

Mining Science and Technology

Горные науки
и технологии

Vol. **10** № **2**
2025



<https://mst.misis.ru/>

<https://t.me/MinSciTech>



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 ресурсами 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 императрицы Екатерины II, 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

Евдокимов Александр Николаевич, проф., д.г.-м.н., Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

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 «Инфолайн»», г. Москва, Российская Федерация

Раимжанов Бахадиржан Раимжанович, проф., д.т.н., филиал Университета науки и технологий МИСИС, г. Алматы, 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., Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, 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, ВИНТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

OPEN ACCESS Журнал открытого доступа.

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

 **МИСИС** Университет науки и технологий
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.



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.), Empress Catherine II 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 Drenstedt, Prof., Ph.D., Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg, Germany

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

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

Alexandr N. Evdokimov, Dr.Sci. (Geol. and Min.), Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 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.), Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, 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, ВИНТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

FOUNDER AND PUBLISHER



MISIS 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



This work is licensed under a
[Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обоснование оптимальной ширины дражного забоя 99
Б.Л. Тальгамер, И.А. Мешков, Н.В. Мурзин, Ю.Г. Рославцева

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Роль сдвиговых дислокаций и грабен-рифтов в контроле нефтегазоносности
глубинных горизонтов Русско-Часельского вала (Западно-Сибирская провинция)..... 109
*Д.Д. Секерина, М.М. Саитгалеев, Н.П. Сенчина, В.В. Глазунов, Д.Ф. Калинин,
М.П. Козлов, Э.И. Исмаилова*

Минерально-сырьевая база кобальта России: состояние, возможности развития 118
Г.Ю. Боярко, Л.М. Болсуновская

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Анализ механизма циклического геомеханического воздействия для увеличения
продуктивности скважин в карбонатных коллекторах 148
И.М. Индрупский, Е.А. Сухина, Ю.В. Алексеева

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Исследование элементного статуса молодого населения посёлка Солнечный
Хабаровского края в рамках горно-экологического мониторинга..... 161
Н.К. Растанина, Д.А. Голубев, А.В. Перфильев, П.Л. Растанин, И.А. Попадъёв

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Снижение загрязнения шахтных вод в системе участкового водоотлива
кимберлитового рудника 169
Н.П. Овчинников

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Инструменты экономического стимулирования освоения техногенных месторождений ... 180
В.В. Юрак, М.Н. Игнатьева, О.Г. Комарова



CONTENTS

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Justification of the optimal width of a front bank 99

B.L. Talgamer, I.A. Meshkov, N.V. Murzin, Yu. G. Roslavtseva

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Role of strike-slips and graben-rifts in controlling oil and gas reservoirs in deep horizons of the Russko-Chaselsky Ridge (West Siberian Province) 109

D.D. Sekerina, M.M. Saitgaleev, N.P. Senchina, V.V. Glazunov, D.F. Kalinin, M.P. Kozlov, E.I. Ismagilova

Mineral resource base of Russia's cobalt: current state and development prospects 118

G. Y. Boyarko, L.M. Bolsunovskaya

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Analysis of the mechanism of cyclic geomechanical treatment to increase well productivity in carbonate reservoirs 148

I.M. Indrupskiy, E.A. Sukhinina, Yu. V. Alekseeva

ENVIRONMENTAL PROTECTION

Assessment of the elemental status of the young population in Solnechny, Khabarovsk krai, as part of mining environmental monitoring 161

N.K. Rastanina, D.A. Golubev, A. V. Perfiliev, P.L. Rastanin, I.A. Popadyev

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Reducing mine water contamination at the local drainage facility of a kimberlite mine 169

N.P. Ovchinnikov

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Economic incentive instruments for the development of technogenic deposits 180

V.V. Yurak, M.N. Ignatyeva, O. G. Komarova



РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-11-332>

УДК 622.271.1:622.271.5



Обоснование оптимальной ширины дражного забоя

Б.Л. Тальгамер , И.А. Мешков , Н.В. Мурзин , Ю.Г. Рославцева

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,**г. Иркутск, Российская Федерация* meshkovia@ex.istu.edu**Аннотация**

Снижение себестоимости готовой продукции за счет применения наиболее экономически выгодных процессов и технологий добычи и обогащения полезных ископаемых – одна из актуальных задач в горнодобывающей отрасли промышленности. Значительное влияние на себестоимость добычи полезного ископаемого россыпей оказывает ширина дражного забоя. Существующие методы расчета наивыгоднейшей ширины забоя драги основаны на обеспечении ее максимальной производительности, что оправдано при валовой разработке россыпей. С увеличением глубины залегания россыпи и мощности вскрышных пород традиционные методы расчета оптимальной ширины дражного забоя не обеспечивают минимальной себестоимости добычных работ. Целью исследований является обоснование наивыгоднейшей ширины забоя драги с учетом мощности торфов и приемлемых технологических схем вскрышных работ. Идея работы заключается в том, что оптимальная ширина забоя должна устанавливаться не только исходя из максимальной производительности драги, но и из условия обеспечения наименьшей себестоимости добычи ценных компонентов (с учетом производительности всего горного оборудования и себестоимости вскрышных работ). В исследовании проводится анализ влияния параметров россыпи (мощности торфов и продуктивного пласта, ширины забоя) на себестоимость добычи и переработки песков, а также выявление зависимостей влияния параметров горных работ на технико-экономические показатели. В рамках исследования было рассмотрено более 100 технологических схем комплексной работы вскрышного и добычного оборудования и дана экономическая оценка их эффективности. Приведены рекомендуемые значения поправочных коэффициентов к определению оптимальной ширины забоя драги. Результаты исследования служат методическим материалом для обоснования параметров дражной системы разработки россыпей.

Ключевые слова

россыпи, драгирование, ширина забоя, вскрышные работы, производительность драги, себестоимость добычных работ

Для цитирования

Talgamer B.L., Meshkov I.A., Murzin N.V., Roslavl'tseva Yu.G. Justification of the optimal width of a front bank. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):99–108. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-11-332>

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research paper

Justification of the optimal width of a front bank

B.L. Talgamer , I.A. Meshkov , N.V. Murzin , Yu.G. Roslavl'tseva

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation meshkovia@ex.istu.edu**Abstract**

Reducing the cost of finished products by using the most economically advantageous processes and techniques for the extraction and beneficiation of minerals is one of the most pressing tasks in mining industry. The width of front bank has a significant impact on the cost of placer deposits mining. Existing methods for calculating the most advantageous width of front bank are based on ensuring dredge maximum productivity that is justified in placer bulk mining. With increasing depth of a placer deposit occurrence and thickness of overburden, traditional methods for calculating the optimal width of a front bank do not ensure minimizing production costs. The aim of the research is to determine the most advantageous width of a front bank, taking into account a peat (overburden) thickness and acceptable stripping flow sheet. The idea behind this work is that the optimal width of a front bank should be determined not only based on the maximum productivity of



a dredge, but also on the condition of ensuring the lowest cost of extraction of valuable components (taking into account the productivity of all mining equipment and the stripping costs). The study analyzes the impact of placer parameters (peat thickness and productive layer thickness, front bank width) on the cost of sand extraction and processing, and identifies the dependencies of mining parameters on technical and economic performance. The study examined more than 100 process flow sheets for the integrated operation of stripping and mining equipment and provided an economic assessment of their effectiveness. Recommended values for correction factors for determining the optimum front bank width are given. The study findings serve as methodological material for substantiating the parameters of a placer mining system.

Keywords:

placer deposits, dredging, front bank width, stripping, dredge productivity, mining costs

For citation

Talgamer B.L., Meshkov I.A., Murzin N.V., Roslavtseva Yu.G. Justification of the optimal width of a front bank. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):99–108. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-11-332>

Введение

Дражный способ разработки россыпей благодаря поточной технологии минимизирует себестоимость добычи ценных компонентов из россыпных месторождений [1]. Только этим способом могут успешно обрабатываться глубокие обводненные и крупные техногенные россыпные месторождения с низким содержанием полезных компонентов [2, 3], доля которых в нераспределенном фонде запасов россыпей наиболее высока [4]. Дальнейшее повышение конкурентоспособности этого способа в значительной степени зависит от возможностей увеличения производительности драг, в том числе за счет продления добычного сезона, уменьшения технологических простоев, повышения качества подготовки запасов к выемке, оптимизации технологических параметров драгирования [1, 5]. При разработке достаточно широких россыпей повышение производительности обеспечивается оптимизацией ширины её забоя.

Оптимальная наиболее выгодная ширина забоя драги устанавливается с учетом обеспечения её максимальной суточной производительности [6]. При относительно благоприятных условиях драгирования и валовой разработке запасов, что имело место во второй половине XX века, данный метод расчета обеспечивает наиболее высокие технико-экономические показатели работы драги. Вместе с тем ввиду постоянно усложняющихся условий эксплуатации месторождений в сторону увеличения объемов горноподготовительных работ определение оптимальной ширины забоя драги исходя из условия обеспечения её максимальной производительности будет не совсем верным, так как эффективность работы драги зависит не только от её производительности, но и от объемов и стоимости горноподготовительных работ, величины потерь и разубоживания полезного ископаемого, извлечения ценных компонентов и экономических показателей разработки месторождения.

Увеличение ширины дражного забоя приводит к росту затрат на вскрышные работы, а также на работы по удалению шуги (осенью) и льда (весной) и, как правило, на рекультивацию. При уменьшении ширины забоя растут потери песков (в том числе межшаговые и межходовые) или их разубоживание, увеличивается концентрация взвесей в технологической воде, что в ряде случаев может привести к снижению

извлечения ценных компонентов, а также, как показывают исследования, к существенному негативному воздействию на водные объекты [7–9], усложняется разворот драги.

Таким образом, оптимальная ширина забоя драги должна устанавливаться из условия обеспечения наименьшей себестоимости добычи ценных компонентов, а не только с учетом реализации её максимальной производительности. При этом наибольшее влияние на экономические показатели дражной разработки оказывают вскрышные работы, объем которых в последние годы неуклонно растет [10].

Несмотря на то что дражный способ разработки оказывает значительное воздействие на различные компоненты окружающей среды [11, 12], особенно на водные объекты [13, 14], он по-прежнему остается одним из наиболее экономически эффективных [15] и активно используется в настоящее время при разработке россыпных месторождений как в России [10, 16], так и за рубежом [17, 18], что свидетельствует о достаточной актуальности задачи по обоснованию оптимальной ширины дражного забоя.

Теория вопроса

При проектировании горных работ для выемочно-погрузочного оборудования обосновывается оптимальная ширина заходки, которая в большинстве случаев обусловлена рабочими параметрами горных машин. При использовании экскаваторов ширина заходки в основном определяется исходя из радиусов черпания и разгрузки, иногда в расчет принимается вид используемого транспорта. При дражной разработке россыпей рациональная ширина дражного хода устанавливается с использованием более сложной зависимости, которая учитывает не только рабочие параметры драги, но и условия ее работы и характеристику россыпи.

Известно несколько методов расчета оптимальной ширины забоя (или оптимального угла маневрирования) драги¹ [6, 19]. Все они учитывают характеристику россыпи и параметры драги и предусматривают обеспечение её максимальной суточной производи-

¹ Кудряшев В. А. Некоторые вопросы теории и технологии разработки глубоких россыпей дражным способом. [Автореф. дис. ... д-ра техн. наук]. М: Изд-во МГРИ; 1975. 42 с.

тельности. Значения, полученные по результатам расчетов по данным методикам, несколько отличаются, однако в целом указывают на то, что оптимальная ширина забоя драги ближе к её минимально возможной величине и существенно меньше максимальной ширины. Зависимости производительности 380 л драги от ширины забоя применительно к условиям разработки одной из россыпей Саха (Якутия) приведены на рис. 1.

Средняя мощность продуктивного пласта рассматриваемой россыпи – 10 м, мощность торфов – 2–6 м (средняя 4 м), средняя ширина россыпи – 560 м.

Из рис. 1 следует, что максимальная производительность 380 л драги соответствует ширине забоя от 65 до 105 м.

Для дальнейшего исследования влияния вскрышных работ на оптимальную ширину забоя драги используется наиболее известная и широко применяемая в проектировании методика В.Г. Лешкова [6], в которой суточная производительность драги устанавливается из выражения:

$$Q_{\text{сут}} = \frac{3600v_6HaTR \sin \beta_1}{0,0175K_c R_c \beta_1 + 30v_6(t_1 + K_c t_2)}, \quad (1)$$

где v_6 – скорость бокового перемещения драги вдоль забоя, м/с; H – мощность россыпи, срабатываемая черпаками, м; a – величина ухода (шага) драги на один забой, м; T – время работы драги в сутки, ч; R_c – средний радиус черпания драги при отработке россыпи мощностью H , м; β_1 – половина угла маневрирования драги, град; $K_c = H/h$ – число слоев породы, срабатываемых черпаками при послонной отработке одного забоя; t_1 – затраты времени на одно зашагивание, мин; t_2 – простой драги в узлах забоя при проходке к выемке нижележащего слоя породы, мин; 0,0175 – цифровой коэффициент перевода градусов в радианы.

В трудах В.Г. Лешкова [6] описывается метод расчета оптимальной ширины забоя драги, который учитывает мощность драгируемых песков и конструкционные параметры добычного оборудования. Наивыгоднейшая ширина одинарного забоя драги устанавливается из условий наивысшей производительности драги по горной массе и определяется наивыгоднейшим углом маневрирования. Формула для расчета имеет вид:

$$\beta_n = 47,8 \sqrt{1000 \frac{v_6 h}{HR_c} \left(t_1 + \frac{H}{h} t_2 \right)}. \quad (2)$$

Наивыгоднейшую ширину одинарного забоя, м, рассчитывают по уравнению:

$$B_n = 2R_c \sin \frac{\beta_n}{2}. \quad (3)$$

Предложенная В.Г. Лешковым методика расчета наивыгоднейшей ширины дражного забоя учитывает основные параметры работы оборудования и характер продуктивного пласта, однако не предполагает наличия и объема вскрышных пород. Поэтому необходимо спрогнозировать, как изменится наивыгоднейшая (оптимальная) ширина забоя, если учесть работы по выемке и транспортированию торфов.

Цели и задачи исследований

Основной целью исследований является обоснование оптимальной ширины дражного забоя в зависимости от мощности полезного ископаемого и вскрышных пород. Для достижения поставленной цели необходимо установить влияние мощности торфов на себестоимость добычи полезного ископаемого, определить параметры дражного забоя, обеспечивающие минимальные затраты на разработку россыпи, и усовершенствовать метод расчета наивыгоднейшей ширины забоя драги при разработке широких россыпей.

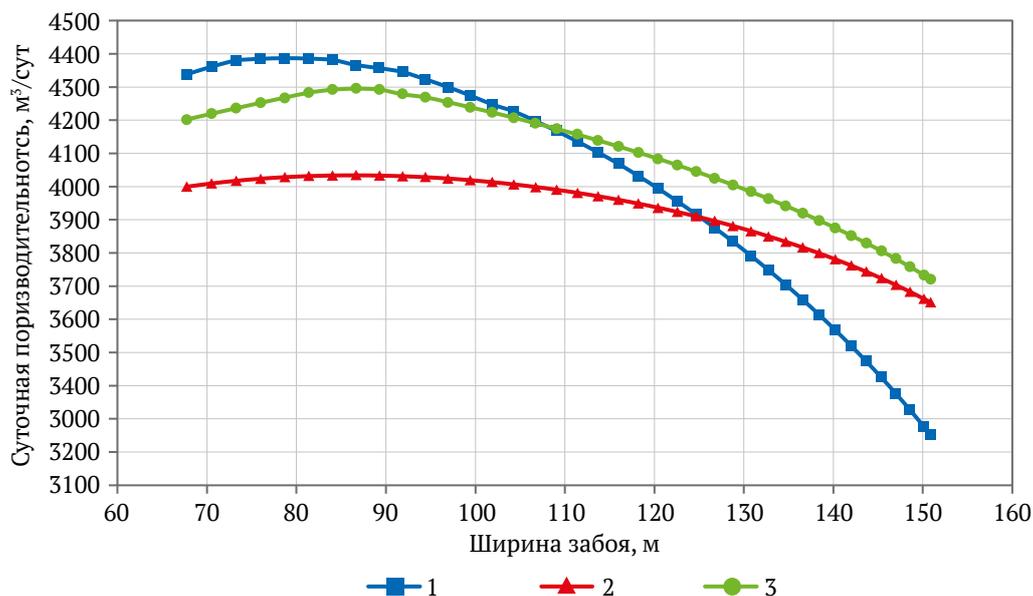


Рис. 1. Зависимости суточной производительности 380 л драги от ширины забоя: 1 – по методике В.А. Кудряшева; 2 – по методике В.Г. Лешкова; 3 – по методике С.М. Шорохова

Методика исследований

Для решения поставленных задач использовались графоаналитические и технико-экономические методы расчета.

Оценка влияния вскрышных работ на оптимальную ширину дражного забоя выполнялась на основе расчета себестоимости добычи полезного ископаемого в зависимости от параметров забоя драги, мощности торфов, технологии их выемки и складирования.

При мощности торфов до 6 м расчет осуществлялся для бульдозерного способа выполнения вскрышных работ, при мощности более 6 м – для бестранспортного с использованием драглайнов. Согласно принятым технологическим схемам вскрышных работ размещение отвалов торфов осуществляется на один борт россыпи или в выработанное пространство предыдущей дражной заходки. Транспортная технология вскрышных работ с использованием комплекса экскаватор–автосамосвал не рассматривалась, так как из-за ее высокой себестоимости (в 2–3 раза больше, чем бестранспортная и бульдозерная) при дражной разработке она практически не применяется.

Для определения себестоимости вскрышных и добычных работ при разных горнотехнических параметрах россыпи и используемых технологических схемах устанавливались зависимости производительности горного оборудования и объема земляных работ от ширины хода драги. Производительность бульдозеров определялась исходя из длины транспортирования и высоты отвалов, объем экскаваторных работ рассчитывался с учетом изменения коэффициента переэкскавации. Себестоимость вскрышных и добычных работ определялась исходя из стоимости машино-часа работы используемого оборудования, его производительности и объемов вскрышных работ.

Результаты

Оценка влияния технологии вскрышных работ на оптимальную ширину забоя драги выполнялась посредством расчета себестоимости вскрышных работ (в рублях за один кубический метр добываемых песков) и себестоимости драгирования. Минимум затрат на вскрышные и добычные работы достигается при максимальной производительности используемого оборудования.

Исходя из производительности драги был произведен расчет себестоимости добычи и переработки одного кубометра песков. На рис. 2 представлен график зависимости себестоимости добычи песков от ширины забоя при мощности продуктивного пласта 10, 20 и 28 м.

Как видно из рис. 2, минимальные значения себестоимости достигаются при ширине забоя 70–100 м.

С целью оценки влияния вскрышных работ на общую себестоимость добычи одного кубометра песков был произведен расчет производительности бульдозеров при работе с шириной дражного забоя 50–155 м с различной мощностью песков (от 6 до 28 м). Мощность песков также влияет на ширину забоя, так как разбортовка увеличивает его ширину поверху. Для мощности торфов 2–6 м были установлены зависимости производительности и себестоимости вскрышных работ с использованием бульдозеров (мощностью 350–400 кВт) от ширины дражного забоя.

Производительность бульдозера для каждого случая определялась исходя из длины транспортирования торфов. При увеличении ширины забоя драги растут длина транспортирования и параметры отсыпаемого бульдозерного отвала (высота, необходимая вместимость), при этом снижается производительность вскрышного оборудования и, как следствие, увеличивается себестоимость добычи песков.

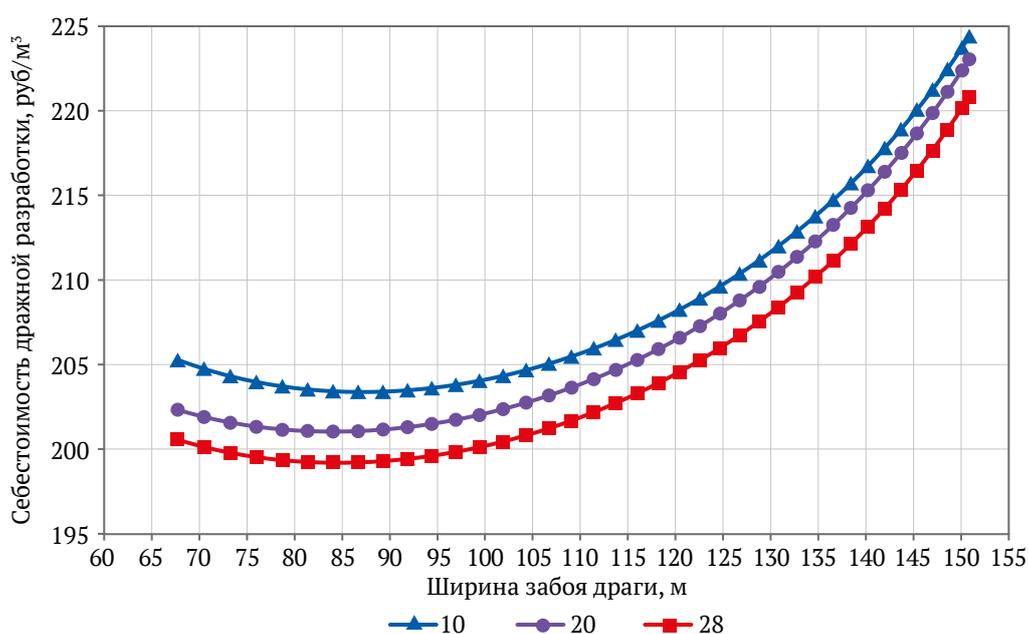


Рис. 2. Зависимости себестоимости драгирования от ширины забоя для 380 л драги при мощности продуктивного пласта 10, 20, 28 м

Зависимости себестоимости добычи и переработки одного кубометра песков (с учетом затрат на вскрышные работы бульдозерами) от ширины забоя драги представлены на рис. 3–5. В табл. 1 приведены результаты расчета себестоимости добычных работ при различных значениях мощностей торфов, песков и ширины забоя.

Из рис. 3–5 следует, что при увеличении ширины забоя драги свыше 95 м происходит резкое увеличение себестоимости добычи полезного ископаемого. Это подтверждает то, что при проектировании дражных работ и выявлении оптимальной ширины забоя драги необходимо учитывать параметры вскрышных работ.

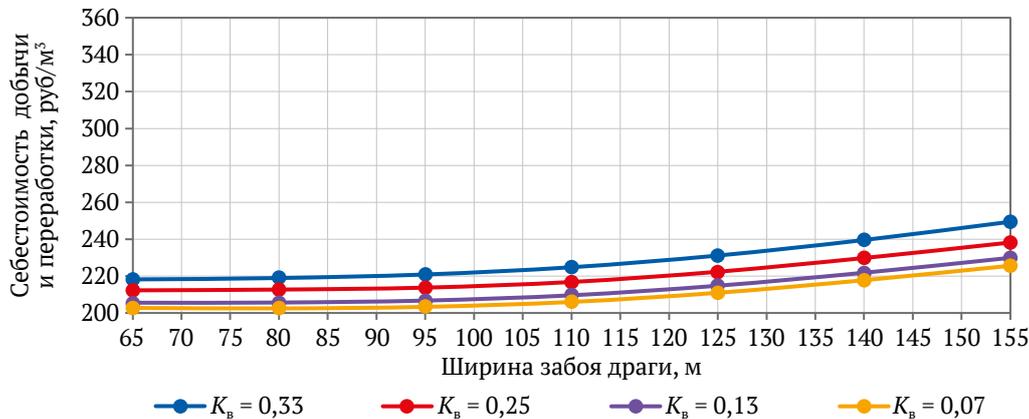


Рис. 3. Зависимости себестоимости добычи и переработки полезного ископаемого от ширины дражного забоя при мощности торфов 2 м и коэффициенте вскрыши $K_b = 0,07-0,33$

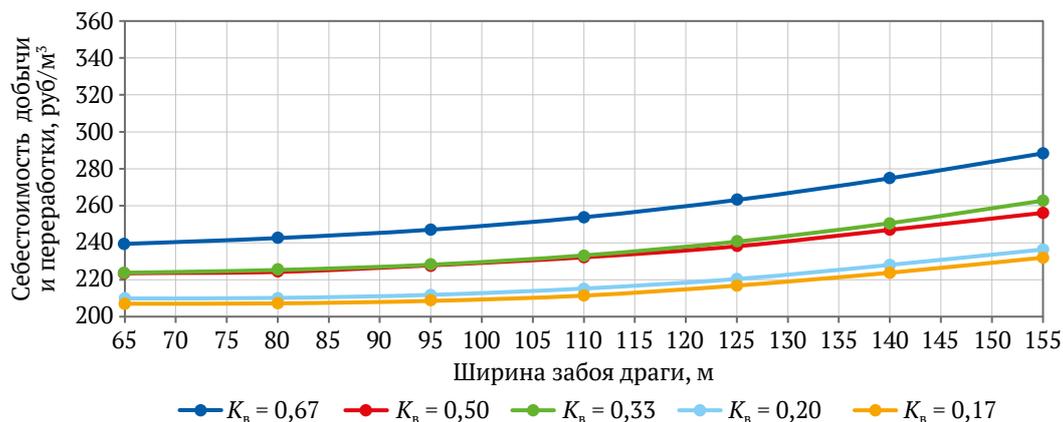


Рис. 4. Зависимости себестоимости добычи и переработки полезного ископаемого от ширины дражного забоя при мощности торфов 4 м и коэффициенте вскрыши $K_b = 0,17-0,67$

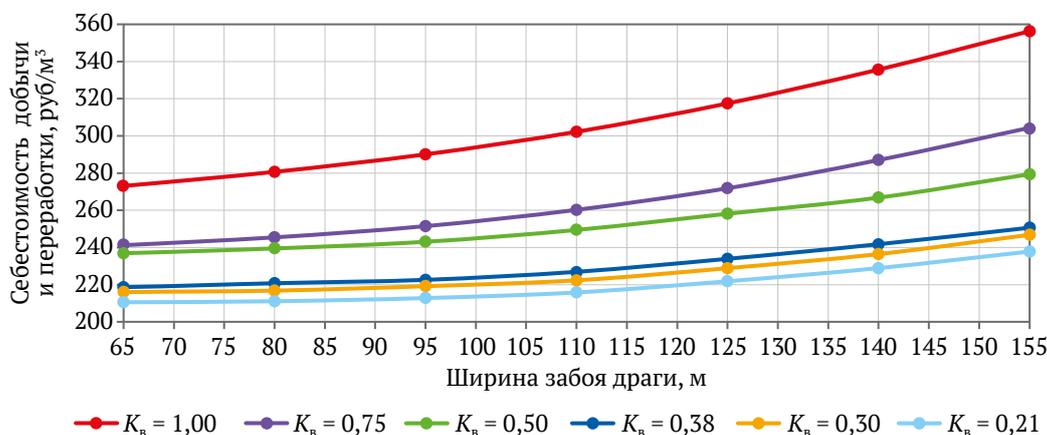


Рис. 5. Зависимости себестоимости добычи и переработки полезного ископаемого от ширины дражного забоя при мощности торфов 6 м и коэффициенте вскрыши $K_b = 0,21-1,00$



В табл. 2 приведены данные расчета оптимальной ширины забоя по формуле (2) и показатели, выявленные с учетом ведения вскрышных работ. Рассчитан поправочный коэффициент, который предлагается использовать в формуле (2) при расчете оптимальной ширины забоя 380 л драги при аналогичных параметрах россыпи.

