перекосов до 1°, что составляет 17,6 мм на 1 м длины. Возможен неравномерный износ упругих элементов соединительной муфты.

Крутящий момент, создаваемый двигателем, 533 кН×м. Вал-шестерня – двухопорный вал с межопорным расположением приводной шестерни. Опоры – подшипники сферические двухрядные (роликоподшипники 3680, установленные в стаканах или непосредственно в корпусе). Фиксированная опора расположена со стороны редуктора привода перефутеровки.

Диаметр шестерни – 1220 мм, линейная скорость зуба – 4,5 м/с. Смазка – жидкая, подаётся от маслостанции. Уплотнение – бесконтактное, лабиринтное. Для смазывания зубчатого колеса установлены форсунки с отклонением от проектного решения. Технические характеристики: частота вращения быстроходного вала 75 об/мин; число зубьев вал-шестерни – 46.

Вибрация является реакцией системы неизвестной жёсткости, демпфирующей силовое воздействие расчётных и паразитных сил [11]. Расчётные силы в зацеплении:

– окружная $F_t = 2M_{кр}/D_0 = 2 \times 533/1{,}156 = 922{,}1$ кН;

– радиальная $F_r = F_t \times \mathrm{tg}\alpha/\cos\beta = 922{,}1 \times 0{,}364/0{,}9945 = 337{,}5$ кН;

– осевая $F_a = F_t \times \mathrm{tg}\beta = 922{,}1 \times 0{,}105 = 96{,}8$ кН,

где $\alpha = 20°$, $\mathrm{tg}20° = 0{,}364$; $\beta = 6°$, $\cos 6° = 0{,}9945$, $\mathrm{tg}6° = 0{,}105$.

Масса вал-шестерни – 11 000 кг.

В процессе работы вал-шестерня прижата к подшипниковой опоре. Износ зубьев вал-шестерни происходит в 5,47 раз быстрее, чем зубьев колеса. При этом зубчатая пара распаровывается, что приводит к необходимости регулировки положения вал-шестерни при неизменном положении двигателя и началу процесса приработки, который сопровождается повышенным износом и вибрацией. Наличие зазоров в зубьях с различным наклоном приводит к появлению гармонических и субгармонических составляющих зубчатого зацепления.

Частотный диапазон включает:

– гармоники частоты вращения – 1,25 Гц;

– зубцовую частоту – 57,5 Гц и её гармоники – до 5-й – 287,5 Гц;

– субгармоника и полуторные гармоники фиксируются по мельнице МШЦ 5,5×6,5 – 28,75 Гц (субгармоника зубцовой), 86,25 Гц (1,5 зубцовой), 143,75 Гц (2,5 зубцовой), 201,25 – (3,5 зубцовой);

– подшипниковые частоты – практически не читаются, за исключением частот: 8,13; 8,28; 27,81; 28,28; 29,69; 34,22; 35,16 Гц.

Реализация вращательного движения предполагает, что минимальное значение имеет осевая вибрация, а соотношение между вертикальной и горизонтальной составляющими – 0,8.

Значения виброскорости в осевом направлении начинают расти при наличии зазоров в осевом направлении, непараллельности зубьев шестерни и колеса, ослаблении резьбовых соединений, «мягкой лапе». Значения виброскорости в горизонтальном направлении максимальны. Увеличение вибрации в вертикальном направлении возможно при ослаблении резьбовых соединений, «мягкой лапе».

Значения виброскорости в горизонтальном направлении превышают на 20% значения в вертикальном направлении. Опоры, как и вал-шестерня, симметричные, поэтому:

$$3В \approx 4В,\ 3П \approx 4П,\ 3О \approx 4О.$$

Границы категорий технического состояния определялись индивидуально для каждого вала методом статистической классификации в предположении, что сопрягаемые узлы находятся в состоянии, формируемом энергетическим потенциалом повреждения при ступенчатом развитии. Под категориями технического состояния понимаются необходимость и срочность проведения ремонтных операций. Категория «аварийное» соответствует потере контроля над состоянием. Пример гистограммы для определения границ категорий технического состояния по общему уровню виброускорения, м/с², приведен на рис. 3.

Исходя из гипотезы минимального количества реализаций на границах категорий технического состояния по результатам, представленным на рис. 3 для подшипников вал-шестерни, устанавливаем границы удовлетворительного состояния – до 2,0 м/с^2; требует исправления – 2,0–4,8 м/с^2; аварийное – свыше 4,8 м/с^2.

Аналогично получены границы категорий состояния по общему уровню виброскорости индивидуально для каждых подшипниковых опор валов.

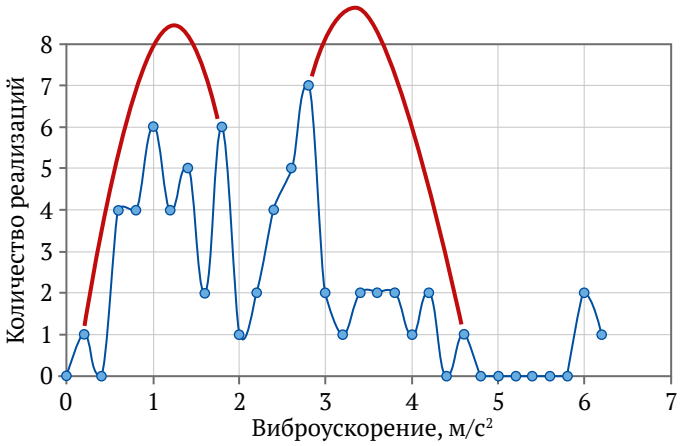


Рис. 3. Гистограмма количества реализаций виброускорения для точек *3* и *4* (подшипники вал-шестерни)

Границы категорий технического состояния подшипниковых опор синхронного приводного двигателя: удовлетворительное – до 1,8 мм/с; требуется ремонтное воздействие – 1,8–3,0 мм/с; аварийное – свыше 3,0 мм/с.

Границы категорий технического состояния подшипниковых опор барабана мельницы: хорошее – до 0,6 мм/с; удовлетворительное – 0,6–1,5 мм/с; требуется ремонтное воздействие – 1,5–3,0 мм/с; аварийное – свыше 3,0 мм/с.

Границы категорий технического состояния подшипниковых опор приводной вал-шестерни: удовлетворительное – до 4,5 мм/с; требуется ремонтное воздействие – 4,5–11,2 мм/с; аварийное – свыше 11,2 мм/с. Именно эти границы соответствуют рекомендациям ГОСТ ИСО 10816-1–97.

На основании анализа отказов и проводимых ремонтных работ сделаны выводы:

– о степени повреждения и возможных действиях;

– об аксиомах при анализе общего уровня вибрации;

– о характере повреждений при увеличении значений виброскорости по направлениям;

– о диагностических правилах различения повреждений по прямым спектрам.

Установлены характерные образы и последовательность развития повреждений по прямым спектрам виброскорости (рис. 4) и виброускорения.

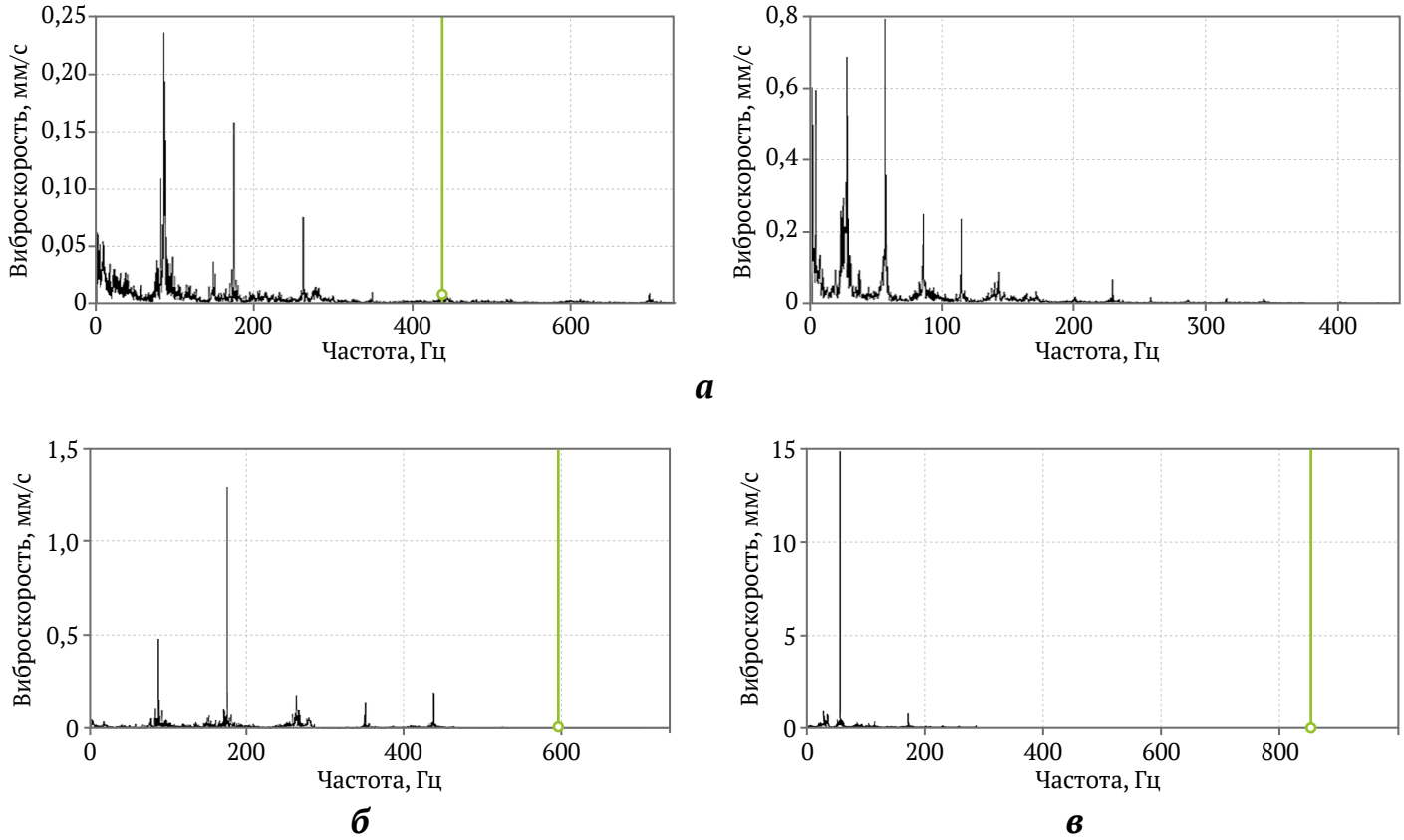


Рис. 4. Развитие повреждений в прямых спектрах виброскорости по точкам *3* и *4*:
а – состояние хорошее – гармоники с низким уровнем составляющих 0,2–0,8 мм/с; *б* – состояние удовлетворительное – увеличение амплитуд высших гармоник до 2,0 мм/с; *в* – требуется исправление – увеличение амплитуды первой гармоники свыше 4,5 мм/с, уменьшение амплитуды высших гармоник

Временная реализация вибрационного сигнала позволяет наблюдать возникающий режим биений (рис. 5). Например, в работе зубчатой передачи шаровых мельниц биения возникают с периодом примерно 1,1 с. Период биений определяется по формуле:

$$T_{\text{биения}} = 2 \times \frac{\pi}{\Delta\omega}. \quad (5)$$

Откуда:

$$\Delta n = \frac{60}{T_{\text{биения}}} = 54{,}5 \text{ об/мин}.$$

Возможно возникновение биений при следующем условии:

$$\Delta n = n_{\text{двигателя}} - n_{\text{мельницы}} - 0{,}5 \times n_{\text{мельницы}} = 54{,}5 \text{ об/мин}.$$

Это соответствует появлению зазоров в секторах зубчатого зацепления.