По мере увеличения мощности торфов себестоимость добычи полезного ископаемого возрастает, а оптимальная ширина дражного разреза постепенно сокращается. Как видно из табл. 2, разница между рассчитанными значениями оптимальной ширины забоя драги без учета и с учетом ведения вскрышных работ бульдозерами составляет от 0 до 35,6 %. Графически изменение поправочного коэффициента в зависимости от некоторых параметров россыпи (мощность торфов и коэффициент вскрыши) отображено на рис. 6.

При разработке россыпей дражным способом с мощностью торфов более 5–6 м целесообразность использования бульдозеров для производства вскрышных работ снижается и применяется бестранспортная технология.

При исследовании влияния ширины хода драги на себестоимость драгирования с использованием бестранспортной технологии были проанализированы 140 технологических схем ведения вскрышных работ экскаватором-драглайном ЭШ 20/90, в которых

изменялись мощности вскрышных пород (5–20 м), песков (6–28 м) и ширина забоя (50–140 м). Для каждой схемы графоаналитическим способом были посчитаны коэффициенты переэкскавации, которые приведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что при наибольших значениях ширины забоя драги коэффициент переэкскавации вскрышного экскаватора максимален, следовательно, и себестоимость вскрышных работ в таких условиях будет выше.

Для каждого варианта рассчитаны себестоимости вскрышных работ и драгирования. В табл. 4 приведены результаты расчета себестоимости добычи при использовании бестранспортной технологии ведения вскрышных работ.

По аналогии с анализом бульдозерного способа выемки торфов (см. выше) сравниваются показатели, рассчитанные без учета вскрышных работ и с их учетом при бестранспортной технологии (табл. 5).

Как видно из табл. 5, разница между двумя вариантами расчетов варьируется от 1,3 до 50,5 %. При большой мощности торфов учет вскрышных работ при расчете оптимальной ширины забоя имеет более существенное влияние.

Графически зависимости поправочного коэффициента от параметров россыпи при использовании бестранспортной технологии вскрышных работ представлены на рис. 7.

Таблица 1

**Себестоимость добычи и переработки песков драгой
с учетом ведения вскрышных работ бульдозерами, руб/м³**

Мощность, м		Себестоимость добычи и переработки полезного ископаемого при ширине забоя драги, м							
торфов	песков								
H_r	H_n	50	65	80	95	110	125	140	155
2	6	217,8	218,2	218,9	220,5	227,1	231,1	239,6	249,5
	8	211,9	212,3	212,7	213,4	219,1	222,4	229,8	238,2
	12	212,1	211,9	211,9	212,7	218,5	221,6	229,1	238,0
	16	205,8	205,6	205,7	206,3	212,0	214,8	221,9	230,0
	20	205,2	204,9	204,7	205,4	211,1	213,6	220,5	228,9
	24	203,1	202,7	202,4	202,9	208,4	210,9	217,8	225,6
	28	202,7	202,3	202,1	202,5	207,8	210,3	217,1	225,0
4	6	236,8	239,4	242,6	246,8	256,1	263,2	274,9	288,4
	8	222,1	223,5	224,2	227,5	234,4	238,1	247,0	256,2
	12	222,7	223,8	225,3	227,9	235,5	240,7	250,6	262,8
	16	211,5	211,5	211,9	213,3	219,7	223,3	230,4	239,7
	20	209,6	209,9	210,2	211,4	217,7	220,4	228,0	236,4
	24	206,9	207,0	207,2	208,2	213,8	216,8	223,8	231,9
	28	206,2	206,0	206,1	206,9	212,5	215,4	222,3	230,9
6	6	266,5	273,1	280,7	289,8	304,5	317,4	335,6	356,3
	8	235,1	237,0	239,5	242,8	251,8	258,2	266,8	279,4
	12	237,7	241,2	245,4	251,2	262,5	271,8	287,0	304,4
	16	217,8	218,6	220,7	222,1	229,3	233,8	241,7	250,6
	20	214,7	216,0	216,8	218,7	224,7	228,8	236,4	246,8
	24	211,9	212,4	213,1	213,9	220,5	223,4	231,5	240,6
	28	210,3	210,6	211,1	212,4	218,2	221,8	228,9	237,7

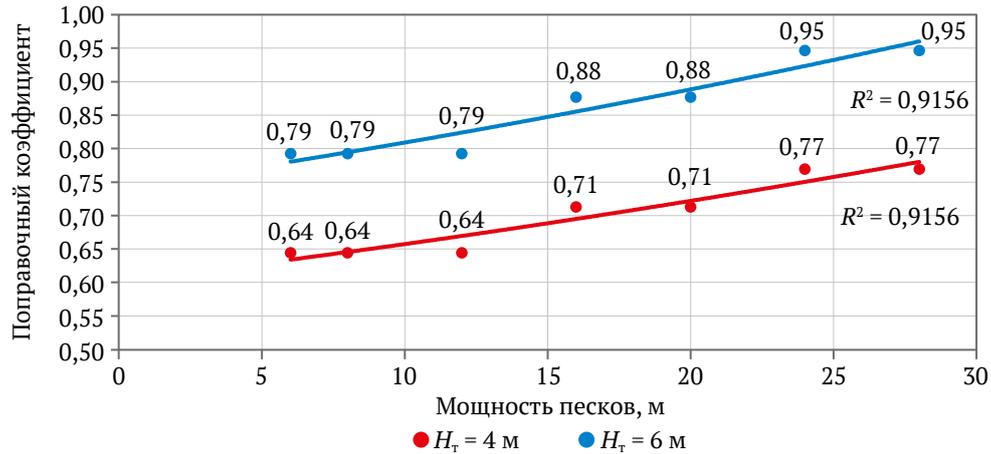


Рис. 6. Зависимости поправочного коэффициента от параметров россыпи при бульдозерном способе производства вскрышных пород при мощности торфов 4 и 6 м

Таблица 2

Оптимальная ширина забоя драги без учета V_p и с учетом V вскрышных работ с использованием бульдозеров

H_t	H_n	K_v	V_p	V	Разница, %	Рекомендуемый поправочный коэффициент		
2	6	0,33	100,9	100,0	0,9	1,00		
	8	0,25						
	12	0,17						
	4	16	0,13	91,2	95,0	-	1,00	
		20	0,10					
		6	24	0,08	84,5	95,0	-	1,00
			28	0,07				
4	6	0,67	100,9	80,0	20,7	0,79		
	8	0,50						
	12	0,33						
	6	16	0,25	91,2	80,0	12,3	0,88	
		20	0,20					
	8	24	0,17	84,5	80,0	5,3	0,95	
		28	0,14					
6	6	1,00	100,9	65,0	35,6	0,64		
	8	0,75						
	12	0,50						
	6	16	0,38	91,2	65,0	28,7	0,71	
		20	0,30					
	8	24	0,25	84,5	65,0	23,1	0,77	
		28	0,21					

Примечания: H_t – мощность торфов, м; H_n – мощность песков, м; K_v – коэффициент вскрыши, m^3/m^3 ; V – оптимальная ширина забоя с учетом вскрышных работ, м; V_p – оптимальная ширина забоя без учета производства вскрышных работ, м.

Таблица 3

Коэффициенты переэкскавации, m^3/m^3 , для схем работы экскаватора-драглайна ЭШ20/90

Мощность вскрыши, м	Мощность песков, м	Коэффициент переэкскавации при ширине забоя драги, м				
		50	65	90	120	140
5	6	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0,08
	12	0	0	0	0	0,14
	16	0	0	0	0,05	0,24
	20	0	0	0	0,13	0,29
	24	0	0	0	0,29	0,37
	28	0	0	0	0,33	0,4
10	6	0	0	0	0	0,17
	8	0	0	0	0	0,23
	12	0	0	0	0,08	0,27
	16	0	0	0	0,23	0,37
	20	0	0	0	0,32	0,43
	28	0	0,08	0,17	0,41	0,49
15	6	0	0	0	0,05	0,2
	8	0	0	0,05	0,1	0,25
	12	0	0	0,06	0,14	0,31
	16	0	0	0,12	0,25	0,46
	20	0	0,04	0,2	0,36	0,58
	24	0,04	0,09	0,37	0,48	0,76
	28	0,08	0,11	0,4	0,6	0,85
20	6	0	0	0,13	0,19	0,36
	8	0	0	0,19	0,26	0,43
	12	0	0,09	0,3	0,31	0,47
	16	0,08	0,13	0,32	0,48	0,57
	20	0,11	0,19	0,43	0,51	0,69
	24	0,15	0,21	0,54	0,56	1,08
	28	0,17	0,23	0,58	0,69	1,51



Таблица 4

Себестоимость добычи и переработки песков при использовании бестранспортной технологии вскрышных работ, руб/м³

Мощность торфов, м	Мощность песков, м	Ширина забоя драги, м				
		50	65	90	120	140
5	6	221,9	221,0	220,1	229,1	237,6
	8	217,8	216,8	216,0	223,9	233,2
	12	213,6	212,6	211,8	218,7	228,1
	16	208,6	207,8	207,5	214,6	224,4
	20	207,3	206,6	206,3	213,4	222,8
	24	204,7	204,0	204,6	210,8	219,7
	28	204,1	203,4	203,9	210,0	218,8
	10	6	238,6	237,6	236,8	249,9
8		230,3	229,3	228,5	239,5	252,9
12		221,9	221,0	224,3	230,2	241,4
16		214,8	217,2	216,9	224,6	234,9
20		212,3	214,1	213,8	221,8	231,5
24		210,7	211,1	211,5	217,9	227,1
28		209,3	209,6	209,9	216,2	225,2
15		6	255,3	254,3	266,0	272,9
	8	242,8	241,8	251,9	258,3	271,6
	12	235,8	235,6	238,8	242,5	254,6
	16	225,7	225,0	226,6	234,0	246,1
	20	221,1	220,8	222,6	229,9	241,4
	24	216,6	216,4	219,0	225,3	236,9
	28	214,7	214,2	216,5	223,4	234,3
	20	6	271,9	287,6	294,2	302,3
8		255,3	266,8	274,1	281,8	297,5
12		246,9	248,5	253,6	258,7	271,7
16		235,3	235,6	239,3	248,0	258,7
20		229,2	229,8	233,6	240,2	252,0
24		223,5	223,6	227,9	233,3	249,3
28		220,0	220,4	224,3	230,8	249,4

Таблица 5

Оптимальная ширина забоя драги без учета V_p и с учетом ведения вскрышных работ B с применением бестранспортной технологии

H_t	H_n	K_b	V_p	B	Разница, %	Поправочный коэффициент
5	6	0,83	100,9	100,0	0,9	0,99
	8	0,63				
	12	0,42				
	16	0,31	91,2	90,0	1,3	0,99
	20	0,25				
	24	0,21	84,5	85,0	0,0	1,01
	28	0,18				
	10	6	1,67	100,9	90,0	10,8
8		1,25				
12		0,83				
16		0,63	91,2	90,0	1,3	0,99
20		0,50				
24		0,42	84,5	85,0	-0,6	1,01
28		0,36				
15		6	2,50	100,9	65,0	35,6
	8	1,88				
	12	1,25				
	16	0,94	91,2	65,0	28,7	0,71
	20	0,75				
	24	0,63	84,5	65,0	23,1	0,77
	28	0,54				
	20	6	3,33	100,9	50,0	50,5
8		2,50				
12		1,67				
16		1,25	91,2	50,0	45,2	0,55
20		1,00				
24		0,83	84,5	50,0	40,8	0,59
28		0,71				

Примечания: H_t – мощность торфов, м; H_n – мощность песков, м; K_b – коэффициент вскрыши, м³/м³; B – оптимальная ширина забоя с учетом вскрышных работ, м; V_p – оптимальная ширина забоя без учета производства вскрышных работ, м.

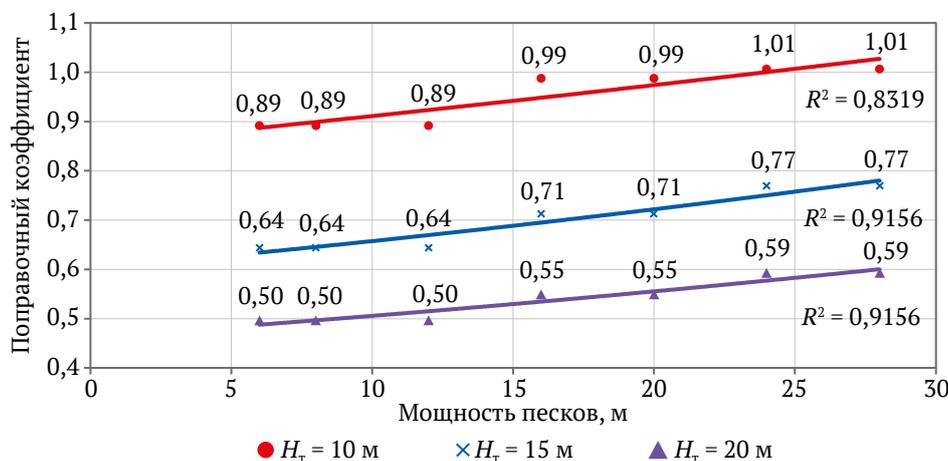


Рис. 7. Зависимости поправочного коэффициента от параметров россыпи при бестранспортном способе производства вскрышных пород и мощности торфов 10, 15, 20 м



Таким образом, предлагается при расчете оптимальной ширины дражного забоя учитывать поправочный коэффициент, значения которого приведены в табл. 2 (при бульдозерной вскрыше) и табл. 5 (при бестранспортной вскрыше). Формула будет иметь вид:

$$B_n = K_n \left[2R \sin \frac{\beta_n}{2} \right], \quad (4)$$

где K_n – поправочный коэффициент, учитывающий параметры россыпи и применяемое оборудование на вскрышных работах.

Выводы

1. Наличие вскрышных пород на дражных полигонах оказывает существенное влияние на наиболее выгодную ширину забоя драги, которая в зависимости от мощности торфов сокращается в 1,05–1,5 раза (на 5–50 %), относительно рекомендуемых значений.

2. Наиболее важно учитывать вскрышные работы при определении оптимальной ширины забоя для 380 л драги при мощности торфов более 2 м (при использовании бульдозеров) и мощности торфов более 5 м (при бестранспортной технологии с использованием ЭШ 10/70, ЭШ 20/90).

3. С увеличением мощности торфов и коэффициента вскрыши оптимальная ширина дражного забоя существенно сокращается и должна приниматься равной минимально возможному значению при бульдозерном способе выемки торфов с мощностью более 6 м, а при бестранспортной технологии – более 15 м.

4. Расчет оптимальной ширины дражного забоя рекомендуется производить по формуле В.Г. Лешкова с использованием предложенного поправочного коэффициента. При использовании на вскрышных работах менее мощного оборудования, например, бульдозеров мощностью 200–250 кВт или экскаваторов ЭШ 6/45 предложенные поправочные коэффициенты существенно уменьшаются.

Список литературы / References

1. Нафиков Р.З., Кисляков В.Е. *Технология дражной разработки россыпных месторождений в условиях Крайнего Севера*. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2021. 184 с.
Nafikov R.Z., Kislyakov V.E. *Technology of dredging development of placer deposits in the conditions of the Far North*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ.; 2021. 184 p. (In Russ.)
2. Дорош Е.А., Тальгамер Б.Л. Анализ минерально-сырьевой базы золотодобычи в Ленском золотодобывающем районе и обоснование направлений развития способов разработки россыпей. *Науки о Земле и недропользование*. 2022;45(3):222–234. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-222-234>
Dorosh E.A., Talgamer B.L. Analysis of the mineral resource base of gold mining in the Lena gold-bearing district and substantiation of the development directions of placer mining methods. *Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):222–234. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-222-234>
3. Ван-Ван-Е А.П. *Ресурсная база природно-техногенных золотороссыпных месторождений*. М.: Горная книга; 2010. 268 с.
Van-Van-E A.P. *Resource base of natural and man-made gold placer deposits*. Moscow: Gornaya Kniga Publ.; 2010. 268 p. (In Russ.)
4. Бортников Н.С., Волков А.В., Лаломов А.В. и др. Роль россыпных месторождений в обеспечении воспроизводства минерально-сырьевой базы дефицитных видов стратегического минерального сырья России на современном этапе. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024;(1):1–16. <https://doi.org/10.2205/2024ES000897>
Bortnikov N.S., Volkov A.V., Lalomov A.V. et al. The role of placer deposits in ensuring the reproduction of the mineral resource base of scarce types of strategic mineral raw materials in Russia at the present stage. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024;(1):1–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.2205/2024ES000897>
5. Дудинский Ф.В., Нечаев К.Б., Костромитинов К.Н. Эффективность комбинированной разработки глубоких россыпей. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2012;(5):4–9.
Dudinsky F.V., Nechaev K.B., Kostromitinov K.N. The effectiveness of the combined development of deep alluvial deposits. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2012;(5):4–9. (In Russ.)
6. Лешков В.Г. *Теория и практика разработки россыпей многочерпаковыми драгами*. М.: Недра; 1980. 352 с.
Leshkov V.G. *Theory and practice of placer mining using multi-bucket dredges*. Moscow: Nedra Publ.; 1980. 352 p. (In Russ.)
7. Okoyen E., Raimi M.O., Omidiji A.O., Ebuete A.W. Governing the environmental impact of dredging: Consequences for marine biodiversity in the Niger delta region of Nigeria. *Insights Mining Science and Technology*. 2020;2(3):76–84. <https://doi.org/10.19080/IMST.2020.02.555586>
8. Marrugo-Negrete J., Pinedo-Hernandez J., Marrugo-Madrid S. et al. Evaluating ecological risks and metal bioavailability in post-dredging sediments of a wetland affected by artisanal gold mining. *Science of the Total Environment*. 2024;955:176309. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176309>
9. Mantey J., Nyarko K. B., Owusu-Nimo F. et al. Influence of illegal artisanal small-scale gold mining operations (galamsey) on oil and grease (O/G) concentrations in three hotspot assemblies of Western Region, Ghana. *Environmental Pollution*. 2020;263(Part B):114251. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114251>
10. Talgamer B.L., Dudinskiy F.V., Murzin N.V. Assessment of conditions and experience of technogenic placer dredging. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 408, 2nd International Scientific*



- Conference “Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources”. 16–20 September 2019, Irkutsk Region, Russian Federation. 2020;408(1):012065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012065>
11. Timsina S., Hardy N.G., Woodbury D.J. et al. Tropical surface gold mining: A review of ecological impacts and restoration strategies. *Land Degradation & Development*. 2022;33(18):3661–3674. <https://doi.org/10.1002/ldr.4430>
 12. Queiroz J., Gasparinetti P., Bakker L.B. et al. Socioeconomic cost of dredge boat gold mining in the Tapajós basin, eastern Amazon. *Resources Policy*. 2022;79(2):103102 <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103102>
 13. Cano-Londoño N.A., Capaz R.S., Hasenstab C. et al. Life cycle impacts assessment of two gold extraction systems in Colombia: open-pit and alluvial mining. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2023;28(4):380–397. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02141-5>
 14. Davies P., Lawrence S., Turnbull J. et al. Mining modification of river systems: A case study from the Australian gold rush. *Geoarchaeology*. 2019;1–16. <https://doi.org/10.1002/gea.21775>
 15. Мурзин Н.В., Дудинский Ф.В., Тальгамер Б.Л. Оценка простоев при расчете производительности свайных драг. *Горная промышленность*. 2021;(2):120–126. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-2-120-126>
 16. Murzin N.V., Dudinskiy F.V., Talgamer B.L. Evaluation of non-productive time when calculating pile-type dredge performance. *Russian Mining Industry*. 2021;(2):120–126. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-2-120-126>
 17. Mirzekhanov G.S., Mirzekhanova Z.G. Forward appraisal of potential gold content of dredge and sluice tailings dumps at placers in Russia’s Far East. *Journal of Mining Science*. 2020;56(2):259–267. <https://doi.org/10.1134/S1062739120026733>
 18. Helmons R., de Wit L., de Stigter H., Spearman J. Dispersion of benthic plumes in deep-sea mining: What lessons can be learned from dredging? *Frontiers in Earth Science*. 2022;10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.868701>
 19. Torres C., Verschoor G. Re-imagining environmental governance: Gold dredge mining vs Territorial Health in the Colombian Amazon. *Geoforum*. 2020;117(4):124–133. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.09.013>
 19. Шорохов С.М. *Технология и комплексная механизация разработки россыпных месторождений*. М.: Недра; 1973. 795 с.
Shorokhov S.M. *Technology and complex mechanization of development of placer deposits*. Moscow: Nedra Publ.; 1973. 795 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Борис Леонидович Тальгамер – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1201-2693](https://orcid.org/0000-0003-1201-2693), Scopus ID [57196258850](https://scopus.org/57196258850); e-mail talgamer@ex.istu.edu

Иван Анатольевич Мешков – аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, инженер научно-исследовательской части, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; ORCID [0009-0006-5298-7929](https://orcid.org/0009-0006-5298-7929); e-mail meshkovia@ex.istu.edu

Николай Владимирович Мурзин – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-6833-7860](https://orcid.org/0000-0002-6833-7860), Scopus ID [57217845755](https://scopus.org/57217845755); e-mail murzinnv@ex.istu.edu

Юлия Геннадьевна Рославцева – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8799-7269](https://orcid.org/0000-0001-8799-7269), Scopus ID [57208126909](https://scopus.org/57208126909); e-mail ryg@ex.istu.edu

Information about the authors

Boris L. Talgamer – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mineral Deposit Development, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1201-2693](https://orcid.org/0000-0003-1201-2693), Scopus ID [57196258850](https://scopus.org/57196258850); e-mail talgamer@ex.istu.edu

Ivan A. Meshkov – PhD-Student, Department of Mineral Deposit Development, Research Engineer, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; ORCID [0009-0006-5298-7929](https://orcid.org/0009-0006-5298-7929); e-mail meshkovia@ex.istu.edu

Nikolay V. Murzin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mineral Deposit Development, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-6833-7860](https://orcid.org/0000-0002-6833-7860), Scopus ID [57217845755](https://scopus.org/57217845755); e-mail murzinnv@ex.istu.edu

Yulia G. Roslavl'tseva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mineral Deposit Development, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8799-7269](https://orcid.org/0000-0001-8799-7269), Scopus ID [57208126909](https://scopus.org/57208126909); e-mail ryg@ex.istu.edu

Поступила в редакцию	15.11.2024	Received	15.11.2024
Поступила после рецензирования	15.01.2025	Revised	15.01.2025
Принята к публикации	20.03.2025	Accepted	20.03.2025



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-399>

УДК 550.3



Роль сдвиговых дислокаций и грабен-рифтов в контроле нефтегазоносности глубинных горизонтов Русско-Часельского вала (Западно-Сибирская провинция)

Д. Д. Секерина¹   , М. М. Сайтгалеев¹  , Н. П. Сенчина¹  , В. В. Глазунов¹  ,
Д. Ф. Калинин¹  , М. П. Козлов^{2,3} , Э. И. Исмагилова¹ 

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ООО НПЦ «Геостра», г. Уфа, Российская Федерация

³ Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

 sekerinadar@mail.ru

Аннотация

Изучение особенностей геологического строения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (НПП) актуально для установления взаимосвязи между пространственным распределением локальных сдвиговых дислокаций Русско-Часельского вала и структурой региональной Пай-Хой–Алтайской сдвиговой зоны. Цель работы – выявление закономерностей локализации УВ-скоплений, ассоциированных с разрывными нарушениями этой зоны. В статье представлены результаты исследований, направленных на оценку характера деструкции земной коры в пределах региональной Пай-Хой–Алтайской сдвиговой зоны и предпосылок локализации месторождений углеводородов в ее пределах. В качестве фактологической основы задействован комплекс региональных и детальных геофизических данных, включающий 2D и 3D сейсморазведку, цифровые модели гравитационного и магнитного полей. На основе этих материалов были построены разрезы и карты, отображающие особенности строения осадочного чехла и консолидированного фундамента, выполнен анализ характера деструкции земной коры в пределах сдвиговой зоны. Выявлено, что разрывные дислокации региональной Пай-Хой–Алтайской сдвиговой зоны имеют характерную морфологию, описываемую эллипсоидом деформаций правостороннего сдвига. В пределах Русско-Часельского вала определены закономерности проявления системы сдвиговых дислокаций и грабен-рифтовых структур, обусловленных тектонической системой регионального Пай-Хой–Алтайского сдвига. Сдвиговая зона, оперяющие разломы и связанные с ними сколы Риделя составляют единую иерархически подчиненную систему деструкции верхней коры. Для нее характерно развитие эшелонированной системы зон деструкции платформенного чехла и верхней части консолидированного фундамента, интерпретируемой как трещины Риделя с преобладанием субмеридионального простираения. По результатам интерпретации сейсмических разрезов вдоль трещин Риделя выделяются «структуры цветка», простирающиеся от нижней мела до кровли палеозойских отложений. Структуры этого типа, локализованные в пределах Западно-Сибирской нефтегазовой провинции и представленные системами дислокаций, могут выступать дренажом при дальнейшем обосновании механизмов миграции и аккумуляции месторождений углеводородов.

Ключевые слова

сдвиговые структуры, грабен-рифт, Западная Сибирь, нефтегазоносность, гравитационные аномалии, магнитные аномалии, сейсморазведка, потенциальные поля, трещины Риделя

Благодарности

Авторы выражают благодарность за ценные советы при подготовке статьи профессору кафедры геофизики д.г.-м.н. Алексею Сергеевичу Егорову.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания FSRW-2024-0008 «Исследование термодинамических процессов Земли с позиции генезиса углеводородов на больших глубинах».