Преимуществом стационарной системы контроля является постоянная фиксация вибрационных параметров. Одним из диагностических критериев в этом случае выступает стабильность вибрационной картины. Эти картины индивидуальны для конкретных механизмов в данный момент. Изменение спектральной картины для исправного механизма происходит без увеличения значений составляющих, меняются их частоты. Для неисправного состояния происходит рост амплитуд – сначала высших гармоник, а затем – первой, оборотной. Следует выработать нормативы скорости допустимого увеличения значений вибрации.

Задачи, решаемые переносными и стационарными системами вибрационного контроля, различные. Диагностирование при помощи одноканальных или многоканальных переносных виброанализаторов позволяет зафиксировать текущее состояние объекта в виде статической картины, используя наиболее информативные точки контроля и дополнительные данные визуального осмотра, анализа шумов, температуры узлов в локальных точках и тепловой картины механизма в целом, других органолептических и приборных методов.

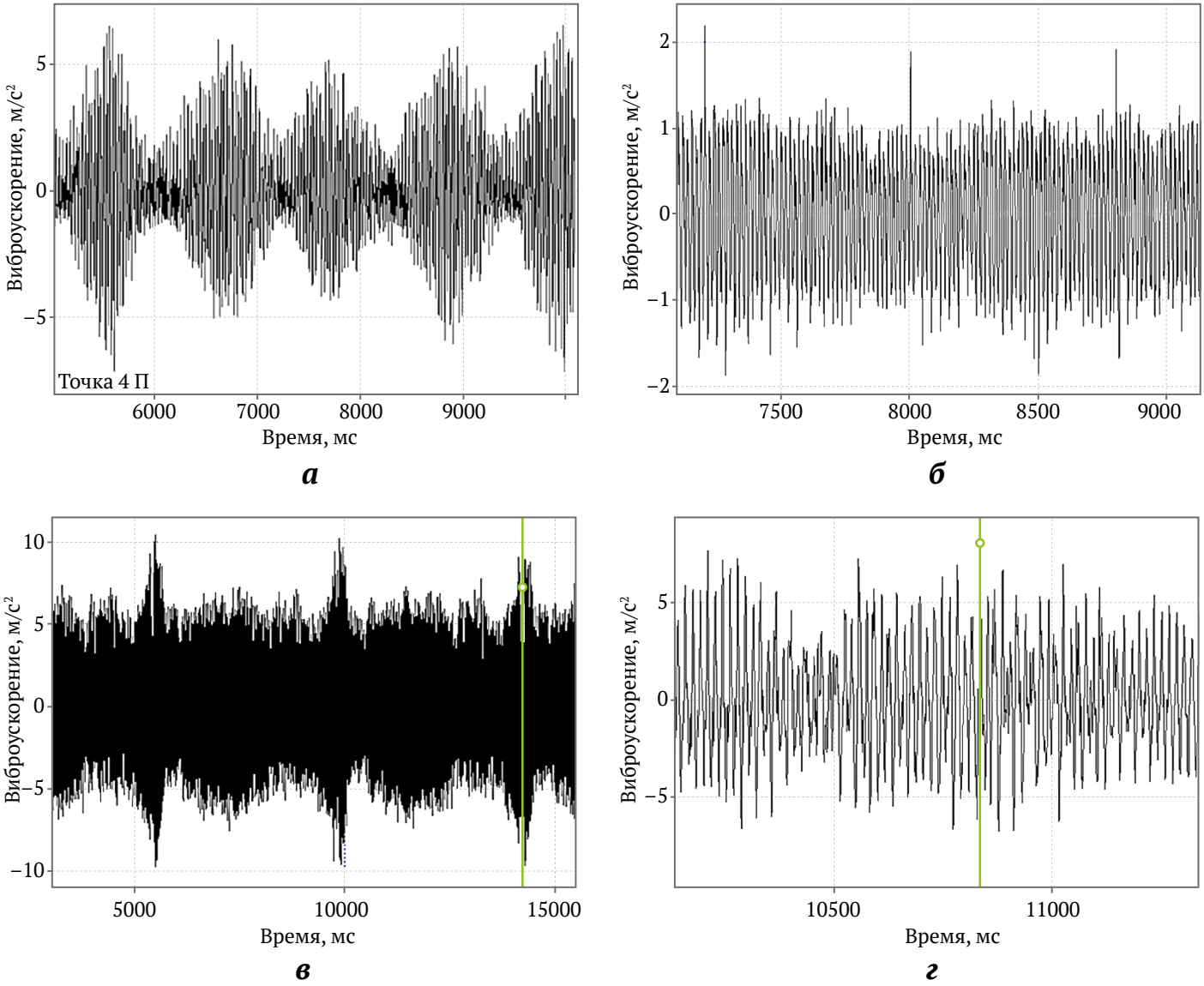


Рис. 5. Биения: *а* – зазоры в секторах зубчатого зацепления; *б* – выкрашивание зуба; *в* – повреждения подшипника; *г* – нестабильность в работе зубчатой передачи

Стационарная система отслеживает изменение значений диагностируемых величин в контрольных точках для получения динамической картины. Отсутствие данных визуального осмотра, реальной программы загрузки, результатов ремонтных операций не может компенсироваться бесконечными возможностями экспертного модуля. Полученные данные должны расширять и дополнять возможности переносных систем, не вступая с ними в соревнование. Недостаток данных о ремонтных операциях компенсируется анализом трендов. Длительность анализа в этом случае определяет решаемые задачи и возможности получения дополнительных данных. Анализируемый период ограничивается временем между двумя проводимыми ремонтами, по объёму сравнимыми с капитальными, – замена основных элементов и восстановление работоспособного состояния на уровень до 80 % от первоначального.

Анализ трендов в этом случае становится основным источником получения дополнительной информации. Рассмотренные далее примеры относятся к группе механизмов, таких как шаровые мельницы (рис. 6), у которых двигатель мощностью 4000 кВт имеет частоту вращения 75 об/мин, а барабан диаметром 5,5 м и длиной 6,5 м вращается с угловой скоростью 13,68 об/мин. Предполагалось определить некоторые логические правила и зависимости при анализе трендов среднеквадратичного значения виброскорости в частотном диапазоне 10–1000 Гц в контрольных точках. Базовый интервал – месяц.