Для цитирования

Sekerina D. D., Saitgaleev M. M., Senchina N. P., Glazunov V. V., Kalinin D. F., Kozlov M. P., Ismagilova E. I. Role of strike-slips and graben-rifts in controlling oil and gas reservoirs in deep horizons of the Russko-Chaselsky Ridge (West Siberian Province). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):109–117. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-399>



GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

Role of strike-slips and graben-rifts in controlling oil and gas reservoirs in deep horizons of the Russko-Chaselsky Ridge (West Siberian Province)D. D. Sekerina¹   , M. M. Saitgaleev¹  , N. P. Senchina¹  , V. V. Glazunov¹  ,
D. F. Kalinin¹  , M. P. Kozlov^{2,3} , E. I. Ismagilova¹ ¹ *Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation*² *Geostra Scientific and Production Center LLC, Ufa, Russian Federation*³ *Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation* sekerinadar@mail.ru**Abstract**

The study of the geological setting features of the West Siberian Oil-and-Gas Province (OGP) is relevant for establishing the relationship between the spatial distribution of local strike-slip dislocations (Russko-Chaselsky Ridge) and the structure of the regional Pai-Khoi-Altai shearing zone. The work aims to identify the regularities of hydrocarbon accumulations location associated with fault systems of this zone. The paper presents the results of studies aimed at assessing the nature of the Earth crust disturbance within the regional Pai-Khoi-Altai shearing zone and the prerequisites for the occurrence of hydrocarbon accumulations within it. A complex set of regional and detailed geophysical data, including 2D and 3D seismic surveys and digital models of gravity and magnetic fields, was used as a factual basis. Based on these materials, cross-sections and maps were drawn showing the structural features of the sedimentary cover and consolidated basement, and an analysis of the nature of the Earth crust disturbance within the shearing zone was performed. It was revealed that the disjunctive dislocations of the regional Pai-Khoi-Altai shearing zone have a characteristic morphology described by a right-lateral strike-slip (dextral) fault strain ellipsoid. Within the Russko-Chaselsky Ridge, patterns were identified in the manifestation of strike-slips and graben-rifts systems caused by the tectonic activity of the regional Pai-Khoi-Altai shear. The shearing zone, en echelon faulting, and associated Riedel shears constitute a single, hierarchically subordinate system of the upper Earth crust disturbance. It is characterized by the development of an echelon system of disturbance zones in the platform cover and the upper part of the consolidated basement, interpreted as Riedel shears of prevailing submeridional strike. Based on the interpretation of seismic cross-sections along the Riedel shears, “flower structures” extending from the Lower Cretaceous to the top of the Paleozoic were distinguished. Structures of this type, located within the West Siberian Oil-and-Gas Province and represented by dislocation systems, may act as drainage in further substantiation of the mechanisms of migration and accumulation of hydrocarbons.

Keywords

shear structures (strike-slips), graben-rift, Western Siberia, oil and gas reservoirs, gravity anomalies, magnetic anomalies, seismic surveying, potential fields, Riedel shears

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude to Alexei S. Egorov, Professor of the Department of Geophysics, Doctor of Geographical Sciences, for his valuable help in preparing this paper.

Financing

The study was carried out as part of the government task FSRW-2024-0008 “Investigation of thermodynamic processes in the Earth in terms of hydrocarbon genesis at great depths.”

For citation

Sekerina D. D., Saitgaleev M. M., Senchina N. P., Glazunov V. V., Kalinin D. F., Kozlov M. P., Ismagilova E. I. Role of strike-slips and graben-rifts in controlling oil and gas reservoirs in deep horizons of the Russko-Chaselsky Ridge (West Siberian Province). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):109–117. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-399>

Введение

Особенности геологического строения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (НГП) рассматриваются нами в целях установления взаимосвязи характера пространственного положения локальных сдвиговых дислокаций (в пределах Русско-Часельского вала) с системой дислокаций региональной сдвиговой зоны в связи с задачей изучения закономерностей локализации углеводородов, приуроченных к сложной системе разрывных нарушений,

входящих в состав региональной Пай-Хой-Алтайской сдвиговой зоны [1, 2].

В пределах Западно-Сибирской НГП основная масса выявленных месторождений [3–5] углеводородов приурочена к меловым отложениям. В качестве нефтематеринской толщи рассматривается баженовский горизонт; коллектором выступают терригенные породы нижнемелового горизонта; флюидоупором являются аргиллиты подачимовского горизонта [6–8]. Механизм миграции углеводородов в значительной

мере может быть обусловлен развитием системы разрывных нарушений. Многие исследователи в своих работах изучали характер проявления сдвиговых дислокаций в консолидированном фундаменте и низах осадочного чехла Западно-Сибирской геосинеклизы [9, 10]. Так, А.Э. Конторович выделяет: главные сдвиговые дислокации разных направлений (I ранг), проникающие в нижнемеловые горизонты; второстепенные сдвиги (II ранг), картируемые в разрезе кайнозойских отложений [3, 11, 12].

В исследованиях А. И. Тимурзиева, выполненных на основе углубленного изучения результатов 2D и 3D сейсморазведки, сделаны выводы о том, что в северо-западной части Западно-Сибирской геосинеклизы широко проявлены региональные сдвиговые зоны [2, 9]. Автором отмечено, что результаты 2D сейсморазведки не всегда корректно отображают структуры горизонтального сдвига, в отличие от результатов детальной 3D сейсморазведки [11, 13]. Важной особенностью сдвигов, с его точки зрения, является практически повсеместное отсутствие вертикальных смещений на уровне кровли консолидированного фундамента.

Детальные исследования в пределах Еты-Пуровского месторождения показали, что региональные сдвиги обрамлены системой оперяющих дислокаций растяжения и сдвига. В пределах сдвиговых зон по данным 3D сейсморазведки автором выделены система сдвиговых дислокаций северо-западной ориентации и оперяющие сдвиговые дислокации северо-восточной направленности на крыльях и в пространствах, разделяющих главные сдвиги [9–13].

В наших исследованиях мы рассматриваем особенности глубинного строения региональной Пай-Хой–Алтайской сдвиговой зоны, которая, судя по комплексу геолого-геофизических данных, простирается от Алтае-Саянской складчатой области до Пай-Хоя. Зона включает главный шов и систему оперяющих разломов растяжения и сдвиги [14, 15] (рис. 1). Эта система тектонических дислокаций развивается на фоне консолидированного фундамента, сформированного разновозрастными образованиями Енисейской (байкалиды), Казахстанской и Алтае-Саянской (каледониды), Уральской и Центрально-Западно-Сибирской (герциниды) складчатых областей [14].

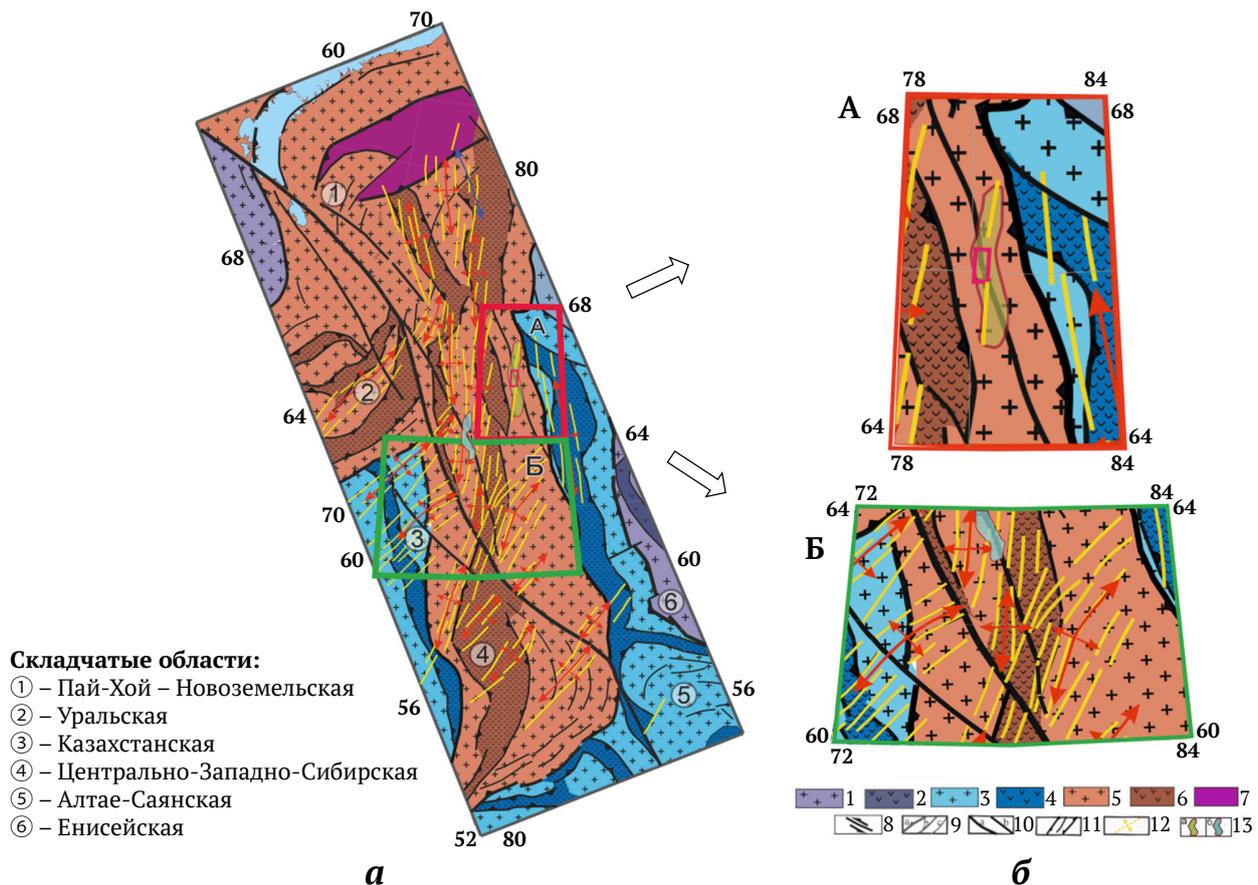


Рис. 1. Фрагмент карты глубинного строения консолидированного фундамента по Западно-Сибирской НПП с положением исследуемого полигона (А) – территория Русско-Часельского вала, и с контуром соседнего полигона (Б) – площадь, в пределах которой локализуется Етыпуровский вал [15]: 1–7 – структурно-вещественные подразделения консолидированной коры: 1–2 – эпикавказских складчатых областей (1 – блоки, 2 – межблоковые зоны), 3–4 – эпикаледонских складчатых областей (3 – блоки, 4 – межблоковые зоны), 5–6 – эпигерцинских складчатых областей (5 – блоки, 6 – межблоковые зоны), 7 – древних платформ; 8–11 – разрывные нарушения: 8 – направление сдвига Пай-Хой – Новоземельского разлома, 9 – оперяющие разрывные нарушения, 10 – границы межблоковых сутурных зон, 11 – границы рифтов, 12 – линейменты и направление развития рифтов, 13 – контуры валов (а – Русско-Часельского, б – Етыпуровского)

Фактологическая основа и методика исследований

Площадь наших детальных исследований (рис. 1, а), включающая контур Русско-Часельского вала, характеризуется высокой степенью геолого-геофизической изученности [16]. В качестве фактологической основы исследований нами были использованы результаты сейсморазведочных исследований, данные глубокого бурения и потенциальных геофизических полей, заимствованных из базы данных «Гравимаг» масштаба 1 : 200 000 [16, 17].

Площадь для локального масштаба подобрана в зависимости от контура сейсмических срезов. Для выполнения моделирования сдвиговых дислокаций, изучения строения фундамента и осадочного чехла в пределах рассматриваемого полигона нами был выполнен ряд процедур: расчет трансформант потенциальных полей [18], включая разложение на региональную и локальную составляющие, вычисление градиентов и т.д. [19, 20]. Для оценки амплитуд тектонических деформаций выполнена фильтрация сейсморазведочных срезов с применением поверхностно-согласованных процедур, адаптивного подавления шумов, 5D регуляризации и глубинной миграции Кирхгофа (с использованием OVT панелей), а также постпроцессинг¹ [21]. Кроме того, задействованы результаты решения обратных задач грави- и магниторазведки и др. (рис. 2) [21]. Развитие методологического подхода заключается в применении многоуровневой схемы обработки данных на региональном и локальном масштабном уровне в целях выявления характерных образов соподчиненности геологических структур.

В исследованиях А.И. Тимурзиева подобные структуры горизонтального сдвига выражены в осадочном чехле линейными, кулисообразными системами сбросов и взбросов; кулисы группируются в линейную зону СЗ простирания (310–320°) шириной от 1,0–1,5 км в низах осадочного чехла до 5,0–6,5 км в кровле верхнего мела; по простиранию шовная зона выполнена грабенами и впадинами присдвигового растяжения [9, 22].

Качественная интерпретация трансформант [18, 23] позволила выделить в центральной части детального участка вытянутые положительные аномалии гравитационного и магнитного полей субмеридионального простирания, которые мы связываем с рифтовыми структурами [23–25]. На составленных по этим данным структурно-тектонических схемах (см. рис. 2) сдвиговые дислокации I ранга имеют преимущественно северо-западное простирание, рифтовые структуры II ранга имеют северо-восточную ориентацию и локализованы в пространстве между главными сдвиговыми дислокациями [23, 26, 27].

Проявления этих дислокаций на детальном уровне в сейсмических срезах интервала баженовского отражающего горизонта (рис. 3) выражаются в грабен-рифтовых структурах, прослеживающихся в форме «трещин Риделя», ориентированных под углом 30° к оси главного сдвига [28, 29].

¹ Кадыров Р.И. Бассейновый анализ и моделирование нефтегазоносных систем. Казань: Изд-во Казанского (Приволжского) федерального университета; 2020. 33 с.

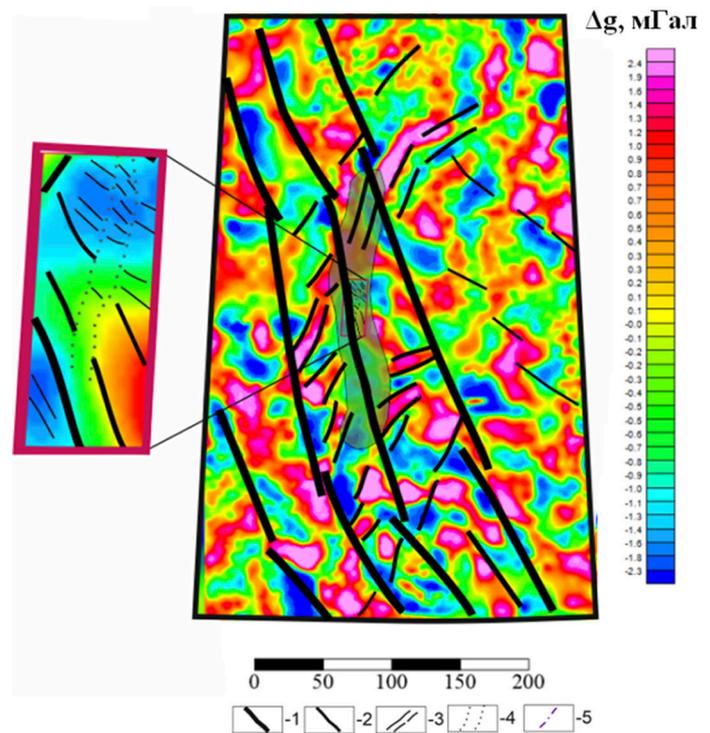


Рис. 2. Результаты интерпретации по потенциальным полям (по карте локальной составляющей гравитационного поля) [составлено авторами]: 1 – границы рифтовых структур (I ранг); 2 – сдвиг; 3 – рифтовые структуры (II ранг); 4 – предполагаемые границы развития трещин Риделя; 5 – осевое направление развития трещин Риделя

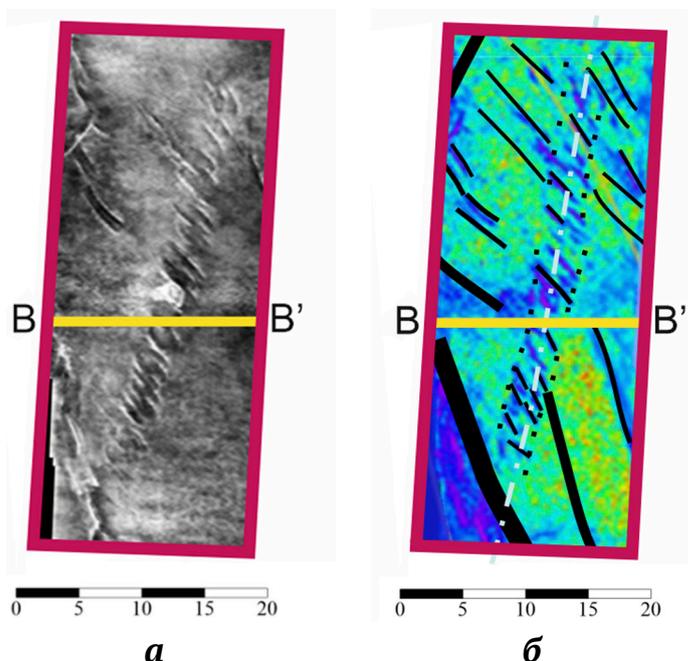


Рис. 3. Интерпретация в пределах детальной площади с положением сейсморазведочного профиля В–В' (выделен желтым цветом), выполненная на основе горизонтального среза суммарного 3D-куба в интервале баженовского отражающего горизонта (характерные размеры – км) – а, и схемы распределения амплитуд по сейсмическому срезу – б [составлено авторами]

Согласно мнению большинства исследователей главные сдвиговые дислокации имеют глубинное заложение [30, 31]. Структуры растяжения скорее всего имеют приповерхностный характер локализации [32]. В связи с этим нами были изучены геолого-геофизические разрезы по опорным сейсмическим профилям [11, 15]. В интервале 1000–2000 мс прослеживается система разрывных дислокаций, имеющая характерную морфологию «структуры цветка» (рис. 4) [14]. Выше этого интервала проявляются лишь антиклинальные складки, что косвенно подтверждает предположение о затухании интенсивности тектонических деформаций в верхнеюрских отложениях [31, 33].

Очевидно, что кулисы складываются в плоскость сдвига веерообразно [1, 34]. Проявление «цветковых» структур свидетельствует о сдвигах северо-восточного простирания [35, 36], в связи с чем можно предположить трансензионный характер сдвигов [13, 34]. Корни таких разломов прослеживаются ниже кровли фундамента (ниже 6 км) [37, 38].

Полученные результаты подтверждают, что проявление рифтов и сдвигов в форме трещин Риделя создает благоприятные условия для миграции и накопления углеводородов в ловушках [39]. Например, сколы могут служить каналами для миграции углеводородов, а также изменять механические свойства пород, что, в свою очередь, влияет на их способность удерживать нефть и газ, – и характеризуют новизну авторских исследований [2, 40].

Практическое применение полученных результатов заключается в использовании структурных факторов (трещины Риделя, «структура цветка») при решении прогнозных задач с использованием как геофизических, так и геолого-структурных критериев нефтегазоносности.

Заключение (выводы)

Таким образом, можно сделать вывод, что разрывные дислокации региональной Пай-Хой–Алтайской сдвиговой зоны имеют характерную морфологию, описываемую эллипсоидом деформаций правостороннего сдвига. Сдвиговая зона, оперяющие разломы и связанные с ними сколы Риделя составляют единую иерархически подчиненную систему деструкции верхней коры и являются перспективными для дальнейшего изучения механизмов миграции и аккумуляции углеводородов [5].

В пределах Русско-Часельского вала выявлены закономерности проявления системы сдвиговых дислокаций и грабен-рифтовых структур, обусловленных тектонической системой регионального Пай-Хой–Алтайского сдвига; для зоны характерно развитие эшелонированной системы зон деструкции платфор-

менного чехла и верхней части консолидированного фундамента, интерпретируемой как трещины Риделя с преобладанием субмеридионального простирания.

Главная сдвиговая зона в пределах исследуемого полигона характеризуется протяженностью 6 км и шириной 0,8 км, в разрезе прослеживается взаимосвязь разрывных нарушений, в распределении которых опознается структура «цветка», простирающаяся от нижнего мела до кровли палеозойских отложений и имеющая веерообразную ориентацию разломов (в пределах исследуемого полигона).

Структуры этого типа, локализованные в пределах Западно-Сибирской НПП и представленные системами дислокаций, могут выступать дренажом при дальнейшем обосновании механизмов миграции и аккумуляции месторождений углеводородов.

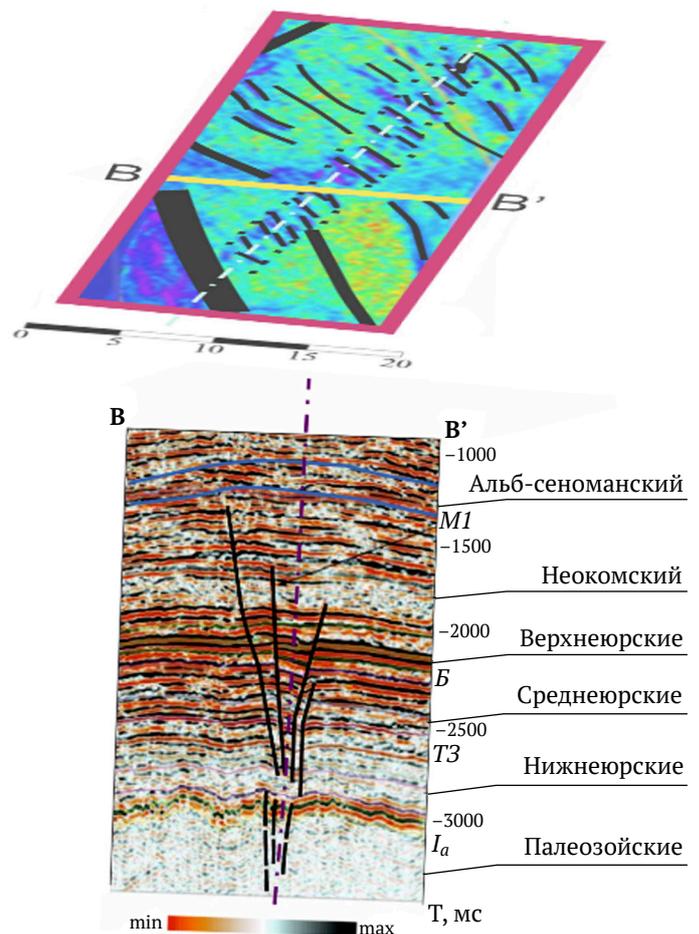


Рис. 4. Проявление «структуры цветка» и трещин Риделя в результате интерпретации сейсмических данных (см. условные обозначения к рис. 2) [составлено авторами]

Список литературы / References

1. Тимурзиев А.И. Механизм и структуры скрытой эксплозивной разгрузки глубинных флюидов в фундаменте и верхней части земной коры. В: *Углеводородный потенциал фундамента молодых и древних платформ. Перспективы нефтегазоносности фундамента и оценка его роли в формировании и переформировании нефтяных и газовых месторождений: материалы международной научной конференции*. Казань: Изд-во Казанского ун-та; 2006. С. 262–268.



- Timurziev A. I. Mechanism and structures of hidden explosive discharge of deep fluids in the basement and upper part of the Earth's crust. In: *Hydrocarbon potential of basement of young and ancient platforms. Prospects of basement petroleum potential and evaluation of its role in formation and reformation of oil and gas fields: proceedings of the International Scientific Conference*. Kazan: Kazan University Press; 2006. Pp. 262–268. (In Russ.)
2. Тимурзиев А. И. К созданию новой парадигмы нефтегазовой геологии на основе глубинно-фильтрационной модели нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции. *Геофизика*. 2007;(4):49–60. Timurziyev A. I. New paradigm of oil and gas geology based on deep filtration model of fluid formation and accumulation. *Journal of Geophysics*. 2007;(4):49–60. (In Russ.)
 3. Западная Сибирь. В: *Геология и полезные ископаемые России*. В шести томах. Т. 2. Гл. ред. В. П. Орлов. Ред. 2-го тома: А. Э. Конторович, В. С. Сурков. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ; 2000. 477 с. Western Siberia. In: *Geology and mineral resources of Russia*. In 6 volumes. Vol. 2. Chief editor: Orlov V. P. Volume eds.: Kontorovich A. E., Surkov V. S. St. Petersburg: VSEGEI Publ. House; 2000. 477 p.
 4. Фомин С. И., Говоров А. С. Стратегия формирования рабочей зоны карьеров на основе управления бортовым содержанием полезных компонентов в руде. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(11):165–179. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_11_0_165 Fomin S. I., Govorov A. S. Strategy of formation of operating space in open pit mines based on cut-off grade control. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(11):165–179. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_11_0_165
 5. Лебедева Е. А., Файбусович Я. Э., Назаров Д. В. и др. *Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Западно-Сибирская. Лист Q-44 – Тазовский*. Объяснительная записка. Минприроды России, Роснедра, ФГБУ «ВСЕГЕИ». СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ; 2020. 191 с. Lebedeva E. A., Faibusovich Ya. E., Nazarov D. V. et al. *State geological map of the Russian Federation scale 1 : 1,000,000. Third generation. West Siberian series. Sheet Q-44 – Tazovsky*. Explanatory note. Ministry of Natural Resources of Russia, Rosnedra, FGBU “VSEGEI”. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House; 2020. 191 p. (In Russ.)
 6. Конторович А. Э., Лотышев В. И., Мельников Н. В. и др. Нефтегазоносность платформенных областей Сибири. *Отечественная геология*. 2008;(2):85–96. Kontorovich A. E., Lotyshev V. I., Melnikov N. V. et al. Petroleum potential of Siberian platform regions. *Otechestvennaya Geologiya*. 2008;(2):85–96. (In Russ.)
 7. Сурков В. С., Трофимук А. А., Жеро О. Г. и др. Триасовая рифтовая система Западно-Сибирской плиты, ее влияние на структуру и нефтегазоносность платформенного мезозойско-кайнозойского чехла. *Геология и геофизика*. 1982;(8):3–15. Surkov V. S., Trofimuk A. A., Zhero O. G. Triassic rift system in the west Siberian plate and its bearing on the structure and petroleum potential of the platform Mesozoic-Cenozoic cover. *Geologiya i Geofizika*. 1982;(8):3–15. (In Russ.)
 8. Nefedov Yu., Griбанov D., Gasimov E. et al. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas province fields. *Reliability: Theory & Applications*. 2023;(SI 5):441–448. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-441-448>
 9. Гогоненков Г. Н., Кашик А. С., Тимурзиев А. И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири. *Геология нефти и газа*. 2007;(3):3–10. Gogonenkov G. N., Kashik A. S., Timursiyev A. I. Horizontal displacements of west Siberia's basement. *Geologiya i Geofizika*. 2007;(3):3–10. (In Russ.)
 10. Гогоненков Г. Н., Тимурзиев А. И. Сдвиговые деформации в чехле Западно-Сибирской плиты и их роль при разведке и разработке месторождений нефти и газа. *Геология и геофизика*. 2010;(3):384–400. (Перев. вер.: Gogonenkov G. N., Timurziev A. I. Strike-slip faults in the West Siberian basin: implications for petroleum exploration and development. *Russian Geology and Geophysics*. 2010;51(3):304–316. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.02.007>) Gogonenkov G. N., Timurziev A. I. Strike-slip faults in the West Siberian basin: implications for petroleum exploration and development. *Russian Geology and Geophysics*. 2010;51(3):304–316. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.02.007> (Orig. ver.: Gogonenkov G. N., Timurziev A. I. Strike-slip faults in the West Siberian basin: implications for petroleum exploration and development. *Geologiya i Geofizika*. 2010;(3):384–400. (In Russ.))
 11. Горелик Г. Д., Егоров А. С., Шуклин И. А., Ушаков Д. Е. Обоснование оптимального комплекса геофизических исследований глубинного строения района озера Восток. *Горный журнал*. 2024;(9):56–61. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.09> Gorelik G. D., Egorov A. S., Shuklin I. A., Ushakov D. E. Substantiation of optimal range of geophysical surveys to study deep structure of the Lake Vostok area. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(9):56–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.09>
 12. Прищепа О. М., Луцкий Д. С., Киреев С. Б., Синица Н. В. Термодинамическое моделирование как основа прогноза фазовых состояний углеводородных флюидов на больших и сверхбольших глубинах. *Записки Горного института*. 2024;269:815–832.