Количество остановок агрегатов в течение месяца может быть случайной величиной, может отражать некоторые тенденции в технологическом режиме или проводимых ремонтах.

Следует выделять кратковременные остановки (рис. 6, *а*), кратковременные запуски (рис. 6, *б*) – результат нарушения технологических или ремонтных операций, профилактические (рис. 6, *в*) и длительные (рис. 6, *г*) остановки. Дополнительный параметр – характер остановки, учитываемый по времени простоя: кратковременный, длительный. Эти данные служат для расчёта коэффициента готовности $K_г$ – одного из комплексных показателей надёжности технической системы:

$$K_г = \frac{T}{T+\tau}, \qquad (6)$$

где T – время работы, τ – время восстановления.

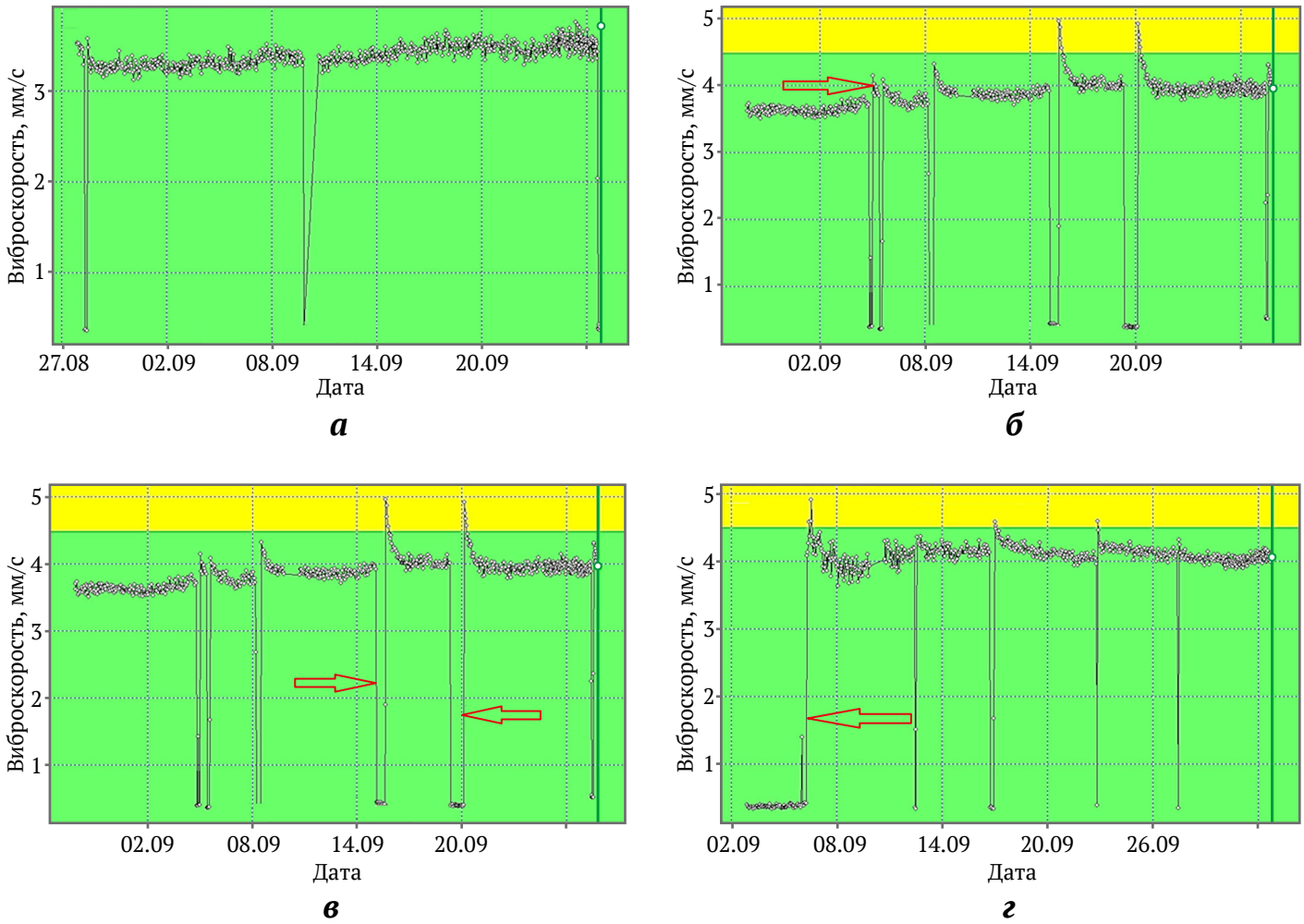


Рис. 6. Виды остановок: *а* – кратковременные остановки; *б* – кратковременные запуски; *в* – профилактические; *г* – длительные

Большое количество остановок свидетельствует о наличии трудно устранимой причины неудовлетворительной работы или использования данных механизмов в качестве «горячего» резерва. При анализе трендов (рис. 7) появляются признаки: кратковременных запусков и экспоненциального снижения виброскорости после запуска. Они сочетаются с простоями длительностью в несколько суток.

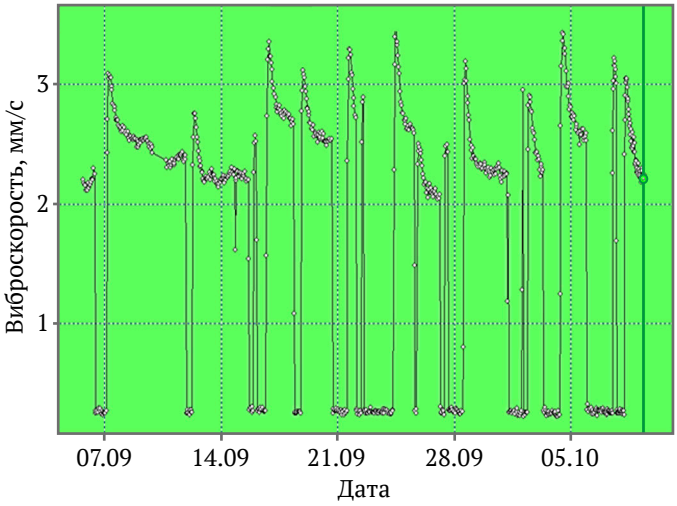


Рис. 7. Тренд виброскорости по точке 4П шаровой мельницы

При длительной работе можно выделить несколько режимов (рис. 8): стабильной работы (рис. 8, *а*), снижения виброскорости (рис. 8, *б*), повышения виброскорости (рис. 8, *в*), нестабильной работы (рис. 8, *г*). Для оценки нестабильности необходимо учитывать размах пиковых значений, причины увеличения и снижения виброскорости, фиксируемые с периодичностью опроса датчиков – 20 мин. Анализ длительных трендов может использоваться для решения технологических задач поиска оптимального режима работы.

Очевидно, что у каждого из режимов есть свои причины такого поведения. Стабильная работа соответствует неизменности технического состояния и не требует принятия дополнительных решений о ремонте или техническом обслуживании. Снижение виброскорости может происходить по мере износа шаров и снижения действующей неуравновешенной силы. Повышение виброскорости является признаком действия дополнительных сил или снижения жёсткости подшипниковых опор при ослаблении резьбовых соединений.

Общие тенденции могут наблюдаться по всей машине или узлу. На рис. 9 приведены тренды виброскорости по подшипниковым узлам вал-шестерни шаровой мельницы за длительный период наблюдения (более двух недель) для нескольких характерных точек, таких как 3В, 4В и 3П, 4П. Как видно из рис. 9, зафиксирована положительная динамика изменения виброскорости, т.е. её снижение за время исследований.

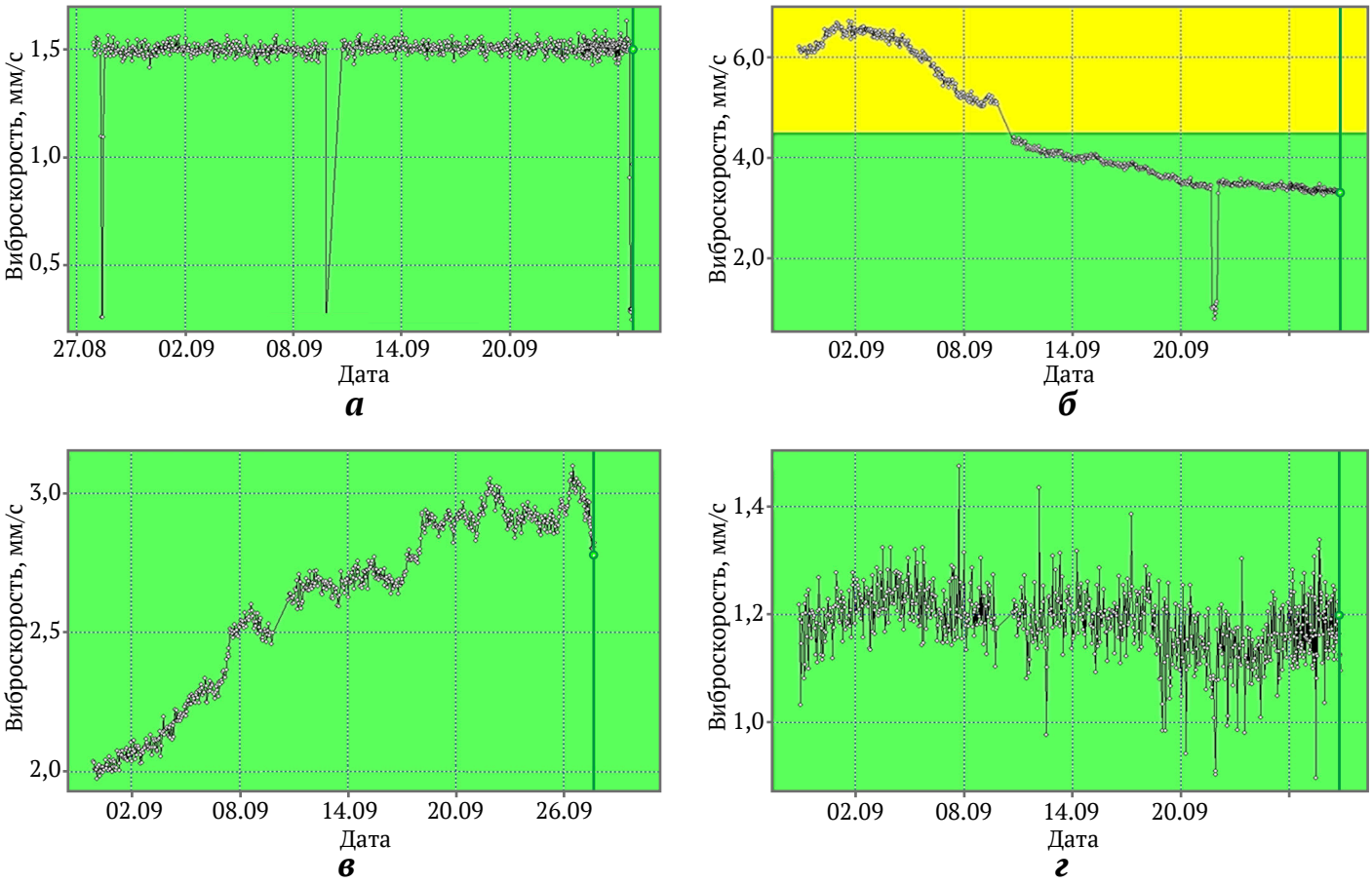


Рис. 8. Режимы работы: *а* – стабильный; *б* – снижения виброскорости; *в* – повышения виброскорости; *в* – нестабильный