- Prishchepa O.M., Lutskii D.S., Kireev S.B., Sinita N.V. Thermodynamic modelling as a basis for forecasting phase states of hydrocarbon fluids at great and super-great depths. *Journal of Mining Institute*. 2024;269:815–832.
13. Тимурзиев А.И. Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: тектонофизический и флюидодинамический аспекты (в связи с нефтегазоносностью). Часть 1. *Глубинная нефть*. 2013;(4):561–605. Timurziev A.I. The Neotectonic shear tectonics of sedimentary basins: tectonophysical and fluid dynamics aspects (in connection with an oil-and-gas-bearing capacity). Part 1. *Glubinnaya Neft'*. 2013;(4):561–605. (In Russ.)
14. Егоров А.С. Особенности глубинного строения и вещественного состава геоструктур земной коры континентальной части территории России. *Записки Горного института*. 2015;216: 13–30. Egorov A.S. Deep structure and composition characteristics of the continental earth's crust geostuctures on the Russian Federation territory. *Journal of Mining Institute*. 2015;216:13–30. (In Russ.)
15. Egorov A.S., Antonchik V.I., Senchina N.P. et al. Impact of the regional Pai-Khoi-Altai strike-slip zone on the localization of hydrocarbon fields in Pre-Jurassic Units of West Siberia. *Minerals*. 2023;13(12):1511. <https://doi.org/10.3390/min13121511>
16. Лебедева Е.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Третье поколение. Карта дочетвертичных образований: Q-44 (Тазовский). Геологическая карта дочетвертичных образований. Западно-Сибирская серия, масштаб: 1 : 1000000, серия: Западно-Сибирская. Составлена: ФГБУ «ВСЕГЕИ»; 2020. Lebedeva E.A. *State Geological Map of the Russian Federation. Third generation. Map of pre-Quaternary formations: Q-44 (Tazovsky). Geological map of pre-Quaternary formations. West Siberian series, scale: 1 : 1,000,000, series: West Siberian*. Compiled by: FGBU "VSEGEI"; 2020.
17. Макеев С.М., Ануфриев А.Е. Гравиструктурные карты как новый инструмент анализа пластово-блокового строения Сибирской платформы. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2015;(1):69–77. Makeev S.M., Anufriev A.E. Gravity-structural maps as new tool to analyse the Siberian Platform bedded-block structure. *Geology and mineral resources of Siberia*. 2015;(1):69–77. (In Russ.)
18. Яковлева А.А., Мовчан И.Б., Мединская Д.К., Садыкова З.И. Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023;(11):198–215. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/11/4152> Yakovleva A.A., Movchan I.B., Medinskaya D.K., Sadykova Z.I. Quantitative interpretations of potential fields: from parametric recalculations to geostructural ones. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023;(11):198–215. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/11/4152>
19. Cochran J.R., Karner G.D. Constraints on the deformation and rupturing of continental lithosphere of the Red Sea: The transition from rifting to drifting. *Geological Society*. 2007;262:265–289. <https://doi.org/10.1144/sp282.13>
20. Таловина И.В., Мангал Ф., Смук Г.В., Крикун Н.С. Интерпретация геолого-геофизических данных для изучения глубинного строения Кабульского массива. *Горный журнал*. 2024;(9):68–77. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.11> Talovina I.V., Mangal F., Smuk G.V., Krikun N.S. Geological and geophysical data interpretation for deep structure study of the Kabul Massif. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(9):68–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.11>
21. Халиулин И.И., Шелихов А.П., Яицкий Н.Н. Анализ взаимосвязи между аномалиями потенциальных полей и структурным каркасом осадочного чехла. В: *Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. Воронеж, 27–30 января 2020 г.* Воронеж: Изд-во «Научная книга»; 2020. С. 288–290. Khalyulin I.I., Shelikhov A.P., Yaitsky N.N. Analysis of the relationship between potential field anomalies and the structural framework of the sedimentary cover. In: *Issues of theory and practice of geological interpretation of geophysical fields: proceedings of the 47th session of the International Scientific Seminar of D. G. Uspensky – V.N. Strakhov*. Voronezh, 27–30 January 2020. Voronezh: Nauchnaya Kniga Publ. Center; 2020. P. 288–290. (In Russ.)
22. Куликов П.К., Белоусов А.П., Латыпов А.А. Западно-Сибирская триасовая рифтовая система. *Геотектоника*. 1972;(6):79–87. Kulikov P.K., Belousov A.P., Latypov A.A. West Siberian Triassic rift system. *Geotektonika*. 1972;(6):79–87. (In Russ.)
23. Смирнов О.А., Бородкин В.Н., Лукашов А.В. и др. Региональная модель рифтогенеза и структурно-тектонического районирования севера Западной Сибири и Южно-Карской синеклизы по комплексу геолого-геофизических исследований. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2022;(1):1–18. https://doi.org/10.17353/2070-5379/1_2022 Smirnov O.A., Borodkin V.N., Lukashov A.V. et al. Regional model of riftogenesis and structural-tectonic area of the north of Western Siberia and the South Kara Syncline on the geological-geophysical research



- data. *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*. 2022;(1):1–18. https://doi.org/10.17353/2070-5379/1_2022
24. Харахинов В.В. Древние рифты Восточной Сибири и их нефтегазоносность. *Геология нефти и газа*. 2016;(4):3–17.
Kharakhinov V.V. Ancient rifts of Eastern Siberia and their petroleum potential. *Russian Oil and Gas Geology*. 2016;(4):3–17. (In Russ.)
25. Виноградов Ю.И., Хохлов С.В., Зигангиров Р.Р. и др. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением. *Записки Горного института*. 2024;266:231–245.
Vinogradov Y.I., Khokhlov S.V., Zigangirov R.R. et al. Optimization of specific energy consumption for rock crushing by explosion at deposits with complex geological structure. *Journal of Mining Institute*. 2024;266:231–245.
26. Сурков В.С., Смирнов Л.В. Строение и нефтегазоносность фундамента Западно-Сибирской плиты. *Отечественная геология*. 2003;(1):10–16.
Surkov V.S., Smirnov L.V. Geology and petroleum potential of the West-Siberian plate basement. *Otechestvennaya Geologiya*. 2003;(1):10–16.
27. Magoarou C.L., Hirsch K., Fleury C. Integration of gravity, magnetic, and seismic data for subsalt modeling in the Northern Red Sea. *Interpretation*. 2021;(9):507–521. <https://doi.org/10.1190/int-2019-0232.1>
28. Abdelfettah Y., Calvo M. Using highly accurate land gravity and 3D geologic modeling to discriminate potential geothermal areas: Application to the Upper Rhine Graben, France. *Geophysics*. 2019;(2):1MA–Z8. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0042.1>
29. Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Губин И.А. и др. Глубокопогруженные нефтегазовые системы нижнего палеозоя на востоке Сибирской платформы: геолого-геофизическая характеристика, оценка ресурсов углеводородов. *Записки Горного института*. 2024;269:721–737.
Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Gubin I.A. et al. Deep-buried Lower Paleozoic oil and gas systems in eastern Siberian Platform: geological and geophysical characteristics, estimation of hydrocarbon resources. *Journal of Mining Institute*. 2024;269:721–737.
30. Yanis M., Marwan N. Ismail Efficient Use of Satellite Gravity Anomalies for mapping the Great Sumatran Fault in Aceh Province. *Indonesian Journal of Applied Physics*. 2019;(2):61–67. <https://doi.org/10.13057/ijap.v9i2.34479>
31. Гурари Ф.Г., Девятков В.П., Демин В.И. и др. Геологическое строение и нефтегазоносность нижней-средней юры Западно-Сибирской провинции. Новосибирск: Наука; 2005. 156 с.
Gurari F.G., Devyatov V.P., Demin V.I. et al. *Geological structure and petroleum potential of the lower-middle Jurassic in the West Siberian Province*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 156 p. (In Russ.)
32. Новиков И.С., Жимулев Ф.И., Поспеева Е.В. Неотектоническая структура Салаира (юг Западной Сибири) и ее соотношение с докайнозойской системой разломов. *Геология и геофизика*. 2022;(1):3–19. <https://doi.org/10.15372/GiG2021113> (Перев. вер.: Novikov I.S., Zhimulev F.I., Pospeeva E.V. Neotectonic fault pattern of the Salair area (Southern West Siberia): relation with the pre-Cenozoic tectonic framework. *Russian Geology and Geophysics*. 2022;63(1):1–12. <https://doi.org/10.2113/RGG20204257>)
Novikov I.S., Zhimulev F.I., Pospeeva E.V. Neotectonic fault pattern of the Salair area (Southern West Siberia): relation with the pre-Cenozoic tectonic framework. *Russian Geology and Geophysics*. 2022;63(1):1–12. <https://doi.org/10.2113/RGG20204257> (Orig. ver.: Novikov I.S., Zhimulev F.I., Pospeeva E.V. Neotectonic fault pattern of the Salair area (Southern West Siberia): relation with the pre-Cenozoic tectonic framework. *Geologiya i Geofizika*. 2022;(1):3–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2021113>)
33. Prischepa O.M., Sinitza N.V. Prospects for Oil and Gas Bearing Potential of Paleozoic Basement of West Siberian Sedimentary Basin. *International Journal of Engineering*. 2025;38(05):1098–1107. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.05b.12>
34. Знаменский С.Е. Позитивная цветочная структура Яльчигуловского разлома на Южном Урале. *Геологический вестник*. 2019;(2):24–31. <https://doi.org/10.37539/230224.2023.94.10.001>
Znamensky S.E. The positive flower structure of the Yalchigulovsky fault in the Southern Urals. *Geologicheskii Vestnik*. 2019;(2):24–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.37539/230224.2023.94.10.001>
35. Дмитриевский А.Н., Шустер В.Л., Пунанова С.А., Самойлова А.В. Моделирование геологического строения и механизмов формирования и размещения скоплений нефти и газа в доюрских комплексах Западной Сибири. М.: ИПНГ РАН; 2007. 20 с.
Dmitrievskiy A.N., Shuster V.L., Punanova S.A., Samoilova A.V. *Modeling of geological structure and mechanisms of formation and distribution of oil and gas accumulations in pre-Jurassic complexes of Western Siberia*. Moscow: IPNG RAN; 2007. 20 p. (In Russ.)
36. Таловина И.В., Илалова Р.К., Бабенко И.А. Элементы платиновой группы как геохимические индикаторы при изучении полигенеза нефти. *Записки Горного института*. 2024;269:833–847.
Talovina I.V., Ilalova R.K., Babenko I.A. Platinum group elements as geochemical indicators in the study of oil polygenesis. *Journal of Mining Institute*. 2024;269:833–847.



37. Shi W., Mitchell N.C., Kalnins L.M., Izzeldin A.Y. Oceanic-like axial crustal high in the central Red Sea. *Tectonophysics*. 2018;747–748:327–342. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.011>
38. Fossen H. *Structural Geology*. Cambridge University Press; 2016. 2036 p.
39. McClay K., Bonora M. Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 2001;85(2):233–260. <https://doi.org/10.1306/8626c7ad-173b-11d7-8645000102c1865d>

Информация об авторах

Дарья Денисовна Секерина – кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры геофизики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3892-7947](https://orcid.org/0000-0003-3892-7947), Scopus ID [57221599365](https://scopus.com/authorid/57221599365); e-mail sekerinadar@mail.ru

Малик Маратович Саитгалеев – аспирант кафедры геофизики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9859-5799](https://orcid.org/0000-0002-9859-5799), Scopus ID [57210747223](https://scopus.com/authorid/57210747223); e-mail s215022@stud.spmi.ru

Наталья Петровна Сенчина – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5458-648X](https://orcid.org/0000-0001-5458-648X), Scopus ID [56401906000](https://scopus.com/authorid/56401906000); e-mail Senchina_NP@pers.spmi.ru

Владимир Владимирович Глазунов – доктор технических наук, профессор кафедры геофизики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5816-0507](https://orcid.org/0000-0001-5816-0507), Scopus ID [57195385942](https://scopus.com/authorid/57195385942); e-mail Glazunov_VV@pers.spmi.ru

Дмитрий Федорович Калинин – доктор технических наук, профессор кафедры геофизики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-0597-263X](https://orcid.org/0000-0002-0597-263X), Scopus ID [57668309500](https://scopus.com/authorid/57668309500); e-mail kalinin_df@pers.spmi.ru

Михаил Павлович Козлов – ведущий геофизик отдела обработки данных, ООО НПЦ «Геостра», г. Уфа, Российская Федерация; аспирант кафедры геофизики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация; ORCID [0009-0006-2241-1400](https://orcid.org/0009-0006-2241-1400); e-mail kozlovmp@bngf.ru

Эмилия Ильдаровна Исмагилова – студент кафедры геофизики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID [0009-0004-9535-0907](https://orcid.org/0009-0004-9535-0907); e-mail amelyism@gmail.com

Information about the authors

Daria D. Sekerina – Cand. (Geol.-Miner.), Assistant Professor of the Department of Geophysics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3892-7947](https://orcid.org/0000-0003-3892-7947), Scopus ID [57221599365](https://scopus.com/authorid/57221599365); e-mail sekerinadar@mail.ru

Malik M. Saitgaleev – PhD-Student of the Department of Geophysics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9859-5799](https://orcid.org/0000-0002-9859-5799), Scopus ID [57210747223](https://scopus.com/authorid/57210747223); e-mail s215022@stud.spmi.ru

Natalia P. Senchina – Cand. (Geol.-Miner.), Assistant Professor of the Department of Geophysics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5458-648X](https://orcid.org/0000-0001-5458-648X), Scopus ID [56401906000](https://scopus.com/authorid/56401906000); e-mail Senchina_NP@pers.spmi.ru

Vladimir V. Glazunov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Geophysics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5816-0507](https://orcid.org/0000-0001-5816-0507), Scopus ID [57195385942](https://scopus.com/authorid/57195385942); e-mail Glazunov_VV@pers.spmi.ru

Dmitrii F. Kalinin – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Geophysics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0000-0002-0597-263X](https://orcid.org/0000-0002-0597-263X), Scopus ID [57668309500](https://scopus.com/authorid/57668309500); e-mail kalinin_df@pers.spmi.ru

Mikhail P. Kozlov – Lead Geophysicist, Seismic Data Processing Department, Geostra Scientific and Production Center LLC, Ufa, Russian Federation; PhD-Student of the Department of Geophysics, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation; ORCID [0009-0006-2241-1400](https://orcid.org/0009-0006-2241-1400); e-mail kozlovmp@bngf.ru

Emilia I. Ismagilova – Student of the Department of Geophysics, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID [0009-0004-9535-0907](https://orcid.org/0009-0004-9535-0907); e-mail amelyism@gmail.com

Поступила в редакцию 28.02.2025

Поступила после рецензирования 03.05.2025

Принята к публикации 04.05.2025

Received 28.02.2025

Revised 03.05.2025

Accepted 04.05.2025



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обзорная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-368>

УДК 553.04:553.484

**Минерально-сырьевая база кобальта России:
состояние, возможности развития**Г.Ю. Боярко   , Л.М. Болсуновская  Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Российская Федерация gub@tpu.ru**Аннотация**

Актуальность работы обусловлена необходимостью получения максимально полной картины состояния минерально-сырьевой базы кобальта Российской Федерации. Цель: изучение состояния минерально-сырьевой базы кобальта России, пространственного размещения месторождений кобальта по типам рудных формаций и в пределах рудных провинций, перспектив национальной добычи кобальта. Методы: статистический, графический, логический. Результаты: Представлена сводная карта-схема России, включающая 25 кобальторудных провинций и выборку из 150 наиболее значимых месторождений кобальта различных рудных формаций, перспективных объектов и площадей. Даны характеристики основных рудных формаций, месторождения кобальта которых имеются в России, а также кобальторудных провинций и месторождений вне провинций. В России добыча кобальта производится в качестве попутного продукта из сульфидных медно-никелевых руд (в 2022 г. – 9,2 тыс. т). В России по состоянию на 01.01.2023 г. учтено 1562,3 тыс. т балансовых запасов кобальта. Наибольшие объемы запасов кобальта приходятся на медно-никелевую (62,5 %) и силикатно-кобальто-никелевую (19,9 %) формации и 17,6 % на все остальные рудные формации. По провинциям на Норильскую приходится 47,0 % от российских запасов кобальта, Уральскую – 24,7 %, Кольскую – 7,4 %, Шорско-Хакасскую – 7,4 %, Восточно-Саянскую – 6,1 %, на остальные – 7,7 %. За Российской Федерацией закреплены разведочные районы международного морского дна в Тихом океане, где ведутся геологические исследования формации кобальтоносных марганцевых корок на Магеллановых горах (ресурсы 110 тыс. т Co, 0,50–0,61 % Co) и формации железомарганцевых конкреций рудного поля Клариян-Клиппертон (ресурсы 985 тыс. т Co, 0,22–0,29 % Co). На территории Российской Федерации несмотря на значительную базу подготовленных запасов кобальта отсутствует системный учет его прогнозных ресурсов, что осложняет планирование геологоразведочных работ на кобальт. Предлагается произвести системную ревизию имеющихся геологических и геохимических материалов по известным проявлениям и точкам кобальтовой минерализации с оценкой прогнозных ресурсов по единой методике и собственно составить баланс прогнозных ресурсов кобальта по России. На месторождениях силикатно-кобальт-никелевой формации, где ранее их оценка производилась исходя из задачи максимизации запасов никеля, предлагается произвести переоценку с геометризацией распределения кобальта в качестве главного компонента руд. Такие объекты становятся управляемыми при планировании добычи именно кобальта. Развитие технологий подземного и кучного выщелачивания, а также биовыщелачивания кобальтсодержащих руд позволит вовлекать в эксплуатацию кобальторудные объекты с низким качеством руд и небольшими запасами, а также техногенные образования продуктов обогащения и металлургического передела. Наиболее интересными для геотехнологических способов добычи кобальта являются месторождения силикатно-кобальт-никелевой формации.

Ключевые слова

стратегическое сырье, кобальт, рудные формации, рудные провинции, балансовые запасы, ресурсы, главные и попутные компоненты, обзор

Для цитированияBoyarko G. Y., Bolsunovskaya L. M. Mineral resource base of Russia's cobalt: current state and development prospects. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):118–147. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-368>



GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Review paper

Mineral resource base of Russia's cobalt: current state and development prospectsG. Y. Boyarko   , L. M. Bolsunovskaya  

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

 gub@tpu.ru**Abstract**

The *relevance* of this study stems from the need to obtain a comprehensive picture of the state of the cobalt mineral resource base of the Russian Federation. *Objective*: to examine the current state of Russia's cobalt mineral resource base, the spatial distribution of cobalt deposits by ore formation types and within ore provinces, and the prospects for national cobalt production. *Methods*: statistical, graphical, and logical analysis. *Results*: a consolidated schematic map of Russia is presented, featuring 25 cobalt-bearing provinces and a sample of 150 of the most significant cobalt deposits across various ore formations, along with prospective sites and areas. Key characteristics are provided for the main ore formations hosting cobalt deposits in Russia, as well as for cobalt-bearing provinces and deposits outside these provinces. In Russia, cobalt is extracted as a by-product from sulfide copper-nickel ores (9.2 Kt in 2022). As of January 1, 2023, Russia's balance reserves of cobalt totaled 1,562.3 Kt. The largest volumes of cobalt reserves are associated with the copper-nickel formation (62.5%) and the silicate-cobalt-nickel formation (19.9%), with the remaining 17.6% distributed among all other ore formations. By province, the Norilsk province accounts for 47.0% of Russia's cobalt reserves, the Ural province – 24.7%, the Kola and Shoria-Khakass provinces – 7.4% each, the Eastern Sayan province – 6.1%, and all other provinces – 7.7%. The Russian Federation has been allocated exploration areas on the international seabed in the Pacific Ocean, where geological surveys are underway in the cobalt-rich ferromanganese crust formation of the Magellan Mountains (resources of 110 Kt Co, with 0.50–0.61% Co) and in the ferromanganese nodule formation of the Clarion-Clipperton ore field (resources of 985 Kt Co, with 0.22–0.29% Co). Despite a substantial base of prepared cobalt reserves, Russia lacks a systematic accounting of forecast cobalt resources, complicating the planning of geological exploration for cobalt. A systematic review of existing geological and geochemical data on known occurrences and points of cobalt mineralization is proposed, with the aim of assessing forecast resources using a unified methodology and producing a consolidated forecast resource balance for cobalt in Russia. For deposits of the silicate-cobalt-nickel formation, where previous assessments were based on maximizing nickel reserves, a reassessment is proposed with 3D special modeling of cobalt distribution as the primary ore component. Such deposits can then be managed specifically for cobalt production. Advancements in underground and heap leaching technologies, as well as bioleaching of cobalt-bearing ores, will enable the development of cobalt deposits with low-grade ores and small reserves, as well as the reprocessing of technogenic materials derived from beneficiation and metallurgical processes. The most promising targets for cobalt extraction using in-situ leaching, heap leaching, and bioleaching technologies are the deposits of the silicate-cobalt-nickel formation.

Keywords

strategic raw materials, cobalt, ore formations, ore provinces, balance reserves, resources, primary and by-product components, review

For citationBoyarko G. Y., Bolsunovskaya L. M. Mineral resource base of Russia's cobalt: current state and development prospects. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):118–147. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-368>**Введение**

Кобальт находит применение во множестве приложений: в катодах и анодах электрических батарей и аккумуляторов (оксид кобальта), катализаторах окисления (ацетаты, карбоксилы и карбонилы кобальта), пигментах и красителях синего цвета (фосфаты и алюминаты кобальта), жаропрочных (виталлиум, кермет), твердых (стеллит, победит) и магнитных (альнико) сплавов, составе порошков упрочняющего напыления и сплавах. Мировое потребление кобальта в 2022 г. составило 187 тыс. т [1] и продолжает расти на фоне роста спроса на аккумуляторные батареи (рис. 1). Главными странами по добыче кобальта являются Респуб-

лика Конго (76 % мировой добычи), Индонезия (9,7 %), Россия (3,0 %), Австралия (2,0 %) и Филиппины (1,9 %). Рынок кобальта является рискованным вследствие того, что собственными кобальтовыми месторождениями крайне мало, а поставляемый для реализации кобальт является лишь попутным компонентом на разрабатываемых медных, медно-никелевых и силикатно-никелевых месторождениях. Вследствие этого возможности изменения объемов предложения кобальта крайне ограничены, что и приводило к ценовым кризисам потребления кобальта (всплесков его цен) в 1978 г. (война в Заире [ныне Республика Конго]) и в 2017 г. (взрывной рост спроса на элементы питания) [2, 3].



Рис. 1. Структура мирового потребления кобальта в 2022 г. [1]

В России кобальт относится к группе стратегических полезных ископаемых, причем объемы его производства не критичны, поскольку значительно превышают его национальное потребление. Тем не менее сама проблема слабой управляемости объемов предложения кобальта в России имеет место ввиду его добычи как попутного компонента из руд месторождений медно-никелевой формации [4]. Несмотря на значительные учтенные балансовые запасы кобальта планирование увеличения его добычи при развитии отрасли производства литий-ионных аккумуляторных батарей [5] будет затруднено для новых проектов разработки комплексных медно-никелевых, силикатно-никелевых, железорудных и колчеданных месторождений, где значимость кобальта вторична. Следует отметить факт отсутствия сводного баланса прогнозных ресурсов по Российской Федерации, а также разную степень авторских подсчетов запасов и ресурсов кобальта по отдельным месторождениям. Учитывая мировые тенденции роста потребления кобальта и возможного резкого увеличения его потребности в России, следует определиться с возможностями минерально-сырьевой базы кобальта Российской Федерации, что и осуществлено в проведенном ниже обзоре.

Методика исследований

С целью изучения российской минерально-сырьевой базы кобальта были собраны данные по запасам и прогнозным ресурсам кобальтовых и кобальтсодержащих месторождений по состоянию на 01.01.2023 г. Работа с источниками информации: Государственные доклады Министерства природных ресурсов и экологии России¹, Справки о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы регионов

¹ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. МПР РФ; 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

Российской Федерации², Паспорта Государственного кадастра месторождений и проявлений полезных ископаемых РФ³ и публикации по ресурсам и месторождениям кобальта в открытой печати. Единицы измерения ресурсов, запасов и добычи кобальта – метрические тонны 100 % Со. На общую схематическую карту России вынесены кобальторудные провинции и сведены наиболее значимые месторождения кобальта различных рудных формаций, перспективные объекты и площади для геологоразведочных работ на кобальт. Рассмотрены возможности развития добычи кобальта с применением инновационных технологий добычи и переработки руд, содержащих кобальт [6]. Произведен анализ состояния балансовых запасов по рудным формациям и кобальторудным провинциям.

Состояние минерально-сырьевой базы кобальта России

Россия занимает 6-е место в мире по запасам кобальта после Республики Конго, Австралии, Индонезии, Кубы и Филиппин, 3-е место по добыче из недр после Республики Конго и Индонезии, 6-е место по производству рафинированного кобальта после Китая, США, Финляндии, Канады, Японии и Норвегии [4, 7]. Основу сырьевой базы кобальта России составляют объекты сульфидного медно-никелевого и силикатно-кобальт-никелевого геолого-промышленных типов. Добыча кобальта как попутного компонента в настоящее время осуществляется только из руд сульфидных медно-никелевых месторождений, добыча на силикатно-кобальт-никелевых месторождениях не ведется с 2012 г., а из мышьяково-кобальтовых – с 1991 г. Балансовые запасы кобальта учтены также на разрабатываемых медно-колчеданных и скарновых железорудных месторождениях, но извлечение попутного кобальта на них не ведется по технологическим и экономическим соображениям.