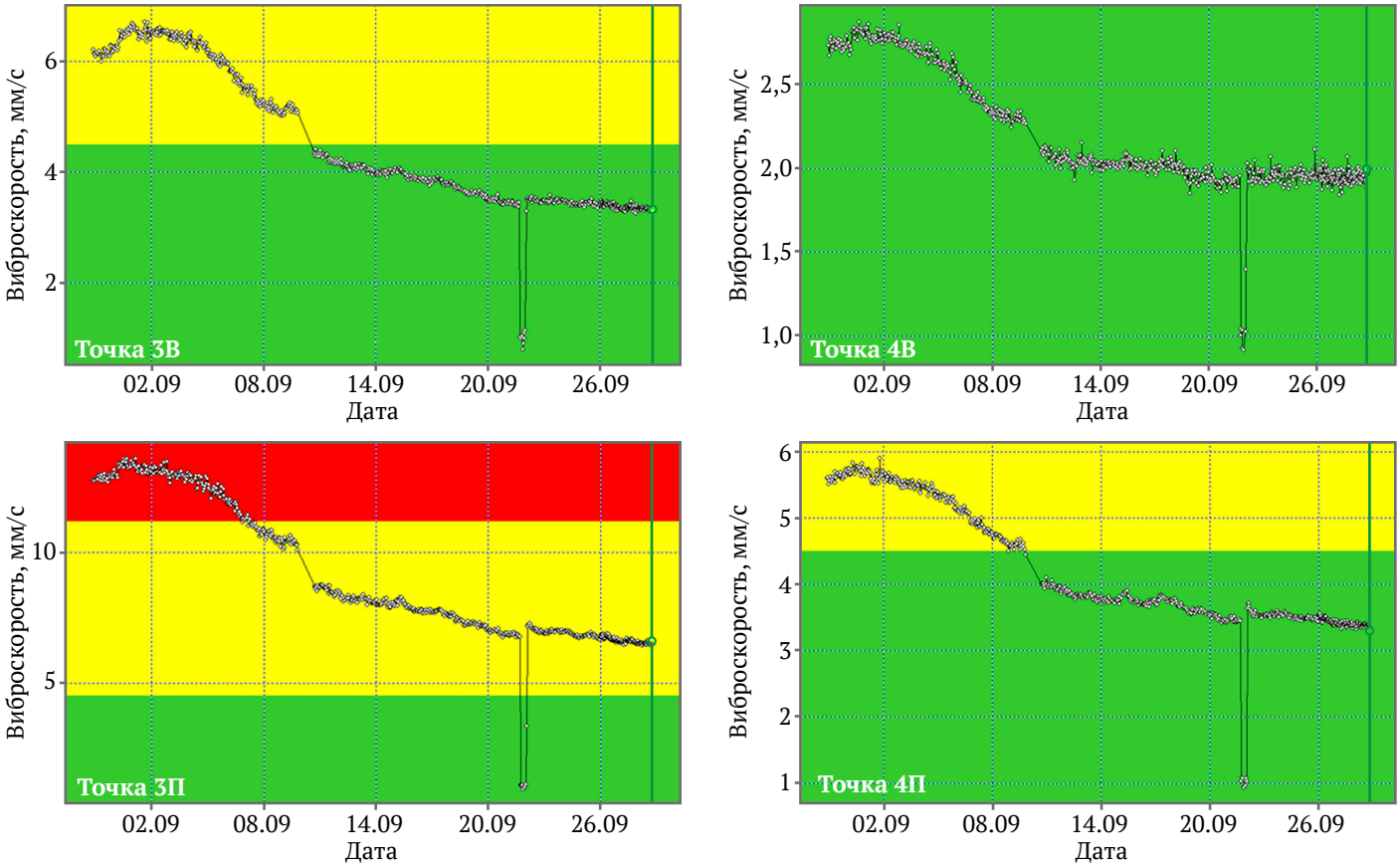


Рис. 9. Тренды виброскорости по подшипниковым узлам вал-шестерни в сентябре

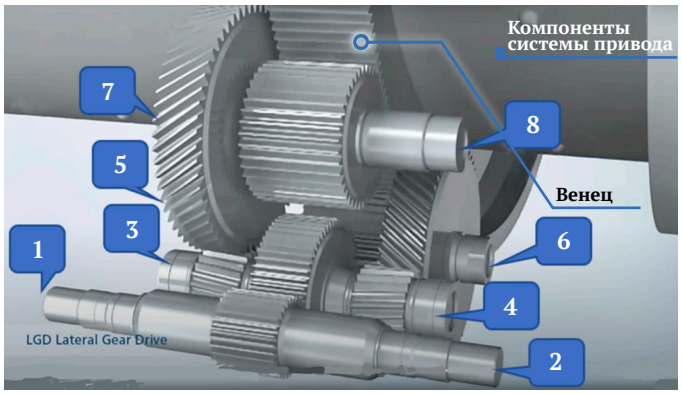


Рис. 10. Расположение контрольных точек при измерении вибрации редуктора

В трендах виброскорости следует выделить два участка. Первый участок – это ниспадающая линия, второй участок – резкий провал в показаниях виброскорости, который можно объяснить временным остановом ЭМС шаровой мельницы. После восстановления функционирования ЭМС мельницы продолжается тенденция к снижению виброскорости. Еще один диагностический признак – это переход значений виброскорости: из красной зоны в жёлтую, из жёлтой в зелёную или нахождение в зелёной зоне – зоне допустимых значений.

Приведенные примеры являются частью возможных реализаций значений виброскорости технической системы во времени. Основные признаки должны быть формализованы и введены в экспертные модули для принятия решений. Например, накопления данных о случаях кратковременного превышения виброскорости, введения показателя стабильности работы, оценки состояния после ремонта и др. Для оценки состояния двигателя необходимо установить датчик вибрации на его корпусе.

Диагностирование шаровой мельницы с приводом от асинхронного двигателя

Наличие редуктора в конструкции данной мельницы приводит к увеличению количества контрольных точек при измерении вибрации (рис. 10). Различные сроки замен зубчатых колёс[7] требуют высокого качества изготовления запасных деталей на оборудовании одной фирмы. Результаты измерения общего уровня вибрации приведены в табл. 2. Несмотря на массивный редуктор значения имеют достаточно высокий уровень (допустимое значение 11,2 мм/с) практически по всему агрегату, что можно связать с повышенной податливостью фундамента или с зубчатой парой, выполненной на двух предприятиях.