На основе собранных данных составлены:

- обзорная карта кобальторудных провинций, основных месторождений и проявлений кобальта России (рис. 2);
- диаграммы по объемам запасов кобальта (2021 г.) по типам рудных формаций (рис. 3) и провинциям (рис. 8);
- диаграммы по объемам запасов кобальта по провинциям отдельных рудных формаций (рис. 4).

Ниже приводятся характеристики кобальторудных формаций, известных на территории Российской Федерации, а также выделенных кобальторудных провинций.

² 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>

³ Паспорта месторождений кобальта. Российский федеральный геологический фонд. Единый фонд геологической информации о недрах. Реестр первичной и интерпретируемой информации. 2023. URL: <https://efgi.ru/>

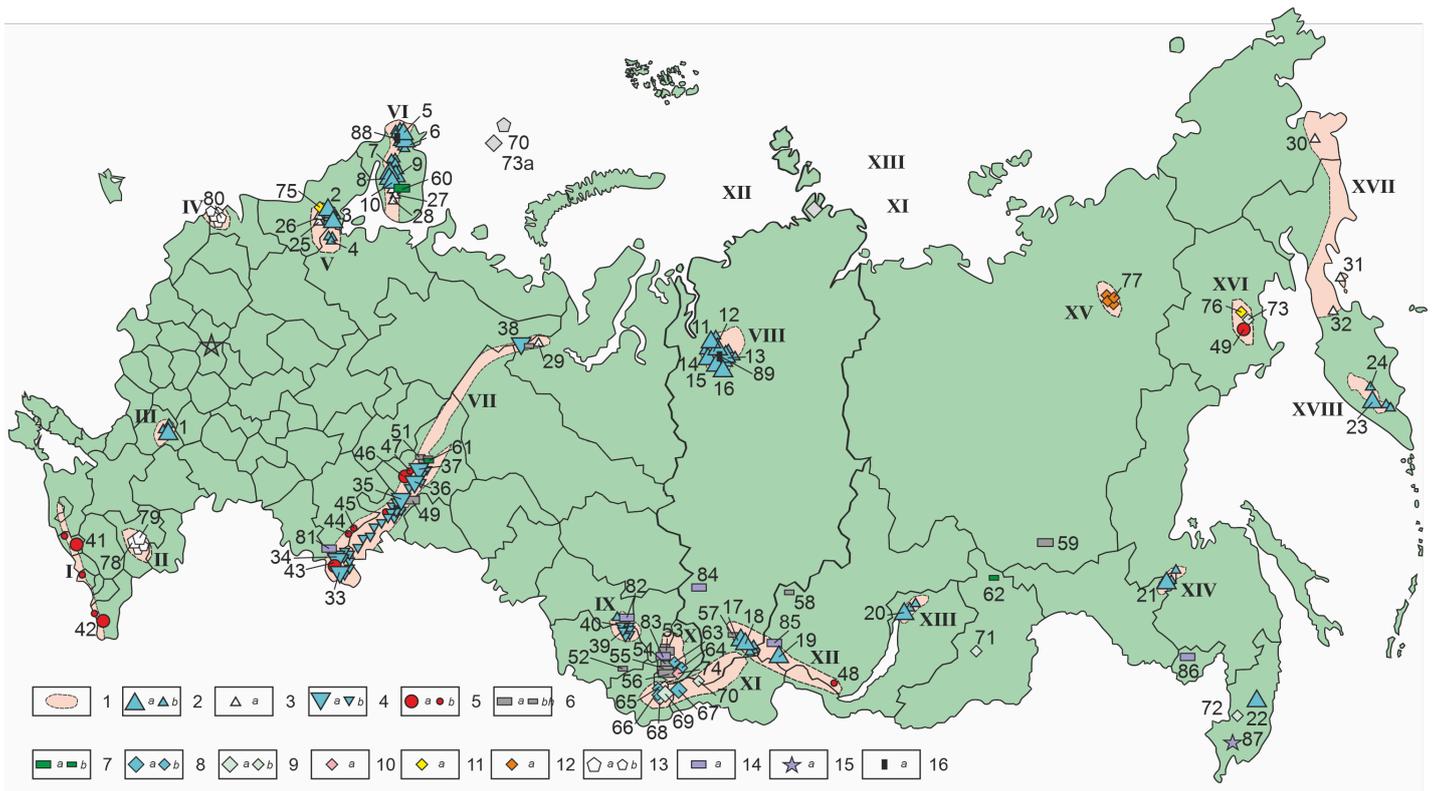


Рис. 2. Кобальторудные провинции, месторождения и проявления кобальта по геолого-технологическим типам:

1 – кобальторудные провинции; 2–13 – геолого-технологические типы кобальтовых месторождений (а – запасы + ресурсы свыше 10 тыс. т Со, б – 1–10 тыс. т Со): 2 – кобальтоносные медно-никелевые, 3 – кобальтсодержащие малосульфидные платинометалльные, 4 – силикатные кобальт-никелевые, 5 – кобальтсодержащие колчеданные, 6 – кобальтсодержащие скарново-железорудные, 7 – кобальтсодержащие титаномагнетитовые, 8–12 – мышьяково-кобальтовые (8 – кобальт-никелевые, 9 – висмут-кобальтовые, 10 – собственно мышьяково-кобальтовые, 11 – золото-серебряные, 12 – олово-вольфрамовые), 13 – кобальтсодержащие урановые, 14 – кобальтсодержащие марганцеворудные; 15 – кобальт-железо-марганцевые корки и конкреции; 16 – техногенные кобальторудные провинции: I – Северо-Кавказская, II – Ергенинская, III – Воронежская, IV – Прибалтийская, V – Карельская, VI – Кольская, VII – Уральская, VIII – Норильская, IX – Салаирская, X – Шорско-Хакасская, XI – Алтае-Западно-Саянская, XII – Восточно-Саянская, XIII – Северо-Байкальская, XIV – Джугджурская, XV – Яно-Адычанская, XVI – Сеймчанская, XVII – Корякская, XVIII – Камчатская.

Кобальтовые месторождения и проявления: 1–24 – кобальт-медно-никелевые (1 – Еланское, 2 – Педрореченское, 3 – Семчозерское, 4 – Волошовское, 5 – Ждановское, 6 – Тундровое, 7 – Сопчуайвенч, 8 – Поаз, 9 – Нюд-Морошковое, 10 – Ниттис-Кумужья-Травяная, 11 – Октябрьское-Cu-Ni, 12 – Талнахское, 13 – Норильск-1, 14 – Масловское, 15 – Черногорское, 16 – Вологодчанское, 17 – Кингашское, 18 – Верхнекингашское, 19 – Токты-Ой, 20 – Чайское, 21 – Кун-Манье, 22 – Ариадное, 23 – Дукукское, 24 – Шануч); 25–32 – кобальтсодержащие малосульфидные платинометалльные (25 – Шалозерское, 26 – Викша, 27 – Киевей, 28 – Мончетундровское, 29 – Пятиреченское, 30 – Майницкая, 31 – Валагинско-Карагинская, 32 – Снежное); 33–48 – силикатно-кобальт-никелевые (33 – Буруктаальское, 34 – Новокиевское, 35 – Сахаринское, 36 – Елизаветинское, 37 – Серовское, 38 – Ярней, 39 – Белининское, 40 – Александровское); 41–49 – кобальтсодержащие колчеданные (41 – Худесское, 42 – Кизил-Дере, 43 – Гайское, 44 – Дергамышское, 45 – Ивановское, 46 – Саумское, 47 – Пышминско-Ключевское, 48 – Савинское, 49 – Дедгэнрэкэн); 50–59 – кобальтоносные скарново-железорудные (50 – Теченское, 51 – Песчанское, 52 – Чесноковское, 53 – Таштагольское, 54 – Анзасское, 55 – Абаканское, 56 – Волковское Fe, 57 – Изыгское, 58 – Октябрьское-Fe, 59 – Таежное); 60–62 – кобальтсодержащие титаномагнетитовые (60 – Магазин-Мусюр, 61 – Волковское Fe-V-Cu, 62 – Чинейское); 63–77 – мышьяково-кобальтовые месторождения: 63–67 – кобальт-никелевые (63 – Базасское, 64 – Бутрахтинское, 65 – Атбаши, 66 – Курузек, 67 – Ховуаксинское), 68–73 – висмут-кобальтовые (68 – Янтау, 69 – Кара-Кульское, 70 – Перевальное, 71 – Уронайское, 72 – Белогорское, 73 – Верхне-Сеймчанское, Ветровое), 74 – Хараджувское собственно мышьяково-кобальтовое, 75–76 – кобальтоносные золото-серебряные (75 – Орехозеро, 76 – Подгорное), 77 – Алыс-Хая кобальтоносное олово-вольфрамовое; 78–80 – кобальтоносные урановые (78 – Богородское, 79 – Шаргадыкское, 80 – Куммоловское); 81–86 – кобальтсодержащие марганцеворудные (81 – Тетраук, Зианчуринское, 82 – Матюжиха, 83 – Селезенское, 84 – Мазульское, Битятское, Буткеевское-2, Цепеляевское, 85 – Каменское, Рудное, Западный, 86 – Южно-Хинганское, Биджанское); 87 – проявление континентальных кобальто-железо-марганцевых корок Павловское; 88–89 – техногенные месторождения (88 – отвалы Аллареченского медно-никелевого месторождения, 89 – хвостохранилище Норильской ОФ, озеро Береговое)



Рис. 3. Распределение балансовых запасов кобальта Российской Федерации по кобальторудным формациям по состоянию на 2021 г.

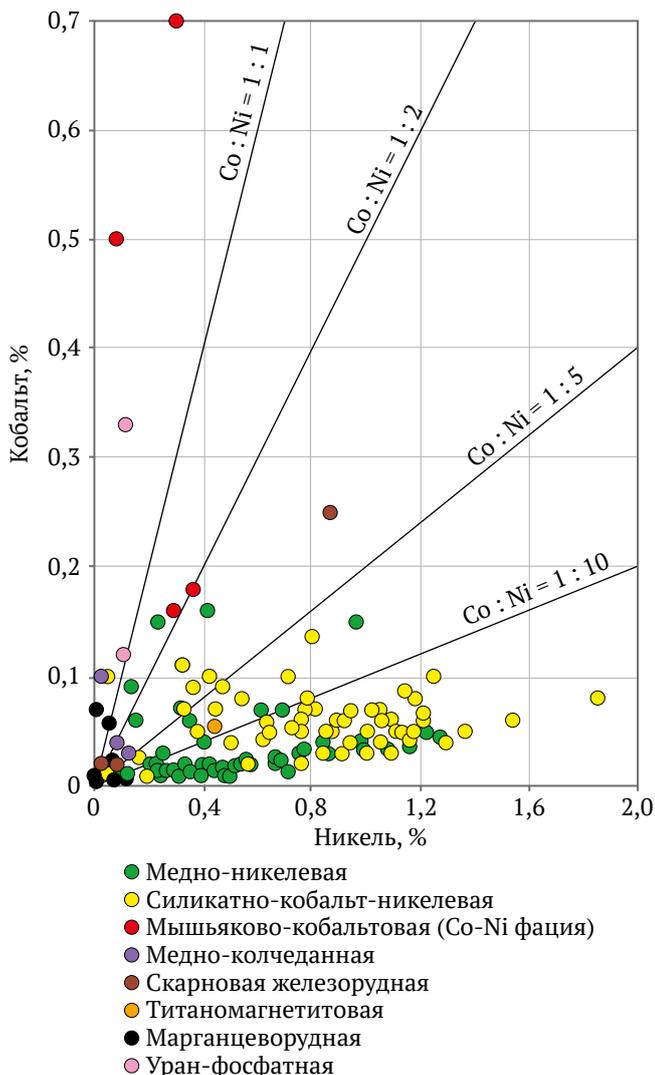


Рис. 4. Диаграмма средних содержаний кобальта и никеля на месторождениях по рудным формациям

Формации кобальтовых месторождений

Кобальторудные формации разделяются на собственно кобальтовые, где кобальт является главным (наиболее ценным) сырьевым компонентом, и кобальтсодержащие, где кобальт лишь попутный компонент. К первой группе относятся эндогенная мышьяково-кобальтовая формация и биогенная формация кобальтовых корок океанических возвышенностей. Во вторую входят кобальтсодержащие эндогенные медно-никелевая и малосульфидная платинометаллическая, медноколчеданная, скарновая железорудная и ванадиево-титаномагнетитовая, урано-фосфатная, марганцеворудная формации, а также экзогенная силикатно-кобальт-никелевая. На базе разрабатываемых месторождений разных формаций в отвальном хозяйстве и в условиях выборочной разработки формируются техногенные кобальтоносные образования, формируя тем самым месторождения техногенной формации.

В настоящее время в разработке на кобальт находятся только комплексные месторождения медно-никелевой формации, ранее разрабатывались месторождения силикатно-кобальт-никелевой формации в Уральской, мышьяково-кобальтовой формации в Алтае-Западно-Саянской и Сеймчанской провинциях.

На реально разрабатываемые месторождения кобальтсодержащих медно-никелевых и силикатно-кобальт-никелевых формаций суммарно приходится 82,5 % балансовых запасов кобальта России, на ранее разрабатываемые месторождения собственно же кобальтовой (мышьяково-кобальтовой) формации – всего 3,0 % (см. рис. 3). Соответственно, управление планированием роста предложения кобальта ввиду имеющихся малых объемов подготовленных запасов кобальта весьма проблематично.

Анализ пространственного размещения месторождений, различных по вещественному составу, большинства эндогенных кобальторудных формаций указывает на их пространственную приуроченность к полям развития основных-ультраосновных комплексов, исключая лишь месторождения и проявления Сеймчанской и Яно-Одычанской провинций. Но даже в последних предполагается их возможное наличие на глубине ввиду наличия сидерофильных элементов (Co, Ni, Cr) в составе рудных образований [8]. Практически в рудах всех кобальтовых и кобальтсодержащих формаций совместно с кобальтом имеется в наличии и никель, причем большей частью в значительно более высокой концентрации (см. рис. 4).

В породах офиолитовых комплексов кобальт концентрируется в пентландите (до 3 % Co), пирротине (до 0,9 % Co) и пирите (до 1,8 % Co), но большая часть породного кобальта находится в виде небольшой примеси в оливине (0,008 % Co), пироксенах и амфиболах (до 0,004 % Co) [9, 10]. В процессе гидротермальной проработки основных и ультраосновных пород, особенно при эндогенной серпентинизации оливина, кобальт легко переходит в растворы и участвует в формировании новых рудных парагенезисов с кобальтоносным пиритом в медно-колчеданной фор-

мации [11], арсенидной и сульфоарсенидной минерализации мышьяково-кобальтовой формации [9, 10], кобальтопиритной и кобальтиновой минерализации в образованиях скарновой железорудной [12] и ванадиево-титаномагнетитовой формациях.

В гипергенных условиях при выветривании пород офиолитового комплекса в процессе экзогенной серпентинизации силикатов и окислении сульфидов мобилизуются и кобальт, и никель с формированием рудных образований силикатно-кобальт-никелевой формаций с накоплением кобальта в нонтроните и гарниерите, а также сорбированный на гетите, асболане и других окислах и гидроокислах марганца [13, 14]. В условиях дальней инфильтрации кобальт высаживается на химические барьеры диагенетических сульфидов уран-фосфатной формации [35] и на образования марганцеворудной формации [9].

По величине отношений содержаний $Co : Ni$ (табл. 1) наибольшие их значения приходятся на марганцеворудную, медно-колчеданную, урано-фосфатную и мышьяково-кобальтовую формации, в которых основными концентраторами кобальта являются соответственно по формациям – оксиды марганца, пирит, органическое вещество, арсениды и сульфоарсениды кобальта. Наименьшие значения соотношений содержаний $Co : Ni$ приходятся на образования медно-никелевой формации с минералом-концентратором кобальта – петландитом и силикатно-кобальт-никелевой формации с минералами-концентраторами никеля и кобальта – нонтронитом и гарниеритом.

Таблица 1

Отношение содержаний кобальта и никеля по кобальторудным формациям

Формация	Отношение содержаний $Co : Ni$
Медно-никелевая	$\frac{0,088^*}{0,02-0,67}$
Силикатно-кобальт-никелевая	$\frac{0,089}{0,01-0,34}$
Железорудная	$\frac{0,51}{0,25-1,0}$
Титаномагнетитовая	$\frac{0,315}{0,13-0,5}$
Мышьяково-кобальтовая	$\frac{2,08}{0,5-6,25}$
Медно-колчеданная	$\frac{2,1}{1,2-3,0}$
Уран-фосфатная	$\frac{1,92}{0,25-5,0}$
Марганцеворудная	$\frac{6,92}{0,35-11,65}$

* – в знаменателе интервал значений, в числителе – среднее значение.

Медно-никелевые формации в настоящее время являются основным источником кобальта в России и представлены рядом эксплуатируемых и разведываемых месторождений. Сульфидные медно-никелевые месторождения пространственно и генетически связаны с основными и ультраосновными магматическими массивами в структурах окраин платформ (норильский тип) и кратонов (печенгский тип), а также в центральных частях складчатых областей [15]. Главными товарными продуктами на этих месторождениях являются медь и никель, а кобальт, платиноиды, селен и теллур извлекаются как попутные компоненты [16].

По учетным запасам кобальта на медно-никелевую формацию приходится 62,5 % российских балансовых запасов (977 тыс. т Co)⁴ (см. рис. 2) при среднем содержании кобальта по месторождениям до 0,19 %. В Российской Федерации известно 73 месторождения и проявления медно-никелевых руд, на которых учтены запасы или ресурсы кобальта, в т.ч. свыше 1 тыс. т – 50, а свыше 10 тыс. т – 25 объектов. Добыча медно-никелевых руд и извлечение из них кобальта осуществляется на месторождениях Норильской и Кольской (ПАО «Норильский никель»), Камчатской (АО «НПК «Геотехнология») провинций, подготавливаются к эксплуатации содержащие кобальт медно-никелевые месторождения Восточно-Саянской, Джугджурской и Воронежской провинций (рис. 5, а). В 2022 г. в России из руд кобальт-медно-никелевой формации было добыто 12 651 т кобальта, большая часть которого направлена на экспорт⁵.

Главным кобальтсодержащим минералом руд медно-никелевых месторождений является петландит, содержащий от 0,1 до 3,0 % кобальта, который изоморфно замещает никель и железо. В рудах некоторых сульфидных медно-никелевых месторождений присутствует кобальтсодержащий пирит с содержанием кобальта до 1,8 %.

К медно-никелевой формации примыкает **мало-сульфидная платинометалльная формация**, в которой в рассеянной сульфидной минерализации медно-никелевая составляющая играет второстепенную роль, а наибольшую экономическую значимость приобретает минерализация платиновых металлов [17–19]. В месторождениях и проявлениях этой формации имеет место и попутный кобальт (при среднем содержании до 0,07 %). Платинометалльные месторождения и проявления известны в Кольской, Карельской, Уральской и Чукотско-Корякской провинциях.

Силикатно-кобальт-никелевая формация представляет собой продукты экзогенного выветривания серпентинизированных ультраосновных и основных пород, как остаточные, так и инфильтрационные [13]. Массивы серпентинитов с кобальтсодержащей никеленосной корой выветривания известны в пределах Уральской и Салаирской провинций.

⁴ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. МПР РФ; 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

⁵ Там же.

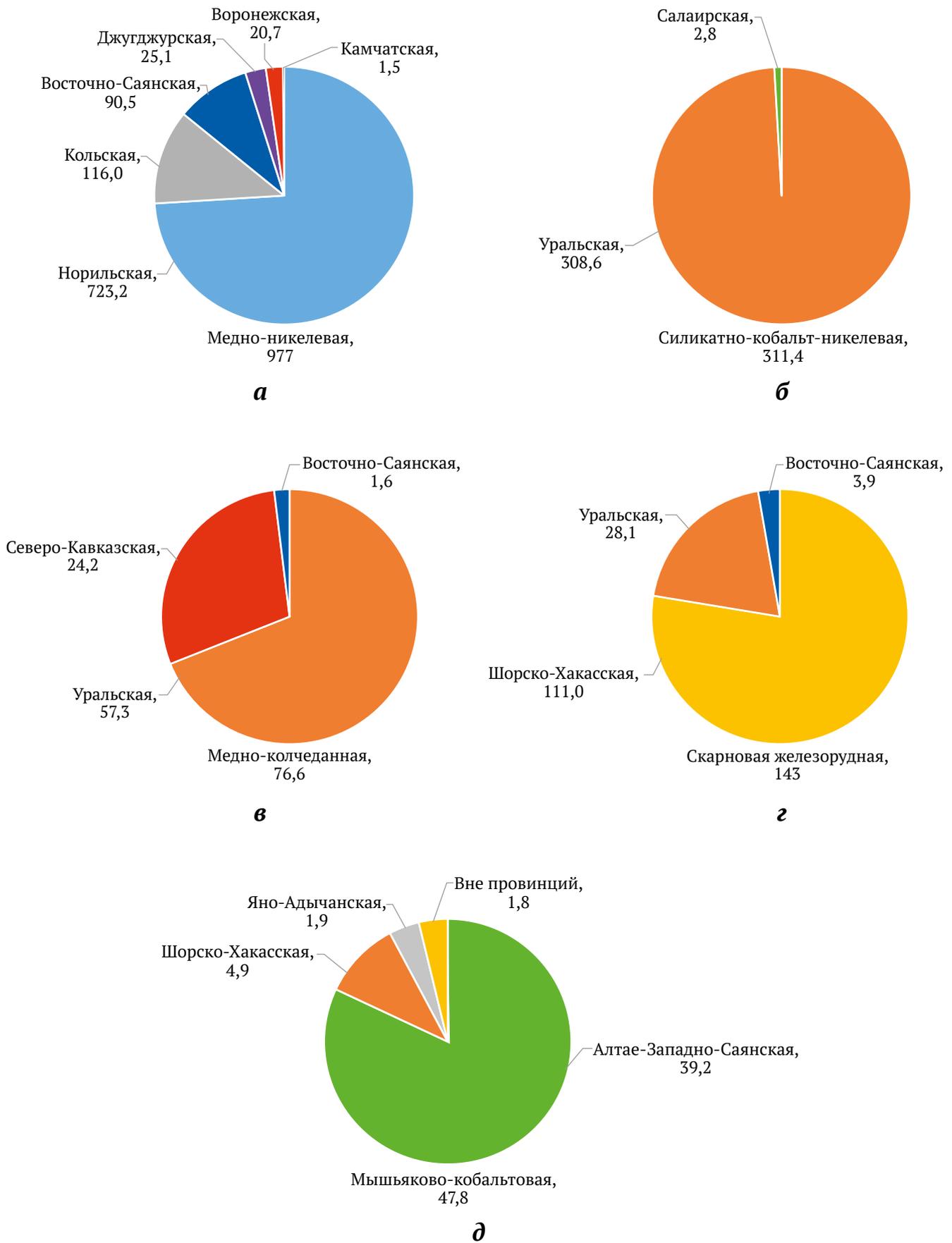


Рис. 5. Распределение балансовых запасов отдельных кобальторудных формаций кобальта Российской Федерации по провинциям по состоянию на 2021 г., тыс. т: а – медно-никелевая; б – силикатно-кобальт-никелевая; в – медно-колчеданная; г – скарновая железорудная; д – мышьяково-кобальтовая

По месторождениям силикатно-кобальт-никелевой формаций наблюдается облако распределения более низких отношений $Co : Ni$ по сравнению с месторождениями медно-никелевой формации (см. рис. 4), что свидетельствует об относительном обогащении кобальта в корях выветривания в сравнении с никелем. В распределении же отношений $Co : Ni$ для месторождений силикатно-кобальт-никелевой формации различий между объектами Уральской и Салаирской провинций не наблюдается (рис. 6).

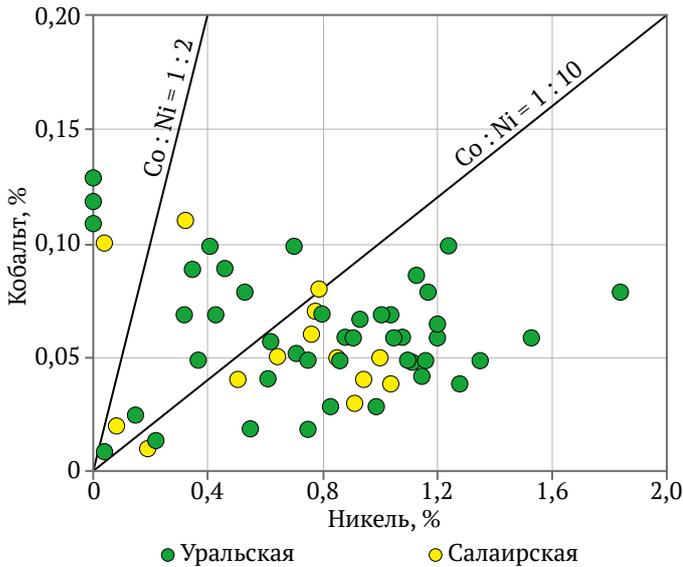


Рис. 6. Средние содержания кобальта и никеля в месторождениях силикатно-кобальт-никелевой формации по провинциям

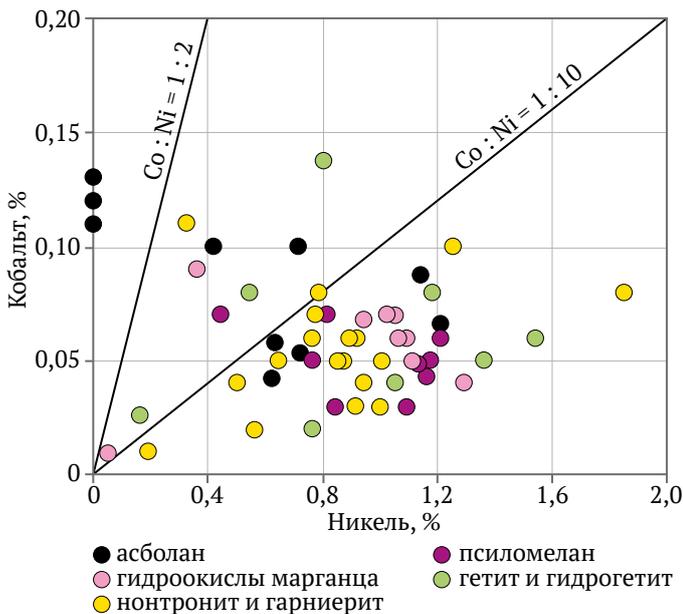


Рис. 7. Диаграмма средних содержаний кобальта и никеля в месторождениях силикатно-кобальт-никелевой формации по минералам-концентраторам кобальта

Если никель накапливается в средней части разреза коры выветривания в нонтронитовой зоне в виде никельсодержащих гидросиликатов (гарниерит, ревдинскит, непуит и др.), то кобальт – в нижней части разреза в зоне охр совместно с марганцем в виде кобальтсодержащих окислов и гидроокислов марганца (асболан, кобальтмелан, кобальтсодержащий псиломелан). Геометрия распределения ореолов никеля и кобальта в результате этого может не совпадать, образуя участки обогащения либо никеля, либо кобальта. Учитывая ориентацию геологоразведочных работ именно на никель, возможно занижение ресурсов кобальта при нахождении его образований вне контура оценки главного компонента руд.

Наибольшая концентрация кобальта наблюдается при сорбции его на асболан (по литературным данным, возможно до 32 % Co [9]) на проявлении Каинча в Салаирской провинции – до 10 % Co . В Уральской провинции к асболановым относится Елизаветинская группа месторождений {№ 36}. По месторождениям (рис. 7, табл. 2) на объектах, где асболан отмечен как главный концентратор кобальта, наиболее высокие средние его содержания. Иногда пространственно совместно с асболаном накапливаются также кобальтсодержащие гетит и гидрогетит [14]. Нонтронит и гарниерит находятся преимущественно в средней нонтронитовой части коры выветривания, где накапливается никель, при пониженных концентрациях кобальта. Но в отдельных случаях в линейных зонах выветривания формируются необычные гарниеритовые жилы с высокими содержаниями никеля и кобальта. Не исключается возможность их обогащения за счет поздней гидротермальной проработки продуктов коры выветривания [20, 21].

Таблица 2

Отношение содержаний кобальта и никеля по минералам-концентраторам кобальта в месторождениях и проявлениях силикатно-кобальт-никелевой формации

Главный минерал-концентратор кобальта	Отношение содержаний $Co : Ni$
Асболан	$\frac{0,105^*}{0,05-0,24}$
Гетит	$\frac{0,088}{0,03-0,17}$
Гидроокислы марганца	$\frac{0,096}{0,03-0,25}$
Гарниерит	$\frac{0,053}{0,04-0,07}$
Нонтронит	$\frac{0,079}{0,01-0,34}$
Псиломелан	$\frac{0,062}{0,03-0,16}$

* – в знаменателе интервал значений, в числителе – среднее значение.



По учтенным запасам кобальта на силикатную кобальт-никелевую формацию приходится 19,9 % российских балансовых запасов (311,4 тыс. т Со)⁶ (см. рис. 3) при среднем содержании кобальта по месторождениям до 0,11 %. В Российской Федерации известно 59 месторождений и проявлений силикатных кобальт-никелевых руд, на которых учтены запасы или ресурсы кобальта, в т.ч. свыше 1 тыс. т – 33, а свыше 10 тыс. т – 6 объектов. Добыча силикатных кобальт-никелевых руд производилась ранее на месторождениях Уральской провинции силами ПАО «Комбинат «Южуралникель» (до 2013 г.), выявленные в Салаирской провинции по результатам геологоразведочных работ проявления силикатных кобальт-никелевых руд ранее к эксплуатации не подготавливались (см. рис. 5, б).

Медно-колчеданная формация представляет собой смешанную группу месторождений вулканогенного гидротермально-осадочного и гидротермально-метасоматического генезиса в виде пласто- и линзообразных залежей сливных сульфидных руд с ведущей ролью пирита и медных сульфидов [22, 23]. Собственно формирование кобальтсодержащих медно-колчеданных месторождений является следствием высвобождения кобальта из минеральной матрицы оливина при гидротермальной серпентинизации ультраосновных пород с последующей их высадкой на сульфиды [11]. Наибольшее количество месторождений медно-колчеданных месторождений находится в Уральской провинции, где ведется их разработка на медь и цинк, присутствуют они также на территории Северо-Кавказской провинции. На многих медно-колчеданных месторождениях Уральской и Северо-Кавказской провинций фиксируется попутная кобальтовая минерализация [24, 25] (см. рис. 5, в).

Выделяется два типа кобальтсодержащих медно-колчеданных образований – так называемые «кипрский» серно-медно-колчеданный и «уральский» медно-цинково-колчеданный [26]. Для кипрского типа характерна концентрация кобальта в минеральной форме кобальтина и в меньшей степени в виде примеси в пирите и халькопирите. Колчеданные месторождения кипрского типа по своим размерам мелкие, изредка средние. Большая часть серно-медно-колчеданных месторождений кипрского типа (разрабатываемых в т.ч. и на кобальт) к настоящему времени отработана. Для уральского типа отмечается преимущественное нахождение кобальта в минеральной форме кобальтоносного пирита, реже кобальтоносного пирротина. Медно-цинково-колчеданные месторождения уральского типа имеют значительные

запасы цинка и меди, а на некоторых из них учитывается попутный кобальт, находящийся преимущественно в собственно серно-колчеданных, а не в медно-цинковых рудах. Содержание кобальта в медном концентрате с уральских месторождений составляет 0,005 %, в цинковом – 0,003 %. В результате этого на разрабатываемых в настоящее время медно-цинково-колчеданных месторождениях уральского типа кобальт при производстве меди и цинка не извлекается, а накапливается в серно-колчеданных отвалах продуктов обогащения.

В российских балансовых запасах кобальта на кобальтоносную медно-колчеданную формацию приходится 4,9 % российских балансовых запасов (76,5 тыс. т Со)⁷ (см. рис. 3) при среднем содержании кобальта по месторождениям до 0,07 %. В Российской Федерации известно 28 месторождений и проявлений кобальтоносных медно-колчеданных руд, на которых учтены запасы или ресурсы кобальта, в т.ч. свыше 1 тыс. т – 9, а свыше 10 тыс. т – 2 объекта. Извлечение кобальта из добываемых медных и цинковых руд не производится из-за отсутствия экономических выгод от выделения из них концентратов кобальтсодержащего пирита.

Кобальтоносная скарновая железорудная формация представлена контактово-метасоматическими месторождениями на пространстве перехода интрузивов от основного до кислого состава с известковыми осадочными породами, где новообразования железорудных скарнов являются субстратом для наложенной сульфидной минерализации с минералами кобальта [12, 27]. Сульфидная минерализация представлена пиритом и медными минералами (халькопирит, борнит). Кобальт присутствует в составе кобальтоносного пирита, иногда в виде кобальтина и изредка в составе блеклых руд.

На территории Российской Федерации известно 21 месторождение и проявление кобальтоносных железорудных скарнов, на которых учтены запасы или ресурсы кобальта, в т.ч. свыше 1 тыс. т – 14, а свыше 10 тыс. т – 6 объектов, при среднем содержании кобальта по отдельным месторождениям до 0,18 %. Они находятся в Уральской и Шорско-Хакасской провинциях (см. рис. 5, з), а также вне территорий выделенных провинций – Октябрьское-Fe месторождение в Иркутской области {№ 58} (запасы Со 6 тыс. т, 0,028 % Со), Таежное бор-железорудное месторождение в Республике Саха-Якутия {№ 59} с блоками обогащения кобальтовой минерализации (ресурсы Со 11,6 тыс. т, 0,11 % Со) [28] и проявление Чесноковское в Алтайском крае {№ 52} (ресурсы Со 1 тыс. т, 0,02 % Со) [29]. Извлечение кобальта из добываемых богатых железных руд не производится ввиду отсутствия при обогащении процедуры отделения сульфидной фазы. В то же время имеются успешные опыты выделения концентрата кобальтоносного пирита из хвостов магнитной сепарации.

⁶ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. МПР РФ; 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/; 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>

⁷ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. МПР РФ; 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/



рации железных руд Шорско-Хакасской провинции на Абагурской обогатительной фабрике [30].

В российских балансовых запасах кобальта на кобальтоносную железорудную скарновую формацию приходится 9,0 % российских балансовых запасов (141 тыс. т Co)⁸, см. рис. 3.

К кобальтоносной железорудной скарновой формации парагенетически примыкает **ванадиевоносная титаномагнетитовая формация**, где на магматические титаномагнетитовые руды наложены постмагматическая сульфидная минерализация с минералами меди и кобальта [31, 32]. Кобальт присутствует в титаномагнетитовых рудах в составе кобальтоносного пирита [28] и в виде кобальтина. По трем месторождениям этой формации, где зафиксирована кобальтовая минерализация, оценивались его балансовые запасы и ресурсы, при среднем содержании кобальта по отдельным месторождениям до 0,04 %.

Мышьяково-кобальтовая формация представляет собой группу месторождений и проявлений с разнообразными парагенезисами арсенидов, сульфидов и сульфидов с общим признаком ведущей роли кобальтовых и кобальтсодержащих минералов [9, 10]. Можно выделить собственно мышьяково-кобальтовую фацию, а также кобальт-никелевую, висмут-кобальтовую, золотосеребряную и олово-вольфрамовую фации гидротермальных кобальтоносных образований. Наиболее широко проявления мышьяково-кобальтовой формации распространены в Алтае-Саянской складчатой системе с концентрацией в Алтае-Западно-Саянской провинции, а также в Сеймчанской и Яно-Адычанской провинциях (см. рис. 5, д) и одно проявление в Карельской провинции. Имеются объекты висмут-кобальтовой фации мышьяково-кобальтовой формации и вне выделенных кобальторудных провинций, к примеру – Уронайское месторождение в Забайкальском крае {№ 71} (запасы Co 1,2 тыс. т, 0,06 % Co) [33] и Белогорское проявление в Приморском крае {№ 72} в виде наложенного оруденения на скарновые полиметаллические руды Партизанского месторождения [34]. Морфология кобальторудных тел мышьяково-кобальтовой формации преимущественно жильная с приуроченностью к системам разрывных нарушений. Имеется пространственная связь с щелочно-базальтоидным и гранитоидным магматизмом, а также нахождением близ них дорудных офиолитовых образований (возможный источник для мобилизации кобальта в гидротермальном процессе). Минеральная форма кобальта на объектах собственно мышьяково-кобальтовой фации представлена кобальтином, шмальтином и кобальтсодержащим пиритом, в кобальт-никелевых – кобальтином, шмальтином, глаукодотом и тенантитом, в висмут-кобальтовой – кобальтином, глаукодотом и блеклыми рудами, в золотосеребряной – кобальтином и глаукодотом, в олово-вольфрамовой – кобальтином и блеклыми рудами.

⁸ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. МПР РФ; 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

Добыча кобальта мышьяково-кобальтовой формации осуществлялась на Хову-Аксинском кобальт-никелевом месторождении (1956–1991 гг.), на группе Сеймчанских (Верхне-Сеймчанское, Ветровое) кобальтоносных золоторудных месторождений.

На территории Российской Федерации известно 43 месторождения и проявления мышьяково-кобальтовой формации, на которых учтены запасы или ресурсы кобальта, в т.ч. свыше 1 тыс. т – 14, а свыше 10 тыс. т – 3 объекта, при среднем содержании кобальта по отдельным месторождениям до 2,26 %. В российских запасах кобальта на мышьяково-кобальтовую формацию приходится 3,0 % его баланса (47,8 тыс. т Co)⁹, см. рис. 3.

Формация кобальтсодержащих органо-фосфатных урановых руд. В балансе запасов кобальта России находится 35,4 тыс. т (2,3 %) в составе комплексных фосфатно-редкоземельно-урановых руд в *Ергенинской провинции* на территории Республики Калмыкия [35]. Они представляют собой скопления костных остатков рыб, залегающих в толще морских глин олигоценового майкопского горизонта. Генезис этих металлоносных образований рассматривается как осадочный с сорбцией урана на органическое вещество, а других металлов на диагенетические сульфиды. Кроме урана и кобальта, на ергенинских месторождениях оценены запасы и других попутных компонентов: молибдена, фосфора и редкоземельных металлов. Схожие геологические условия наблюдаются в *Прибалтийской провинции* (Прибалтийском сланцевом бассейне) – развитие ордовикских диктионемовых (черных горючих) сланцев и оболочных (фосфатных) песчаников, включающих диагенетическое урановое оруденение, на месторождениях которых учтены запасы попутных ванадия, никеля, молибдена и рения [36]. Отмечается наличие кобальта в отношении Co : Ni 1 : 3, но его ресурсы не оценивались [36, 37]. Повышенная металлоносность (U, Mo, Re, V, Ni, Co, Zn, Se) известна также в горючих сланцах *Волжского сланцевого бассейна* (месторождения Орловское, Кашпир-Хвалынское, Перелюбское и Коцебинское [38]. Формирование металлоносных образований связывается здесь с процессами фоссилизации органического вещества при седиментации в присутствии диагенетического пирита с сорбированием металлов из морской воды [39].

Собственно разработка кобальтсодержащих органо-фосфатных урановых руд возможна только с позиции добычи в первую очередь урана, но в предлагаемых технологиях кучного и подземного выщелачивания возможно извлечение попутных полезных компонентов (молибдена, рения, никеля, кобальта и др.) [40]. При рассмотрении в широком смысле кобальтоносности образований формации урановых руд появляется интерес и к металлоносно-

⁹ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. МПР РФ; 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/



сти (в т.ч. и кобальта) более распространенной формации черных сланцев [41].

Марганцевые минералы (асболоан, псиломелан, пиролюзит и др.) являются естественными адсорбентами кобальта из растворов инфильтрации как в гипергенных, так и в гипогенных процессах. В типичных морских седиментационно-диагенетических и диагенетических месторождениях марганца всегда присутствует кобальт (от тысячных долей до 0,01 %) [9]. Появляется необходимость выделения отдельной **кобальтсодержащей марганцеворудной формации рудных объектов**, формирующихся в седиментационных бассейнах близ объемных источников выноса кобальта, например, из денудированных массивов серпентинизированных гипербазитов и формируемых по последним корам выветривания.

По материалам учета марганцевых месторождений на территории Российской Федерации в 14 учтенных объектах имеют место повышенные концентрации кобальта в марганцевых рудах (до 1 %). Отработанное к настоящему времени Мазульское месторождение в Красноярском крае разведывалось в 1930-х годах именно как кобальт-марганцевое. Часть проявлений кобальтсодержащих марганцевых руд находится в пределах кобальторудных провинций (Уральской [42], Салаирской [43], Шорско-Хакасской [44] и Восточно-Саянской [45]), что укладывается в рамки их генезиса как сорбции инфильтруемого кобальта, высвобождаемого из серпентинитов офиолитовых комплексов в этих провинциях. Но имеются также проявления кобальтсодержащих марганцевых руд вне известных кобальторудных провинций: Мазульское [84] (среднее содержание 0,023 % Со) в Красноярском крае [46], а также Южно-Хинганское и Биджанское [86] (0,05 % Со) в Еврейской автономной области [47]. Эти геологические объекты свидетельствуют о возможном наличии масштабных источников подвижного в гипергенной среде кобальта и, соответственно, вероятных новых кобальторудных провинций.

Собственно кобальтоносность марганцеворудных образований системно не исследовалась, его ресурсы по марганцевым месторождениям в России не оценивались, несмотря на то что марганцевые минералы склонны к сорбированию инфильтруемого кобальта. Опробование марганцевых руд на кобальт при геологоразведочных работах носило случайный характер точечных проб и ввиду фиксации преимущественно низких его концентраций не вызывало интереса. Соответственно, нет данных по распределению кобальта по объему рудных тел марганцевых месторождений и возможных зон его обогащения.

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 обогащения производств, отвалы шлаков и огарков металлургического передела руд, минерализованные рудничные воды) [48]. В российских запасах кобальта на техногенную фор-

мацию приходится 0,8 % его баланса (12,2 тыс. т Со)¹⁰. На территории Российской Федерации известны три техногенных месторождения с учтенными запасами кобальта. Это хвостохранилище Норильской обогатительной фабрики [№ 89] (запасы 11,1 тыс. т, 0,09 % Со) и пруд-охладитель никелевого завода Озеро Барьерное (0,023 % Со) в г. Норильске, а также отвалы некондиционных руд Аллареченского месторождения [№ 88] (0,015 % Со) в Мурманской области [49]. Для отвальных продуктов медно-никелевых руд отмечается более высокое соотношение Со : Ni по сравнению с исходными рудами, что свидетельствует об относительном обогащении кобальта.

В отвалах обогащения хову-аксинских мышьяково-кобальт-никелевых руд комбината «Тувакобальт» только в трех из пяти карт намыва подсчитаны ресурсы кобальта в количестве 1,8 тыс. т при среднем содержании 0,112 %. В рамках природоохранной задачи обезвреживания мышьяка лежалых отходов возможно извлечение из этих отвальных продуктов кобальта и никеля [50].

В отвальном хозяйстве обогатительной фабрики Гайского ГОКа, перерабатывающей колчеданные медно-цинковые руды, отдельно складированы пиритные концентраты хвостов, в которых содержится до 0,05 % кобальта. Подобные склады имеются и на других обогатительных фабриках, перерабатывающих уральские медно-колчеданные руды, а также на предприятиях, ранее производивших серную кислоту из колчеданов и накапливающих пиритные огарки в отвалах [51]. Ресурсы этих отвальных хозяйств на кобальт не оценивались.

В целом ресурсы техногенных месторождений являются недооцененными ввиду ограниченности специализированных геологоразведочных работ на объектах отвальных хозяйств добывающих предприятий, разрабатывающих месторождения медно-никелевой и медно-колчеданной формаций.

Формация кобальтоносных марганцевых корок. Решением Международного органа по морскому дну ООН за Российской Федерацией закреплен Российский разведочный район кобальтоносных марганцевых корок (PPP-КМК), расположенный в западном звене Магеллановых гор в Тихом океане. В пределах Российского разведочного района силами ГНЦ ФГУП «Южморгеология» ведутся работы по оценке ресурсов кобальта, никеля и марганца в соответствии с Правилами поиска и разведки кобальтоносных железомарганцевых корок в районе МОМД ООН [52]. Кобальтоносные марганцевые корки представляют собой наслоения гидроокислов железа и марганца на выступах пород подводных поднятий (гойтов) на глубинах от 800 до 3000 м. Толщина корок до 25 см, продуктивность 60–80 кг/м², концентрация Со в корках – 0,5–0,7 % (средние содержания по оцениваемым блокам 0,50–0,61 %), Ni – 0,4–0,5 % и Mn – 19–23 % [53].

¹⁰ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. МПР РФ; 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

Предполагается гидрогенный и биохимический генезис кобальтоносных железомарганцевых корок с сорбцией кобальта, никеля и марганца из морской воды бактериальными матами [54]. Прогнозные ресурсы кобальта в кобальтоносных марганцевых корках в Российском разведочном районе на гойтах Альба, Коцебу, Говорова и Вулканолог оцениваются в 110 тыс. т Со [53, 55]. В целом месторождения формации кобальтоносных марганцевых корок являются весьма перспективными объектами для добычи и извлечения кобальта, но имеет место медленное развитие предлагаемых технологий добычи на больших глубинах [56]. К формации кобальтоносных марганцевых корок примыкает формация *железо-марганцевых конкреций* океанических впадин, но ввиду больших глубин их размещения и статуса кобальта уже как попутного компонента (содержание Со 0,22–0,29 %) интерес к ней менее значителен, чем для месторождений КМК [53], хотя его ресурсы в ЖМК российского района рудного поля Кларион-Клиппертон в Тихом океане составляют в 985 тыс. т.

Факты наличия значимых объектов формации кобальтоносных марганцевых корок в Мировом океане позволяет предположить возможность их наличия в геологических объектах на наземной территории Российской Федерации. Требуется определиться с геологическими комплексами с возможным наличием образований кобальтоносных марганцевых корок, соответствующим современным обстановкам осаждения кобальта из морской воды, и сформировать критерии их изучения (ревизия геологической информации, поиск и оценка объектов КМК). Тем более что аналоги континентальных кобальтоносных марганцевых корок имеются – проявления на Павловской площади {№ 87} в Приморском крае [57].

Кобальторудные провинции

Кобальторудные провинции ввиду преобладания объектов медно-никелевой формации и части объектов медно-колчеданной формации повторяют частично или полностью контуры меднорудных провинций (Северо-Кавказской, Воронежской, Карельской, Кольской, Уральской, Восточно-Саянской, Норильской, Северо-Байкальской, Джугджурской, Корякской и Камчатской) [16]. Выделены провинции с преобладанием объектов силикатно-кобальт-никелевой (Салаирская), скарновой железорудной (Шорско-Хакасская), мышьяково-кобальтовой (Алтае-Западно-Саянская, Яно-Адычанская, Сеймчанская) и урано-фосфатной (Ергенинская, Прибалтийская) формаций.

В **Северо-Кавказской провинции** известны многочисленные месторождения *медно-колчеданной формации*, на некоторых из них учтены запасы попутного кобальта – резервное месторождение Кизил-Дере {№ 42} с запасами кобальта 17,7 тыс. т со средним содержанием в рудах 0,03 % Со [24] и подготавливаемое к эксплуатации Худеское месторождение {№ 41} (запасы + ресурсы Со 21,2 тыс. т, 0,02 % Со). Всего по Северо-Кавказской провинции учтено 24,2 тыс. т балансовых запасов кобальта (1,5 % от российских запасов), см. рис. 8, или 31,6 % от запасов медно-колчеданной

формации (см. рис. 5, в). Зафиксировано также множество медно-колчеданных рудопоявлений, на некоторых из них зафиксирована кобальтовая минерализация (кобальтсодержащий пирит, кобальтин) [58, 59].

В **Ергенинской (Калмыкской) провинции** находятся месторождения и проявления *формации кобальтсодержащих органо-фосфатных урановых руд* [35, 40], в т.ч. Богородское {№ 78} (запасы + ресурсы Со 20,8 тыс. т, 0,04 % Со) и Шаргадыкское {№ 79} (12,6 тыс. т, 0,01 % Со) месторождения. Рудные образования представляют собой скопления ураноносных фоссилизованных обломков костей рыб и чешуи, сцементированных глинистым материалом с примесью пирита и мельниковита. Кобальт концентрируется в диагенетических пирите и мельниковите. Предлагается карьерная разработка урановых месторождений Ергенинского района с последующим выщелачиванием полезных компонентов в кучах по сернокислотной и азотной схемам [40]. Доля балансовых запасов кобальта Ергенинской провинции (4 тыс. т) в российских запасах кобальта составляет 0,26 %.

В **Воронежской провинции** известны месторождения и проявления *формации кобальтсодержащих медно-никелевых руд* [60, 61], в т.ч. Еланское месторождение {№ 1} с учтенными запасами попутного кобальта 15,3 тыс. т при среднем содержании 0,036 % Со, а также Елкинское месторождение (запасы Со 5 тыс. т, 0,03 % Со). Кобальт концентрируется в пентландите, кобальтине и герсдорфите. Доля запасов кобальта Воронежской провинции (20,7 тыс. т) в российском балансе формации медно-никелевых руд – 2,12 %.



Рис. 8. Объемы учтенных запасов кобальта в Российской Федерации по провинциям по состоянию на 2021 г.

Источники: Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. МПР РФ; 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/; 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>



В Прибалтийской провинции находятся месторождения и проявления *формации кобальтсодержащих органо-фосфатных урановых руд* [35, 36], которые разрабатывались в 1950-е годы с извлечением урана [62]. Здесь известны месторождения урана с учтенными запасами попутного никеля, ванадия, молибдена и рения – Куммолдовское, Котловское, Кайболовское, Красносельское и Раноловское. Ресурсы кобальта в этих ураноносных отложениях не оценивались, но по данным соотношений никеля и кобальта должны составлять по известным месторождениям суммарно до 4 тыс. т при среднем содержании до 0,013 % Co [36, 37]. Извлечение кобальта (совместно с другими попутными полезными компонентами) возможно по предлагаемым технологиям кучного и подземного выщелачивания прибалтийских ураноносных диктионемовых сланцев [40]. Балансовых запасов кобальта по Прибалтийской провинции нет.

Карельская провинция находится в юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита. Здесь по результатам геологоразведочных работ известно 16 месторождений и проявлений с попутным кобальтом, в т.ч. медно-никелевой формации (13 объектов), а также формации малосульфидных платинометалльных руд (2 объекта) и золотосеребряной фации мышьяково-кобальтовой формации (1 объект). Наибольший интерес представляют месторождения *медно-никелевой формации* Семчозерское {№ 3} (ресурсы Co 80 тыс. т при среднем содержании 0,02 %), Педрореченское {№ 2} (ресурсы Co 50 тыс. т, 0,06 % Co) [63] и Волошовское {№ 4} (ресурсы 14 тыс. т, 0,02 % Co) с проявлениями медно-никелевых руд с попутным кобальтом [64]. Объекты малосульфидной платинометалльной формации – это проявления Викша (участки Викшеозерское, Кенти, Шарги) {№ 21} (ресурсы 4,5 тыс. т, 0,01 % Co) [65] и Шалозерское (Курчучей) {№ 20} (ресурсы 0,15 тыс. т, Co 0,17 %) [63]. Обнаружено также проявление золотосеребряной фации *мышьяково-кобальтовой формации* с кобальтином и глаукодотом – Орехозеро {№ 75} (ресурсы Co 2,5 тыс. т, 0,07 % Co) [66]. По Кольской провинции учтено 10 тыс. т балансовых запасов кобальта, или 0,64 % от российского баланса.

Кольская провинция расположена на севере Фенноскандинавского щита, где в пределах рифтогенного Печенга-Имандра-Варзугского зеленокаменного пояса известно множество палеопротерозойских расслоенных интрузий, включающих месторождения и проявления формаций сульфидных медно-никелевых руд и малосульфидных платинометалльных руд с попутной кобальт-медно-никелевой минерализацией [67, 68], а также проявления кобальтоносной ванадийсодержащей титаномагнетитовой магматической формации [31]. Учтенных балансовых запасов кобальта по Кольской провинции 116,1 тыс. т, или 7,4 % от российского баланса (см. рис. 8).