[7] Трошина А. Г. Модернизация привода эксплуатируемых горизонтальных цементных мельниц. Автореф. дис. … канд. техн. наук. Место защиты: Тульский государственный университет. Тула; 2013.

Таблица 2

Значения параметров вибрации для контрольных точек редуктора шаровой мельницы

Точка измерения	Среднеквадратичное значение виброскорости по направлениям в частотном диапазоне 10–1000 Гц, мм/с		
	Вертикальное	Горизонтальное	Осевое
1	6,89	9,91	12,18
2	12,73	9,55	7,01
3	7,17	5,96	10,74
4	7,36	9,45	10,54
5	5,64	8,00	9,54
6	13,73	8,41	8,16
7	4,81	7,77	–
8	9,35	7,04	11,25

Анализ полученных результатов измерений общего уровня виброскорости позволяет определить, что редуктор находится в аварийном состоянии и следует прекратить эксплуатацию до устранения выявленных дефектов. Увеличенная вибрация в осевом направлении свидетельствует о наличии изгиба при вращении. Это подтверждается нарушением равномерности значений виброскорости в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Определение информативных частот возможных повреждений при известной кинематической схеме реализуется простейшим расчётом. Выделим оборотные и зубцовые частоты:

– быстроходный вал: первая гармоника – 16,6 Гц, зубцовая частота – 612 Гц;

– второй вал: первая гармоника – 7,6 Гц, зубцовые частоты – 613/174 Гц;

– тихоходные валы: первая гармоника – 2,1 Гц, зубцовые частоты – 174/65 Гц.

При рассмотрении прямых спектров (рис. 11) подтверждены разработанные диагностические правила распознавания образов картин спектров, неожиданностью стало появление частоты 729 Гц, генерирующей гармонический ряд. Превышение амплитуд высших гармоник зубцовой частоты 612 Гц однозначно указывает на развитие повреждения. Высокая податливость фундамента подтверждена результатами анализа контурной диаграммы. Частота 729 Гц определена как резонансная.

За 10 дней эксплуатации произошел критический рост вибрации на частотах:

– 65 Гц – амплитуда 2,0 мм/с, вторая гармоника – 130 Гц – амплитуда 1,5 мм/с – увеличение вибрации в зоне зацепления (зубьев) третьей и четвёртой ступеней, с возрастающим перекосом;

– 612 Гц – амплитуда 9,5 мм/с – увеличение в 2,5 раза за короткий период свидетельствует об изменении категории технического состояния;

– 1224 Гц (вторая гармоника частоты 612 Гц), составляющая выросла более чем в 12 раз – от 0,79 мм/с до 9,4 мм/с – увеличение перекоса/эксцентриситета в зоне зацепления;

– составляющие на частоте 726 Гц остались без изменения, что подтверждает резонансное происхождение данной частоты.

Выводы

1. Впервые выполнен совместный анализ взаимосвязанных основных параметров шаровых мельниц – Q, P, W, Q_{mel}. Анализ корреляционных зависимостей для графиков $Q = f(V_b)$; $P = f(V_b)$; $W = f(D_b)$; $Q_{mel} = f(V_b)$ даёт возможность специалистам по проектированию и эксплуатации оборудования более обоснованно подойти к выбору технических параметров и режимов работы действующих и планируемых к вводу шаровых мельниц.

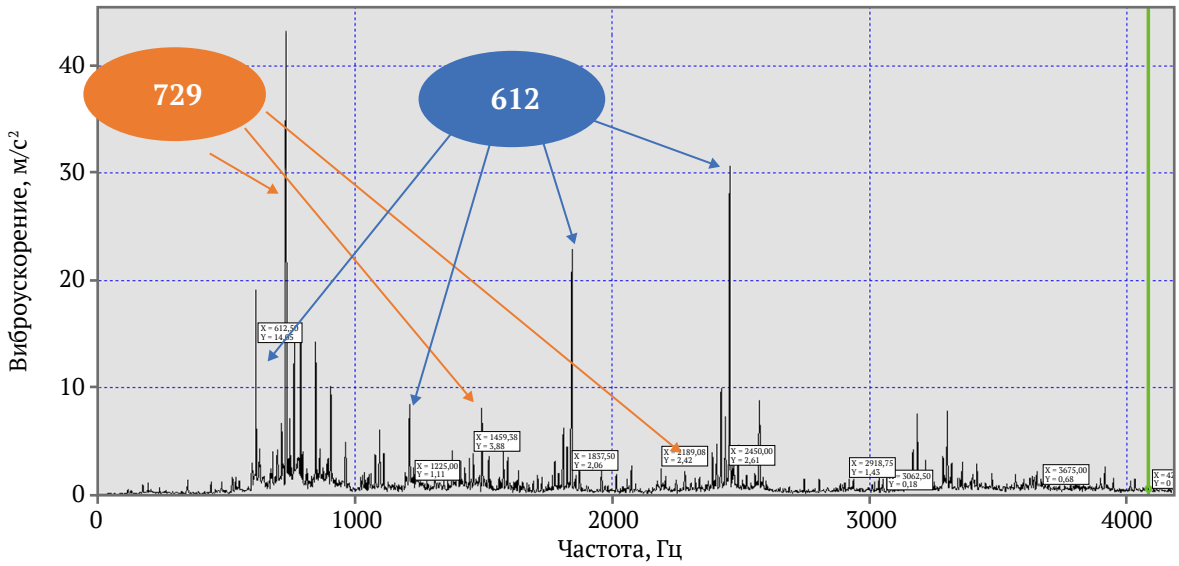


Рис. 11. Прямой спектр виброускорения в частотном диапазоне 10–4000 Гц

2. Сочетание в конструкции шаровых мельниц валов с различной частотой вращения и различной жёсткостью требует индивидуального определения границ категорий технического состояния. На базе трендов виброскорости и ускорения за определенный промежуток времени реализуется анализ на склонность элементов ЭМС шаровых мельниц к развитию повреждений и допустимости работы с действующими нагрузками.

3. Информативное обеспечение технического состояния шаровых мельниц в достаточной степени достигается анализом общего уровня вибрации, прямых трендов виброскорости и виброускорения, анализом временных реализаций вибрационного сигнала, длительным и краткосрочным анализом трендов. Тренды виброскорости в цветовом режиме (зоны – красная, жёлтая, зеленая) в конкретный момент времени дают возможность оценить техническое состояние системы и принять решение о возможном проведении ремонтной операции.

4. Сочетание возможностей стационарного контроля вибрационных показателей шаровых мельниц и результатов диагностирования состояния многоканальными переносными приборами позволяет получить оперативную информацию о техническом состоянии оборудования и выполнить планирование объёма работ по техническому обслуживанию и ремонту. В полном объёме для формирования корректных выводов о техническом состоянии необходимы данные о производственной и токовой нагрузке, температурных полях, результатах визуального осмотра и проводимых работ по техническому обслуживанию и ремонтам.

5. Приведенные примеры показывают необходимость классификации основных видов трендов и формулировки логических решающих правил для учёта экспертной системой при принятии решений. Для ухода из зоны резонансных и субрезонансных частот в ЭМС шаровых мельниц рекомендуется применять для привода системы частотных приводов ПЧ – АД, ПЧ – СД при размоле материалов конкретной фракции.

Список литературы / References

1. Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., Голуб Е.С. и др. *Вибродиагностика*. Монография. Под ред. Г.Ш. Розенберга. СПб.: ПЭИПК; 2003. 284 с.
Rozenberg G.Sh., Madorskij E.Z., Golub E.S. et al. *Vibration diagnostics*. Monograph. Rosenberg G.Sh. (Ed.) St. Petersburg: St. Petersburg Energy Institute for Advanced Studies; 2003. 284 p. (In Russ.)

2. Ширман А.Р., Соловьев А.Д. *Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования*. М; 1996. 276 с.
Shirman A.R., Solovyov A.D. *Practical vibration diagnostics and monitoring of the condition of mechanical equipment*. Moscow; 1996. 276 p. (In Russ.)

3. Русов В.А. *Спектральная вибродиагностика*. Пермь: Вибро-Центр; 1996. 176 с.
Rusov V.A. *Spectral vibration diagnostics*. Perm: Vibro-Center; 1996. 176 p. (In Russ.)

4. Шарапов Р.Р. *Шаровые мельницы замкнутого цикла*. Белгород: Изд-во БГТУ; 2008. 269 с.
Sharapov R.R. *Closed-cycle ball mills*. Belgorod: BSTU Publ. House; 2008. 269 p. (In Russ.)

5. Huang P., Jia M., Zhong B. Study on the method for collecting vibration signals from mill shell based on measuring the fill level of ball mill. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014;2014:72315. https://doi.org/10.1155/2014/472315

6. Амосов Е.А. Некоторые закономерности работы шаровых мельниц. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2012;(1):219–222.
Amosov E.A. Some regularities of ball mills work. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2012;(1):219–222. (In Russ.)

7. Yoshida T., Kuratani F., Ito T. Taniguc K. Vibration characteristics of an operating ball mill. *Journal of Physics Conference Series*. 2019;1264(1):012016. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1264/1/012016

8. Трошина А.Г. Модернизация приводов горизонтальных шаровых мельниц. *Цемент и его применение*. 2009;(3):26–31.
Troshina A.G. Modernisation of drives of horizontal ball mills. *Journal Cement and Its Applications*. 2009;(3):26–31. (In Russ.)

9. Su Zh., Wang P., Yu X., Lv Zh. Experimental investigation of vibration signal of an industrial tubular ball mill: Monitoring and diagnosing. *Minerals Engineering*. 2008;21(10):699–710. https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2008.01.009

10. Gauthier N.K., Chiementin X., Rasolofondraibe L., Boujelben A. *Diagnostic de défauts d'engrenages assisté par jumeau numérique "Application à la surveillance des broyeurs à boulets"*. May 2022. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28847.41129

11. Логов А.Б., Замараев Р.Ю. *Математические модели диагностики уникальных объектов*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 1999. 228 с.
Logov A.B., Zamaraev R.Yu. *Mathematical models for diagnosing unique objects*. Novosibirsk: Publ. House SB RAS; 1999. 228 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Владимир Филиппович Борисенко – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация; AuthorID 850557; e-mail borissenko.vp@gmail.com

Владимир Анатольевич Сидоров – доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования заводов чёрной металлургии, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-6794-7838, Scopus ID 55424503900; e-mail sidorov_va58@mail.ru

Андрей Евгеньевич Сушко – кандидат технических наук, генеральный директор, ООО НПО «Диагностические технологии», г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0009-0003-3113-5194; e-mail as@diatechnic.ru

Вячеслав Николаевич Рыбаков – вибродиагност 3-го уровня, руководитель службы диагностики, ООО НПП «ПромТЭК», г. Самара, Российская Федерация; e-mail rvn@npp-promtek.com

Information about the authors

Vladimir F. Borisenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation; AuthorID 850557; e-mail borissenko.vp@gmail.com

Vladimir A. Sidorov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation; ORCID 0000-0001-6794-7838, Scopus ID 55424503900; e-mail sidorov_va58@mail.ru

Andrey E. Sushko – Cand. Sci. (Eng.), General Director, SPA DIATECH LLC, Moscow, Russian Federation; ORCID 0009-0003-3113-5194; e-mail as@diatechnic.ru

Vyacheslav N. Rybakov – vibration diagnostics of the 3rd level, Head of the Diagnostics Service, PromTEK R&D LLC, Samara, Russian Federation; e-mail rvn@npp-promtek.com

Поступила в редакцию	25.10.2023	**Received**	25.10.2023
Поступила после рецензирования	24.01.2024	**Revised**	24.01.2024
Принята к публикации	25.03.2024	**Accepted**	25.03.2024