В пределах Кольской провинции известно 30 месторождений и проявлений *медно-никелевой формации*, на которых учтены запасы и ресурсы попутного кобальта, в т.ч. разрабатываемые Ждановское месторождение {№ 3} (запасы + ресурсы Co 68 тыс. т

при среднем содержании 0,024 %), Сопчуайвенч {№ 5} (23,7 тыс. т, 0,01 % Co), Нюд-Морошковое {№ 7} (21,3 тыс. т, 0,02 % Co), Поаз {№ 6} (21,2 тыс. т, 0,01 % Co), Ниттис-Кумужья-Травяная {№ 8} (16,9 тыс. т, 0,19 % Co), Тундровое {№ 4} (16,7 тыс. т, 0,023 % Co), а также еще 9 кобальт-медно-никелевых объектов с суммой запасов и ресурсов кобальта свыше 1 тыс. т. Всего в Кольской провинции учтено 116 тыс. т балансовых запасов кобальта в медно-никелевых месторождениях, что составляет 11,9 % от запасов кобальта в медно-никелевых рудах (см. рис. 5, а). Попутный кобальт известен на месторождении *платинометалльной формации* Киевей {№ 22} и в платинометалльных проявлениях Мончетундровское {№ 23}, Чуарвы Восточное и Северный Каменник. Ресурсы кобальта на собственно платинометалльных объектах, как правило, небольшие (менее 1 тыс. т).

В пределах Восточно-Кейвского пояса Балтийской титаномагнетитовой провинции в результате геологоразведочных работ зафиксирована кобальтоносность месторождения *ванадийсодержащей титаномагнетитовой магматической формации* Магазин-Мусюр {№ 60} (ресурсы 51,5 тыс. т, 0,02 % Co) в раннепротерозойской Магазин-Мусюрской габбро-анортозитовой интрузии.

Уральская провинция находится в пределах Уральской складчатой системы. Здесь известны месторождения и рудопроявления силикатной кобальт-никелевой, а также медно-колчеданной, железорудной скарновой и платинометалльно-медно-никелевой формаций с попутной кобальтовой минерализацией [26, 67, 70, 71]. На территории Уральской провинции сосредоточено 385,7 тыс. т балансовых запасов кобальта (24,7 % от российских), но разработка силикатных кобальт-никелевых руд к настоящему времени прекращена (с 2013 г.), а при добыче кобальтсодержащих медно-колчеданных и железорудных месторождений кобальт не извлекается.

Гипергенные месторождения *оксидно-силикатной кобальт-никелевой формации* в Уральской провинции представлены остаточными и инфильтрационными продуктами мезозойского экзогенного выветривания серпентинизированных ультраосновных и основных пород в Орско-Халиловском (Южный Урал), Уфалейском и Режском (Средний Урал) рудных кобальт-никелевых районах [21, 23]. По формационным признакам исходным субстратом для формирования гипергенных месторождений являются кобальто- и никеленосные гипербазиты, на 89,7 % площади их выходов в пределах Уральской провинции занимают породы дунит-гарцбургитовой формации, 8,7 % – дунит-клинопироксенитовой, 1,6 % – пироксенит-перидотитовой и щелочной оливин-базальтовой [13].

В пределах Уральской провинции известно 45 силикатных кобальт-никелевых месторождений и проявлений, в т.ч. месторождения Буруктаьское {№ 33} (запасы Co 136,7 тыс. т при среднем содержании 0,058 %) [72], Серовское {№ 37} (запасы Co 133,8 тыс. т, 0,026 % Co), Сахаринское {№ 35} (запасы + ресурсы Co 11,7 тыс. т, 0,06 % Co), Новокиевское {№ 34} (ресурсы Co 15,5 тыс. т, 0,08 % Co), Елизаветинское {№ 36} (ресурсы



Со 14,1 тыс. т, 0,07 % Со) и 20 кобальт-медно-никелевых объектов с суммами запасов и ресурсов кобальта 1–10 тыс. т. Кобальт концентрируется в асболане, псиломелане, кобальт-никелевых оксигидратах, нонтроните, гидрогетите. Из перспективных объектов следует отметить площадь Яреней {№ 38} (ресурсы Со 125 тыс. т, 0,11 % Со) на Полярном Урале, пространственно приуроченную к марганцевой сиаллитно-железистой коре выветривания по девонским песчано-сланцевым породам. Рудная минерализация представлена здесь тонкокристаллическими, зернистыми или натечными агрегатами кобальт-никелевого асболана.

Ученные запасы кобальта в силикатно-кобальт-никелевых месторождениях Уральской провинции составляют 308,6 тыс. т Со, или 99,1 % российских запасов этой формации (см. рис. 5, б). Силами ПАО «Комбинат «Южуралникель» до 2013 г. на месторождениях Уральской провинции производилась добыча силикатных кобальт-никелевых руд с их переработкой на Орском, Уфалейском и Режском никелевых заводах преимущественно на ферроникель. Значительное количество мелких и средних кобальт-никелевых месторождений выработано полностью или частично. Ввиду того что кобальт является вредной примесью при производстве ферроникеля, имела место селективная выработка богатых никелевых руд с оставлением целиков валунчатых асболановых руд, бедных по никелю, но богатых по кобальту.

Кобальт в *медно-колчеданной формации* в Уральской провинции присутствует в так называемых «кипрском» и «уральском» типах серно-медно-колчеданных месторождений, являющихся производными субмаринных осадочно-вулканогенных базальтоидных формаций ранних стадий эвгеосинклинального развития Южного и Среднего Урала [69]. В Уральской провинции известны 21 месторождение и проявления кобальтоносных медно-колчеданных руд, на которых учтены запасы или ресурсы кобальта, в т.ч. свыше 1 тыс. т – 9, а свыше 10 тыс. т – одно – Гайское {№ 43} месторождение (ресурсы 17 тыс. т Со при среднем содержании 0,02 %) [73].

В балансе запасов кобальта на Уральскую провинцию приходится 50,8 тыс. т Со, или 66,3 % российских запасов медно-колчеданной формации (см. рис. 5, в). Кобальтоносные серно-медно-колчеданные месторождения кипрского типа, как правило, небольшие по запасам и большей частью выработаны, как, например, Дергамышское {№ 44} [74], Ивановское [25] и Ишкинское [75] на Южном Урале, Пышминско-Ключевское {№ 45} [76] на Среднем Урале. Кобальт на месторождениях кипрского типа находится преимущественно в минеральной форме кобальтина, причем отмечаются иногда его мономинеральные скопления в телах сульфидных руд. Средние содержания кобальта по месторождениям кипрского типа составляют от 0,05 % (Дергамышское) до 0,12 % (Южный Юлук). При разработке некоторых месторождений кипрского типа кобальт извлекался из колчеданных руд (Дергамышское – 1,3 тыс. т; Никитовское – 0,1 тыс. т). Кобальтоносные медно-цинково-колчеданные месторождения уральского типа имеют значительные запасы цинка

и меди, а на некоторых из них учитывается попутный кобальт: Саумское {№ 46} (запасы 37 тыс. т, 0,058 % Со), Гайское (запасы + ресурсы 17 тыс. т, 0,02 % Со), Ивановское, Осеннее (запасы 4,4 тыс. т, 0,062 % Со), Шемурское (запасы 4,3 тыс. т, 0,06 % Со), Ново-Шемурское (запасы 4,3 тыс. т, 0,07 % Со), Сибайское (запасы 2,4 тыс. т, 0,026 Со) и др. Кобальт на месторождениях уральского типа концентрируется преимущественно в минеральной форме кобальтоносного пирита, реже кобальтоносного пирротина. В то же время медно-цинковые руды бедны кобальтом в отличие от собственно кобальтоносных колчеданных руд, и при их переделе кобальт не накапливается в получаемых конечных металлах и промпродуктах. В результате кобальтоносные колчеданные руды либо остаются в недрах (не представляя интереса как сырье меди и цинка), либо попадают в отвальные продукты обогащения.

Месторождения *кобальтоносной железорудной скарновой формации* в Уральской провинции представлены силур-девонскими контактово-метасоматическими образованиями, на которые наложена более поздняя сульфидная медная и кобальтовая минерализация [12]. В пределах Уральской провинции известно 8 месторождений и проявлений формации кобальтоносных железорудных скарнов, на которых учтены запасы или ресурсы кобальта, в т.ч. свыше 1 тыс. т – 6 объектов. Из них 5 месторождений на Среднем Урале: Теченское {№ 50} (ресурсы Со 13,6 тыс. т, 0,028 % Со), Северо-Гороблагодатское (запасы Со 8,7 тыс. т, 0,01 % Со), Песчанское {№ 51} (запасы Со 6,9 тыс. т, 0,02 % Со), Лебяжинское (запасы Со 6 тыс. т, 0,02 % Со), Высокогорское (запасы Со 3,4 тыс. т, 0,03 % Со) [12] и одно – на Полярном Урале: Новогоднее (ресурсы Со 2,7 тыс. т, 0,015 % Со) [77]. Кобальт концентрируется преимущественно в кобальтсодержащем пирите, а также в кобальтине (месторождения Песчаное, Лебяжинское, Высокогорское) и пирротине (Новогоднее). В балансе запасов кобальта на Уральскую провинцию приходится 28,1 тыс. т Со, или 19,9 % российских запасов кобальтоносной железорудной формации, см. рис. 5, г.

В пределах Уральской провинции находится также разрабатываемое месторождение *ванадиевоносной титаномагнетитовой формации с попутной кобальтовой минерализацией* – Волковское медно-титаномагнетитовое {№ 61} (ресурсы Со 5 тыс. т, 0,004 % Со) [32], представленное силур-девонскими контактово-метасоматическими образованиями, на которые наложена более поздняя сульфидная медная и кобальтовая минерализация. Кобальт из медных концентратов Волковского месторождения не выделяется по экономическим соображениям.

Салаирская провинция расположена на северо-западном фланге Алтае-Саянской орогенической системы. Здесь в результате поисковых и геолого-разведочных работ известны месторождения и рудопроявления силикатной кобальт-никелевой, а также марганцевой и медно-никелевой формаций с попутной кобальтовой минерализацией [13]. В пределах Салаирской провинции обнаружено 17 месторождений и проявлений с кобальтовой минерализацией,



в т.ч. 15 – силикатной кобальт-никелевой формации, 1 – медно-никелевой формации и 1 – кобальтоносной марганцеворудной формации. На семи месторождениях сумма запасов и ресурсов кобальта свыше 1 тыс. т со средним содержанием до 0,11 % Со.

Гипергенные месторождения *оксидно-силикатной кобальт-никелевой формации* в Салаирской провинции представлены линейными и площадными корами экзогенного мезозойского выветривания серпентинизированных кембрийских ультраосновных интрузий Салаирского офиолитового пояса [9]. Здесь выявлено 15 месторождений и проявлений, в т.ч. 7 объектов с суммой запасов и ресурсов кобальта свыше 1 тыс. т: Белининское {№ 39} (запасы Со 2,8 тыс. т, 0,04 % Со), Александровское {№ 40} (запасы Со 1,1 тыс. т, 0,11 % Со), Уксунайское (ресурсы Со 6 тыс. т, 0,04 % Со), Старый Тягун (ресурсы Со 6 тыс. т, 0,05 % Со), Тягунское (ресурсы Со 5 тыс. т, 0,06 % Со), Колпачек (ресурсы Со 4 тыс. т, 0,01 % Со) и Яминское (ресурсы Со 1 тыс. т, 0,07 % Со). Кобальт в большинстве объектов входит в состав никеленосного нонтронита, но имеются интересные объекты с концентрацией кобальта в гетите и псиломелане (месторождение Александровское), а также проявления с кобальтоносным асболоманом – проявления Новофирсовское (до 1,31 % Со) и Каинча (до 10 % Со). Гипергенные месторождения силикатно-кобальт-никелевой формации в Салаирской провинции ранее не представляли интереса ввиду малых размеров объектов, но с развитием технологий подземного выщелачивания никеля и кобальта на Белининском месторождении изучались возможности серноокислотного выщелачивания кобальт-никелевых руд [78].

Из других кобальтоносных объектов в Салаирской провинции выявлены проявления Седова Замимка *медно-никелевой формации* (0,016 % Со, 0,3 % Си и 0,48 % Ni) с наложенной с кобальтин-герсдорфитовой минерализацией [79] и проявление Матюжиха марганцеворудной формации (до 1 % Со) в остаточной коре выветривания силурийского возраста [43].

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 завершающий раннепалеозойский диоритовым и плагиогранитным магматизмом салаирского или раннекаледонского цикла тектогенеза [80]. Здесь известны месторождения и проявления железорудной скарновой формации, а также мышьяково-кобальтовой и марганцеворудной формаций. Всего по Шорско-Хакасской провинции учтено 115,9 тыс. т балансовых запасов кобальта, что составляет 7,4 % от российского баланса, см. рис. 8.

Месторождения *железорудной скарновой формации* представляют собой кембрийские контактово-метасоматические образования с наложенной кобальтовой минерализацией. В пределах Шорско-Хакасской провинции известно 7 месторождений и проявлений формации кобальтоносных железорудных скарнов, на

которых учтены запасы или ресурсы кобальта, в т.ч. свыше 1 тыс. т – 5, а свыше 10 тыс. т – 4 объекта. Это Таштагольское {№ 53} (запасы Со 65,4 тыс. т, 0,02 % Со), Волковское {№ 56} (ресурсы Со 42 тыс. т, 0,02 % Со), Анзасское {№ 54} (запасы Со 29,9 тыс. т, 0,02 % Со) и Абаканское {№ 55} (запасы Со 26,9 тыс. т, 0,18 % Со) месторождения. Кобальт находится в преимущественно кобальтоносном пирите, иногда в виде минеральной формы кобальтина, причем последний на Абаканском месторождении формирует локальные обогащенные им участки железных руд. На Таштагольском месторождении имеется также присутствие кобальтсодержащих блеклых руд, а на Волковском месторождении – кобальтоносного магнетита. В связи с разработкой Шорско-Хакасских месторождений с добычей преимущественно богатых железных руд без обогащения кобальт из них не извлекается. В балансе запасов кобальта Шорско-Хакасской провинции по кобальтоносным железорудным месторождениям находится 77,6 % запасов (111 тыс. т Со) от российских запасов кобальта железорудной скарновой формации, см. рис. 5, 2.

В пределах Шорско-Хакасской провинции при геологоразведочных работах выявлены проявления гидротермальной *мышьяково-кобальтовой формации*: Базасское {№ 63} (ресурсы Со 7 тыс. т, 0,25 % Со, минерализация теннантита и аннабергита), Бутрахтинское {№ 64} (запасы Со 1,2 тыс. т, 0,16 % Со, минерализация теннантита и кобальтина) и Хараджульское {№ 74} (запасы Со 3,7 тыс. т, 0,08 % Со, минерализация кобальтина и кобальтсодержащий пирит). Запасы кобальта мышьяково-кобальтовой формации по Шорско-Хакасской провинции составляют 4,9 тыс. т, или 10,2 % от российских запасов кобальта этой формации, см. рис. 5, д.

На месторождении *марганцеворудной формации* Селезеньское {№ 78}, расположенном близ Таштагольского железорудного месторождения, зафиксировано наличие кобальта до 0,016 % [81].

Территория **Алтае-Западно-Саянской провинции** – наиболее насыщенная месторождениями и проявлениями гидротермального кобальтового оруденения. Здесь производились специализированные поиски месторождений именно *мышьяково-кобальтовой формации* [82]. В этом регионе встречаются практически все фации мышьяково-кобальтовой формации:

– собственно мышьяково-кобальтовые проявления – Юстыдское [83], Оленджуларское [82], Загадка (Карагемское) [84], Тоштуозекское (0,15 % Со), Светлый (1,45 % Со) [82], Уландрык [85], Центральный Акчат (0,15 % Со), Шемуш-Даг (0,19 % Со), Бай-Тайга, Сагсайское, Кок-Узек [82], Талайлык, Шемушдаг, Аксумон, Акоюк, Оюкхемское [10];

– никель-кобальтовые – Ховуаксинское месторождение {№ 67} (запасы Со 19,8 тыс. т, 2,26 % Со) [86], проявления Атбаши {№ 65} (ресурсы Со 9,4 тыс. т, 0,22 % Со), Курузек {№ 66} (ресурсы Со 7,3 тыс. т, 0,18 % Со) [82], Владимировское (0,5 % Со) [87], Коккая (0,7 % Со), Асхатин-Гол, Хурен-Тайга, Кызыл-Оюк [82], Акол, Узунхем, Узюк, Сарыташ [10];

– висмут-кобальтовые – Кара-Кульское месторождение {№ 69} (запасы Со 25,7 тыс. т, 0,33 % Со)



[88], проявления Янтау {№ 68} (ресурсы Co 1,6 тыс. т, 0,03 % Co), Перевальное {№ 70} (ресурсы Co 6,1 тыс. т, 0,08 % Co); Узунойское, Могенбуренское, Каат-Тайга, [82], Чергакское [89], Бутрахтинское, Джулукуль [82], Кызылшин [10].

Мышьяково-кобальтовые месторождения представлены зонами или жилами с сульфидно-арсенидной и сульфоарсенидной минерализацией в виде кобальтина, глаукодота, Co-Ni-арсенопирита, кобальт-содержащих пирита и пирротина, а также других сульфидов, арсенидов и сульфоарсенидов кобальта [86, 88]. Кобальтовые руды содержат также минералы никеля, меди, золота, висмута, вольфрама, урана.

По возрасту кобальтовое оруденение осуществлялось в трех возрастных эпохах, отвечающих возрастным рубежам масштабного развития ультрамафитового и базитового магматизма [90, 91]:

– девонско-раннекаменноугольный (D–C₁) – Юстыдское, Сагсайское, Ховуаксинское, Владимировское, Бутрахтинское;

– пермо-триасовый (P₂–T) – Чергакское, Асхатин-Гол, Хурен-Тайга, Узунойское, Могенбуренское;

– позднеюрский-раннемеловой (J₃–K₁) – Кок-Узек, Кызыл-Оюк, Хурен-Тайга, Каат-Тайга, Сергеевское, Джулукуль.

Очевидно, что минеральные фации кобальтовых образований формируют парагенезисы на основе окружающего субстрата пород (источников рудного вещества и энергии метасоматоза) и не имеют возрастной привязки, наблюдаясь во все эпохи.

На территории Алтае-Западно-Саянской провинции известно 27 месторождений и проявлений мышьяково-кобальтовой формации, на которых учтены запасы или ресурсы кобальта, в т.ч. свыше 1 тыс. т – 7, а свыше 10 тыс. т – 3 объекта, при среднем содержании кобальта по отдельным месторождениям до 2,26 %. В Алтае-Западно-Саянской провинции находится 82 % балансовых российских запасов кобальта мышьяково-кобальтовой формации (39,2 тыс. т Co)¹¹ (см. рис. 5, д), или 2,5 % от запасов кобальта Российской Федерации. Алтае-Западно-Саянская провинция остается наиболее перспективной на обнаружение новых объектов мышьяково-кобальтовой формации.

Восточно-Саянская провинция находится в пределах сочленения северо-восточной части Алтае-Саянской орогенной зоны и юго-западной части Сибирской платформы. Здесь известны месторождения и проявления медно-никелевой (3 объекта), колчеданной (1 объект), железорудной скарновой (1 объект) и марганцеворудной (3 объекта) формаций. В Восточно-Саянской провинции учтено 96 тыс. т балансовых запасов кобальта, или 6,1 % баланса России, см. рис. 8.

Месторождения *медно-никелевой формации* представляют собой серпентинизированные ультрабазиты габбро-перидотит-дунитовой магматической формации, несущие вкрапленную кобальт-платиноид-

но-медно-никелевую минерализацию. Кингашское {№ 17} (запасы 46,0 тыс. т Co, 0,02 % Co) [92] и Верхнекингашское {№ 18} (запасы 44,1 тыс. т Co, 0,0017 % Co) [93] месторождения подготавливаются к эксплуатации на предмет добычи Ni, Cu, Pt, Pd и Co. Ведутся геологоразведочные работы на кобальт-медно-никелевое оруденение на площади Токты-Ой {№ 19} (ресурсы 30 тыс. т Co, 0,02 % Co). На Восточно-Саянскую провинцию приходится 9,1 % балансовых запасов кобальта медно-никелевой формации России (90,5 тыс. т), см. рис. 5, а.

Интересен геологический объект, относимый к *колчеданной формации* – Савинское месторождения кобальта {№ 48} (запасы 1,9 тыс. т Co, 0,0017 % Co), где на основную залежь Савинского месторождения магнетитов наложена минерализация кобальтоносного пирита [94].

В Ирбинской группе кембрийских месторождений *железорудной скарновой формации* на Изыгском месторождении {№ 57} зафиксирована минерализация кобальтоносного пирита (запасы 3,9 тыс. т Co, 0,011 % Co).

В Присянской впадине в марганцеворудных горизонтах верхнерифейской Тагульской свиты (Изанско-Большеерминская марганцевоносная зона) отмечаются повышенные содержания кобальта – на месторождении *марганцеворудной формации* Каменское {№ 85} (0,01 % Co) и проявлениях Рудное (0,014 % Co) и участок Западный (0,01 % Co) [95]. Наличие кобальта отмечается также на Николаевском месторождении этой марганцевоносной зоны (0,02–0,15 %) [45].

Норильская провинция находится на северо-западе Сибирской платформы на ее сопряжении с Енисей-Хатангским прогибом. Здесь находятся уникальные по запасам и качеству месторождения *медно-никелевой формации*, в составе руд которых учтен и извлекается при добыче попутный кобальт. Здесь разрабатываются Октябрьское-Cu-Ni {№ 11} (запасы 376,6 тыс. т Co, среднее содержание 0,034 % Co), Талнахское {№ 12} (запасы 230,5 тыс. т Co, 0,026 % Co) и Норильск-1 {№ 13} (запасы 80,3 тыс. т Co, 0,016 % Co) месторождения, подготавливаются к эксплуатации Масловское {№ 14} (запасы 26,3 тыс. т Co, 0,013 % Co) и Черногорское {№ 15} (запасы 20,9 тыс. т Co, 0,026 % Co) [96]. Кобальт учтен также в ресурсах месторождений Вологодчанское {№ 12} (ресурсы 31,8 тыс. т Co, 0,019 % Co), Южно-Норильская ветвь (ресурсы 23,5 тыс. т Co, 0,01 % Co), Норильск-2 (ресурсы 3,9 тыс. т Co, 0,03 % Co), Горозубовское (ресурсы 6,2 тыс. т Co, 0,15 % Co) и на разведываемой площади в бассейне р. Чибичете (ресурсы 2,6 тыс. т Co, 0,01 % Co). В Норильской провинции учтено 734,3 тыс. т балансовых запасов кобальта, или 47 % баланса России (см. рис. 8) и 723,2 тыс. т балансовых запасов кобальта медно-никелевой формации, или 74 % от запасов этой формации в России (см. рис. 5, а).

Северо-Байкальская провинция находится в юго-восточной части складчатого обрамления Сибирской платформы, где в дунит-троктолит-габбровых интрузивах отмечается платино-медно-никелевое оруденение [97]. По проявлениям и месторождениям *медно-никелевой формации* этой провин-

¹¹ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. МПР РФ; 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/



ции с 1980-х годов производились авторские оценки их значимости – месторождение Чайское {№ 20} (ресурсы 27 тыс. т Co, 0,02 % Co) [98], Йоко-Довыренский массив (ресурсы 9,5 тыс. т Co, до 0,14 % Co), Авкитский массив (до 0,032 % Co), Маринкин массив (до 0,089 % Co) [99].

Джугджурская провинция находится на восточном фланге Джугджуро-Станового подвижного пояса протерозойской и мезозойской активизаций, в пределах которого находятся месторождения и проявления *медно-никелевой формации* с попутной кобальтовой минерализацией [99]. Наиболее подготовлено к эксплуатации месторождение Кун-Манье {№ 21} (запасы 25,1 тыс. т Co, 0,015 % Co) [100], медно-никелевая минерализация известна на Няндоминской перспективной площади в восточной части провинции [101]. На Джугджурскую провинцию приходится 2,6 % балансовых запасов кобальта медно-никелевой формации России (25,1 тыс. т). В Норильской провинции учтено 25,1 тыс. т балансовых запасов кобальта (1,5 % баланса России), см. рис. 8, или 2,5 % от российских запасов медно-никелевой формации (см. рис. 5, а).

Яно-Адычанская провинция находится в Кулар-Нерском поясе Верхояно-Колымской складчатой системы, сформированном в юрское-меловое время, внедрением коллизионных гранитоидов колымской серии в триасовые терригенные отложения с образованием золото-кварцевых, золото-сурьмяных и олово-вольфрамовых рудных объектов [102]. Олово-вольфрамовые рудные системы региона характеризуются присутствием раннемеловой арсенопирит-пиритовой и антимонитовой минерализации [102].

Олово-вольфрамовое месторождение Алыс-Хая {№ 77} (запасы 1,4 тыс. т, 0,08 % Co) относится к олово-вольфрамовой фации *мышьяково-кобальтовой формации* [102]. Кобальтовое оруденение представлено кобальтин-, а также кобальтсодержащими арсенопиритом и блеклыми рудами. К этой же фации относятся месторождение Илин-Тас (запасы 0,4 тыс. т, 0,015 % Co), проявления Бургачан и Эргеляхское.

Офиолитовые комплексы в Яно-Одычанской провинции отсутствуют, и есть предположение, что источником сидерофилов в рудных образованиях (Co, Ni, Cr) являются нескрытые глубинные источники [8].

Сеймчанская провинция находится в пределах Сугойского прогиба Верхояно-Колымской складчатой системы, сложенной палеозойскими терригенно-карбонатными отложениями, прорванными меловыми щелочными гранитами, с которыми связаны золоторудные месторождения золото-редкометалльной формации [103]. Гранитоиды характеризуются повышенными содержаниями Ni, Cu, As, Pb, Sr, Ag, Nb и Y, а золоторудные образования – высокими содержаниями летучих компонентов (As, Bi, Se, Te) [103, 104]. В Сеймчанской провинции сформировались и кобальтовые месторождения мышьяково-кобальтовой и колчеданной формаций.

Верхне-Сеймчанское месторождение висмут-кобальтовой фации *мышьяково-кобальтовой формации* {№ 73} (запасы 0,7 тыс. т, 0,11 % Co) в 1950-е годы разрабатывалось и на нем (включая соседнее место-

рождение Ветровое) добыто 0,8 тыс. т Co. Кобальт находится в минеральной форме кобальтина, герсдорфита и глаукодота. В Верхне-Сеймчанском рудном узле находятся также месторождения и проявления висмут-кобальтовой фации Ветвистое, Волочек, Ветровое [104], Лево-Сеймканское, Обход [105], Солнечное, Высокий, Хетагчан и Халали [103].

К золотосеребряной фации мышьяково-кобальтовой формации относится Подгорное проявление {№ 76} (запасы + ресурсы 1,2 тыс. т, 2,6 % Co) с кобальтовой минерализацией в виде кобальтоносного арсенопирита. К этой же фации можно отнести и Наталкинское золоторудное месторождение, на котором также отмечена минерализация кобальтоносного арсенопирита [106].

К олово-вольфрамовой фации мышьяково-кобальтовой формации относится Порожистое проявление олова с минерализацией кобальтоносного арсенопирита.

На медном месторождении *медно-колчеданной формации* Дегдэнрэкэн (Пиритовый) {№ 49} (ресурсы 80 тыс. т, 0,01 % Co) отмечается минерализация кобальтина.

Как и для Яно-Адычанской провинции, в Сеймчанской провинции отмечается отсутствие офиолитовых комплексов (традиционных источников кобальта для кобальторудных формаций).

Корякская провинция находится на севере Корякско-Камчатского мезозойско-кайнозойского вулканического пояса, где в альпинотипных мафит-ультрамафитовых комплексах известны проявления малосульфидной *платиноидно-медно-никелевой формации* [18, 19]. Выявленные объекты Майницкой {№ 30} и Валагинско-Карагинской {№ 31} [19] перспективных площадей, проявления Усть-Белое, Чирина, Красная Гора и Снежное {№ 32} малосульфидной формации МПГ совместно с медно-никелевой минерализацией включают и примесь кобальта [28]. Территория Корякской провинции в геологическом плане мало изучена и обнаружения новых месторождений платиноидно-медно-никелевой формации здесь весьма вероятны, в т.ч. и с кобальтовой составляющей.

Камчатская провинция располагается в южной части Корякско-Камчатского мезозойско-кайнозойского вулканического пояса, где в пределах поздне-меловой-палеоценовой Квинум-Кувалорогской рудной зоны были выявлены месторождения *медно-никелевой формации*, связанные с роговообманковыми перидотитами и габброидами, в т.ч. разрабатываемое в настоящее время месторождение Шануч {№ 24} (запасы 1,9 тыс. т, среднее содержание 0,145 % Co) [107], медно-никелевые руды которого экспортируются. В пределах этой рудной зоны известны также месторождения кобальтоносной медно-никелевой формации Дукукское {№ 23} (ресурсы 15 тыс. т, 0,03 % Co), Квинум I (ресурсы 5 тыс. т, 0,11 % Co), Квинум II (ресурсы 2 тыс. т, 0,05 % Co) и Кувалорог (0,01 % Co).

Всего по Камчатской провинции учтено 1,9 тыс. т запасов кобальта (0,1 % баланса России), или 0,2 % балансовых запасов медно-никелевой формации (см. рис. 5, а).



Обсуждение проблем сырьевой базы кобальта России

Сложности планирования и управления объемами добычи кобальта. Большая часть запасов кобальта Российской Федерации приходится на месторождения рудных формаций, где кобальт является лишь попутным компонентом. Планирование и управление объемами добычи на таких месторождениях осуществляется по условиям максимального извлечения главных компонентов руд, а получение попутных товарных продуктов является вторичной задачей. Таким образом, для комплексных месторождений с попутным кобальтом практически невозможно оперировать планированием его объемов добычи по изменениям рыночной потребности в кобальтовых продуктах.

В проектах разработки новых месторождений медно-никелевой формации планируется попутная добыча кобальта: Черногорское (0,73 тыс.т/год), Норильск I, южная часть (0,7), Масловское (0,7), Кингашское и Верхнекингашское (4,0), Кун-Манье (1,8), Еланское и Елкинское (0,9)¹². Проекты будут осуществляться не одновременно, к тому же часть новых объемов добычи медно-никелевых руд будет перерабатываться на металлургических заводах ПАО «Норильский никель» без изменения объемов переработки руд, так что суммарный выпуск дополнительного кобальта будет значительно меньший. В проекте разработки силикатно-кобальто-никелевого месторождения Бурукталинское также планируется попутное извлечение кобальта – до 0,13 тыс.т/год¹⁵. В целом выход кобальтовой продукции с месторождений медно-никелевой формации остается зависимым от объемов добычи главных компонентов руд (меди и никеля) и планировать ее выпуск возможно только по факту ожидаемого выхода товарной продукции, а не по востребованности на рынке потребления.

Реальное планирование дополнительных объемов добычи кобальта возможно только для месторождений рудных формаций, где кобальт является главным компонентом руд. Это месторождения мышьяково-кобальтовой формации и формации кобальтоносных марганцевых корок. Для мышьяково-кобальтовой формации следует отметить, что запасы подготовленных и законсервированных месторождений этой формации не очень большие (47,8 тыс. т Со), а возможности открытий новых месторождений весьма проблемны ввиду отсутствия системного прогноза ресурсов кобальта. Тем не менее возможна подготовка и реализация проектов разработки Кара-Кульского месторождения в Республике Алтай и возобновление разработки Ховуаксинского месторождения в Республике Тыва, а также переработки хвостов и отвалов ГОКа «Тувакобальт» месторождения Хову-Аксы. В отношении месторождений формации кобальтоносных марганцевых корок на Магеллановых горах в Тихом океане следует отметить, что они находятся на стадии

геологического изучения, и планировать их быстрое вовлечение в эксплуатацию преждевременно. Кроме того, для этого типа месторождений технологии добычи и обогащения еще только разрабатываются, а также определенную проблему составляют природные (экстремальные погодные условия) [108, 109] и геополитические [110] риски осуществления этих работ.

Таким образом, по месторождениям медно-никелевой и силикатно-кобальт-никелевой формации возможен слабоуправляемый прирост добычи кобальта до 8 тыс.т/год, а также управляемый прирост по месторождениям мышьяково-кобальтовой формации – до 4 тыс.т/год.

Слабая база прогнозных ресурсов. Как отмечалось выше, для кобальта системного учета прогнозных ресурсов в целом по России не велось. Даже по медно-никелевой формации оценки прогнозных ресурсов по флангам и на глубину производилась лишь для отдельных крупных объектов.

Специализированные поиски на кобальтовую минерализацию велись в 1960–1970-е годы только в пределах Алтае-Саянской складчатой области, но и на этой территории оценка прогнозных ресурсов производилась произвольно в авторских вариантах и не по всем выявленным объектам. Тем не менее именно при этих поисках выявлены многочисленные месторождения и проявления мышьяково-кобальтовой формации, а также оценены запасы и ресурсы попутного кобальта на объектах скарновой железорудной формации. Для мышьяково-кобальтового оруденения выделено множество парагенезисов минеральных ассоциаций (фаций) [9, 10], что, в частности, свидетельствует о вовлечении кобальта в формирование многих рудных гидротермальных формаций (золота, серебра, меди, никеля, висмута, сурьмы, олова, вольфрама и др.), а также в объекты нерудных формаций – флюоритовых [111] и магнетитовых [94] месторождений с попутным кобальтом. Имеет смысл произвести системную ревизию имеющихся геологических материалов по известным проявлениям кобальтовой минерализации с оценкой прогнозных ресурсов по единой методике по всей России.

При проведении системного литохимического опробования в составе геолого-съёмочных работ и специализированных геохимических съёмок разного масштаба геохимические аномалии кобальта фиксировались достаточно часто, но в большинстве случаев интерпретировались как породные аномалии, связанные с площадями распространения основных и ультраосновных пород. Лишь при наличии признаков медно-никелевой, кобальт-никелевой или мышьяково-кобальтовой минерализации они переходили в разряд аномалий рудного генезиса, заслуживающих оценки [112]. При этом вероятные, но неочевидные проявления кобальтоносных железомарганцевых корок и конкреций, флюоритовых и магнетитовых объектов, других кобальтоносных рудных объектов оказывались вне поля зрения поисковой оценки. В рамках предложенной ревизии имеющихся геологических данных с оценкой прогнозных ресурсов следует оценить ранее игнорируемые «породные» геохимические аномалии кобальта.

¹² Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. МПР РФ; 2022. 626 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/

¹⁵ Там же.



На месторождениях силикатно-кобальт-никелевой формации геологоразведочные работы производились исходя из задачи максимизации запасов никеля. Кобальт, находясь в тесной ассоциации с никелем, все же имеет свои особенности пространственного распространения, накапливаясь не в средней, а в нижней части разреза коры выветривания [13]. Некоторые фрагменты обогащенных кобальтом руд могут находиться вне контура подсчета запасов, в частности оставаясь в невыбранных целиках на множестве отработанных силикатно-кобальт-никелевых месторождений Уральской провинции. По этой же причине не производилась оценка асболоновых проявлений с высоким содержанием кобальта на фоне рядовых значений никеля в Салаирской провинции. Предлагается произвести камеральную переоценку разведанных силикатно-кобальт-никелевых месторождений с *геометризацией распределения кобальта в качестве главного компонента руд*, а также произвести ревизию проявлений никелевых и железорудных кор выветривания на предмет ведущей роли кобальта. Подобная ревизия требуется и по месторождениям кобальтсодержащей марганцеворудной формации (Мазульское, Южно-Хинганская группа и др.).

В отношении *формации кобальтоносных марганцевых корок* требуется провести специальные исследования по возможности их нахождения на наземной территории Российской Федерации (ревизия геологической информации, определение их признаков и выработка критериев поиска, поиски и оценка объектов КМК).

Развитие технологий извлечения кобальта. В настоящее время в России кобальт извлекается только в ПАО «Норильский никель» из медно-никелевых руд, где он выделяется на гидрометаллургических рафинировочных операциях в гидратный осадок в ходе очистки никелевого анолита, с дальнейшим производством электролитического (катодного) кобальта [6]. На мышьяково-арсенидном месторождении Хову-Аксы при деятельности ГОКа «Тувакобальт» осуществлялась гидрометаллургическая переработка руд с получением коллективного концентрата по аммиачно-карбонатной технологии в автоклавах [113]. Силикатные кобальт-никелевые руды уральских месторождений по большей части перерабатывались в Орском, Уфалейском и Режском никелевых заводах на ферроникель путем их электроплавки, а кобальт, накапливаемый в шлаках, направлялся на серноокислотное выщелачивание в автоклавах.

Развитие технологий обогащения и передела кобальтсодержащих руд позволяет вовлекать в эксплуатацию кобальторудные объекты, ранее не востребованные по технологическим и экономическим причинам. *Геотехнологические способы подземного (скважинного) и кучного выщелачивания*, являясь всего лишь разновидностями гидрометаллургических процессов, значительно повышают рентабельность добычи за счет сокращения капитальных и эксплуатационных расходов [114]. Наиболее известно массовое применение подземного выщелачивания урана и кучного выщелачивания золота. Технологические испытания куч-

ного выщелачивания никеля и кобальта ведутся по силикатным рудам Серовского (Уральская провинция) [115] и Белининского (Салаирская провинция) [78] месторождений с извлечением кобальта в раствор до 88 %. Проведены опытно-промышленные испытания подземного (скважинного) способа отработки на Рогожинском месторождении (Уральская провинция), показавшие принципиальную возможность такого способа добычи кобальта и никеля [116]. На основе кобальт-медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатская провинция) разрабатывается технология биовыщелачивания – биотехнология окисления сульфидов и арсенидов непосредственно в рудной залежи с использованием ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов [117], в результате чего становится возможным последующее серноокислотное выщелачивание кобальта, меди и никеля из окисленных руд геотехнологическими (подземным или кучным) способами. Испытания по кучному биовыщелачиванию производились также по бедным медно-никелевым рудам и техногенному сырью с месторождений Кольской провинции [119] с извлечением никеля и кобальта в раствор до 60 %. Кучное и подземное выщелачивание предлагается и для месторождений кобальтсодержащих урано-фосфатных месторождений Калмыкии [40]. Использование биотехнологий окисления сульфидов и геотехнологий скважинной добычи и кучного выщелачивания позволит вовлекать в эксплуатацию рудные объекты с низким качеством руд и небольшими запасами, а также техногенные образования продуктов обогащения и металлургического передела. Наиболее интересными для геотехнологических способов добычи кобальта являются месторождения силикатно-кобальт-никелевой формации.

Выводы

Имеющиеся в России балансовые запасы кобальта весьма значительные (1562,3 тыс. т), достаточные на десятки лет эксплуатации, текущие объемы производства кобальта (9,2 тыс.т/год) превышают его национальное потребление. В то же время ввиду того, что на рудные формации, где кобальт является лишь сопутным компонентом, приходится 97 % его балансовых запасов и 100 % его добычи, существует проблема слабой управляемости объемов предложения кобальта в России. В свете ожидаемого увеличения потребления кобальта за счет развития отрасли производства литий-ионных аккумуляторных батарей планировать увеличение его добычи будет затруднено, т.к. новые проекты разработки комплексных медно-никелевых и силикатно-никелевых месторождений в первую очередь ориентированы на производство главных компонентов – никеля и меди, а выход объемов кобальта – это уже зависимая величина. Средние содержания кобальта в комплексных месторождениях весьма небольшие: для медно-никелевой формации – до 0,17 %, для силикатно-кобальт-никелевой – до 0,11 %, для медно-колчеданной – до 0,07 %, для железорудной – до 0,18 %, при таких концентрациях извлечение одного лишь кобальта нерентабельно. Собственно кобальтовые месторождения представлены на тер-



ритории Российской Федерации объектами мышьяково-кобальтовой формации, среднее содержание кобальта в которых до 2,42 %, но подготовленные запасы кобальта этой формации составляют всего 3,0 % от российского баланса. Всего по новым проектам разработки месторождений с попутным кобальтом возможен прирост добычи кобальта до 8 тыс.т/год, а по месторождениям мышьяково-кобальтовой формации – управляемый прирост до 4 тыс.т/год.

За Российской Федерацией закреплены разведочные районы международного морского дна в Тихом океане, где ведутся геологические исследования формаций кобальтоносных марганцевых корок на Магеллановых горах (ресурсы 110 тыс. т Со) и железомарганцевых конкреций рудного поля Кларин-Клиппертон (ресурсы 985 тыс. т Со). Данные объекты являются весьма перспективными для добычи и извлечения кобальта, но имеют место медленное развитие техники и технологий добычи на больших глубинах, переработки новых типов руд, а также проблемы метеорологических и политических рисков разработки этих месторождений.

При наличии достаточно большой базы подготовленных запасов кобальта в Российской Федерации отсутствует системный учет его прогнозных ресурсов, что осложняет планирование геологоразведочных работ на кобальт.

Предлагается произвести на территории Российской Федерации системную ревизию имеющихся гео-

логических материалов по известным проявлениям кобальтовой минерализации с оценкой прогнозных ресурсов по единой методике и собственно составить баланс прогнозных ресурсов кобальта. Оценивать следует не только объекты известных кобальторудных формаций, но и наличие кобальтовой минерализации в других рудных и нерудных формациях. Ревизии и оценке следует подвергнуть и результаты геохимических съемок, в которых аномалии кобальта зачастую исключались из перспективных как имеющие «породную» природу.

На месторождениях силикатно-кобальт-никелевой формации, где их оценка производилась исходя из задачи максимизации запасов никеля, предлагается произвести переоценку с геометризацией распределения кобальта в качестве главного компонента руд, а также произвести ревизию проявлений никелевых и железорудных кор выветривания на предмет ведущей роли кобальта. Такие объекты становятся управляемыми при планировании добычи именно кобальта.

Развитие технологий подземного и кучного выщелачивания, а также биовыщелачивания кобальтсодержащих руд позволит вовлекать в эксплуатацию кобальторудные объекты с низким качеством руд и небольшими запасами, а также техногенные образования продуктов обогащения и металлургического передела. Наиболее интересными для геотехнологических способов добычи кобальта являются месторождения силикатно-кобальт-никелевой формации.

Список литературы / References

1. *Cobalt Market Report 2022*. Guildford, UK: Cobalt Institute; 2023. 45 p.
2. Dehaine Q., Tijsseling L.T., Glass H.J. et al. Geometallurgy of cobalt ores: a review. *Minerals Engineering*. 2021;(160):106656. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106656>
3. Mouloudi L., Evrard Samuel K. Critical materials: a systematic literature review. *Social Science Research Network*. 2022:4108632. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4108632>
4. Конкина О.М., Кочнев-Первухов В.И. Структура сырьевой базы и добычи кобальта в России. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2009;(5):14–17.
Konkina O.M., Kochnev-Pervukhov V.I. The structure of the cobalt resource base and production in Russia. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2009;(5):14–17. (In Russ.)
5. Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю., Ткачева Е.В. Сырьевой потенциал лития России. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022;333(12):7–16. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3975>
Boyarko G.Yu., Khatkov V.Yu., Tkacheva E.V. Lithium raw potential in Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(12):7–16. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3975>
6. НДТ ИТС 12–2019. *Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям: Производство никеля и кобальта*. М.: Бюро НТД; 2019. 195 с.
BAT BREF 12–2019. *Technical reference document on best available techniques: nickel and cobalt production*. Moscow: Bureau of BAT; 2019. 195 с. (In Russ.)
7. *Mineral commodity summaries 2025*. U.S. Geological Survey; 2025. 212 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2025>
8. Калашников В.В. Перспективы освоения месторождений Южно-Янского оловорудного района. *Руды и металлы*. 2022;(2):56–64. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10010>
Kalashnikov V.V. Prospects for the development of the deposits of the Yuzhno-Yansky tin ore district. *Ores and Metals*. 2022;(2):56–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10010>
9. Шишкин Н.Н. *Кобальт в рудах месторождений СССР*. М.: Недра; 1973. 320 с.
Shishkin N.N. *Cobalt in ores of USSR deposits*. Moscow: Nedra; 1973. 320 p. (In Russ.)
10. Борисенко А.С., Лебедев В.И., Тюлькин В.Г. *Условия образования гидротермальных кобальтовых месторождений*. Новосибирск: Наука; 1984. 171 с.
Borisenko A.S., Lebedev V.I., Tyulkin V.G. *Formation conditions of hydrothermal cobalt deposits*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 171 p. (In Russ.)



11. Третьяков Г.А., Мелекесцева И.Ю. Серпентинизация ультрамафитов и источник металлов для кобальт-медноколчеданных месторождений. В: *Металлогения древних и современных океанов – 2008*. Рудоносные комплексы и рудные фракции. Материалы Четырнадцатой научной студенческой школы. Миасс: ИМин УрО РАН; 2008. С. 26–30.
Tret'yakov G.A., Melekestseva I.Yu. Serpentinization of ultramafic rocks and metal source for co-bearing massive sulfide deposits. In: *Metallogeny of Ancient and Modern Oceans – 2008. Ore-Bearing Complexes and Ore Facies*. Materials of the XIVth Scientific Students' School. Miass: IMin UB RAS; 2008. Pp. 26–30. (In Russ.)
12. Мурзин В.В., Сазонов В.Н. Сульфидная золото-кобальт-медная минерализация Высокогорского скарново-магнетитового месторождения (Урал). *Труды Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого*. 1996;(143):168–170.
Murzin V.V., Sazonov V.N. Sulfide gold-cobalt-copper mineralization of the Vysokogorsk skarn-magnetite deposit (Urals). *Proceedings of the A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry*. 1996;(143):168–170. (In Russ.)
13. Вершинин А.С. *Геология, поиски и разведка гипергенных месторождений никеля*. М.: Недра; 1993. 305 с.
Vershinin A.S. *Geology, prospecting and exploration of supergene nickel deposits*. Moscow: Nedra; 1993. 305 p. (In Russ.)
14. Рыжкова С.О., Таловина И.В., Лазаренков В.Г. Асболан Буруктальского гипергенного никелевого месторождения (Южный Урал). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2010;(3):75–78.
Ryzhkova S.O., Talovina I.V., Lazarenkov V.G. Asbolan Buruktalsk hypogene nickel deposit (South Urals). *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 2010;(3):75–78. (In Russ.)
15. 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>
16. Боярко Г.Ю., Лаптева А.М., Болсуновская Л.М. Минерально-сырьевая база меди России: состояние, возможности развития. *Горные науки и технологии*. 2024;9(4):352–386. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-248>
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>
17. 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. *Ore & Metals*. 2012;(6):9–23. (In Russ.)
18. 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 in the Koryak-Kamchatka region. In: *Magmatism and ore potential of volcanic belts*. Khabarovsk: ITiG; 1998. Pp. 73–74. (In Russ.)
19. Степанов В.А. Платиноидно-медно-никелевые провинции Северо-Азиатского кратона. *Региональная геология и металлогения*. 2013;(56):78–87.
Stepanov V.A. Platinum-copper-nickel provinces of the North Asian craton. *Regional Geology and Metallogeny*. 2013;(56):78–87. (In Russ.)
20. Воронцова Н.И., Таловина И.В., Лазаренков В.Г. и др. Перспективы никелевой промышленности Урала в свете изучения структур рудных полей гипергенных никелевых месторождений. *Записки Горного института*. 2009;(183):78–87.
Vorontsova N.I., Talovina I.V., Lazarenkov V.G. et al. Prospects of nickel industry in the Urals in the light of ore field structure study in supergene nickel deposits. *Journal of Mining Institute*. 2009;(183):78–87. (In Russ.)
21. Сагдиева Р.К., Таловина И.В., Воронцова Н.И. Современные взгляды на формирование никеленосных кор выветривания ультраосновных массивов на Урале. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(6):278–288.
Sagdieva R.K., Talovina I.V., Vorontsova N.I. Modern views on the formation of nickel weathering crusts in ultrabasic massifs of the Urals. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(6):278–288. (In Russ.)
22. Мелекесцева И.Ю. *Гетерогенные кобальт-медноколчеданные месторождения в ультрамафитах палеостровоудных структур*. М.: Наука; 2007. 241 с.
Melekestseva I.Yu. *Heterogeneous cobalt-copper-pyrite deposits in ultramafics of paleo-arc structures*. Moscow: Nauka; 2007. 241 p. (In Russ.)
23. Косарев А.М. Колчеданосные вулканические комплексы Южного Урала: петролого-геохимические особенности, геодинамика, продуктивность. В: *Металлогения древних и современных океанов – 2011. Рудоносность осадочно-вулканогенных и гипербазитовых комплексов. Материалы XVII научной молодежной школы*. Миасс, 25–29 апреля 2011 г. Миасс: Изд-во Института минералогии УрО РАН; 2011. С. 47–51.
Kosarev A.M. Pyrite-bearing volcanic complexes of the Southern Urals: petrological-geochemical features, geodynamics, and productivity. In: *Metallogeny of Ancient and Modern Oceans – 2011. Ore Potential of*



- Sedimentary-Volcanogenic and Ultramafic Complexes: proceedings of the XVII Youth Science School*. 2011, April 25–29, Miass, Russia. Miass: Institute of Mineralogy UB RAS; 2011. Pp. 47–51. (In Russ.)
24. Савин С.В., Савченко Н.А., Черницын В.В. и др. *Колчеданные месторождения Большого Кавказа*. М.: Недра; 1973. 256 с.
Savin S.V., Savchenko N.A., Chernitsyn V.V. et al. *Pyritic deposits of the Greater Caucasus*. Moscow: Nedra; 1973. 256 p. (In Russ.)
25. Минина О.В., Волчков А.Г., Никешин Ю.В., Татарко Н.И. Кобальт-медноколчеданные месторождения в базальт-серпентинитовых толщах Южного Урала. *Руды и металлы*. 2008;(4):64–75.
Minina O.V., Volchkov A.G., Nikeshin Yu.V., Tatarko N.I. Cobalt-copper-pyrite deposits in basalt-serpentine sequences of the Southern Urals. *Ore & Metals*. 2008;(4):64–75. (In Russ.)
26. 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. *Geological-industrial types of copper, zinc, and lead deposits in the Urals: Geological settings, formation history, and prospects*. Yekaterinburg: Ural State Mining University; 2013. 203 p. (In Russ.)
27. Сняжков В.И. *Генетические типы скарновых рудообразующих систем*. Новосибирск: Наука, СО АН СССР; 1990. 71 с.
Sinyakov V.I. *Genetic types of skarn ore-forming systems*. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch of USSR Academy of Sciences; 1990. 71 p. (In Russ.)
28. Архипов Г.И. *Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока: обзор состояния и возможности развития*. М.: Горная книга; 2010. 817 с.
Arkhipov G.I. *Mineral resources of the mining industry in the Far East: Review of current status and development potential*. Moscow: Gornaya Kniga; 2010. 817 p. (In Russ.)
29. Гусев Н.И., Николаева Л.С., Гусев А.И. Верхнепалеозойские и мезозойские железокислые медно-золоторудные системы юго-запада Алтае-Саянского региона Сибири. *Региональная геология и металлогения*. 2006;(29):88–99.
Gusev N.I., Nikolaeva L.S., Gusev A.I. Late Paleozoic and Mesozoic iron-oxide copper-gold ore systems in the southwestern Altai-Sayan region of Siberia. *Regional Geology and Metallogeny*. 2006;(29):88–99. (In Russ.)
30. 05.03–19L.84 Технология сухого обогащения отходов Абагурской аглофабрики. *РЖ 19L. Технология неорганических веществ и материалов*. 2005;(3):84.
05.03-19L.84 Dry beneficiation technology for waste from Abagur sintering plant. *Abstract Journal 19L. Technology of Inorganic Substances and Materials*. 2005;(3):84. (In Russ.)
31. 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.
Voytekhovskiy Yu.L., Neradovskiy Yu.N., Grishin N.N., Rakitina E. Yu., Kasikov A. G. Kolvitsa field (geology, material composition of ores). *Vestnik of Murmansk State Technical University*. 2014;17(2):271–278. (In Russ.)
32. 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. (Перев. вер.: 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>)
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> (Orig. ver.: 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. *Geologiya Rudnyh Mestorozhdenij*. 2011;53(2):143–157. (In Russ.))
33. Павленко Ю.В. Перспективы Уронайского рудного узла. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(S3):167–180.
Pavlenko Yu.V. Prospects of the Uronaysky ore cluster. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(S3):167–180. (In Russ.)
34. Симаненко Л.Ф., Раткин В.В., Пахомова В.А., Елисеева О.А. Ni-Co арсениды и Ag-Bi теллуриды в В-Pb-Zn скарнах Партизанского месторождения (Дальнегорский рудный район, Сихотэ-Алинь, Россия). *Тихоокеанская геология*. 2023;42(4):61–75. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-4-61-75>
Simanenko L.F., Ratkin V.V., Pakhomova V.A., Eliseeva O.A. Ni-Co arsenides and Ag-Bi tellurides in B-Pb-Zn skarns of the Partizanskoe deposit (Dalnegorsky ore district, Sikhote-Alin, Russia). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2023;42(4):61–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-4-61-75>
35. Столяров А.С., Ивлева Е.И. *Ергенинский ураново-редкометалльный район Калмыкии*. М.: ВИМС; 2008. 170 с.
Stolyarov A.S., Ivleva E.I. *Ergyninsky uranium-rare metal district of Kalmykia*. Moscow: Il-Russian Research Institute of Mineral Raw Materials; 2008. 170 p. (In Russ.)
36. Вялов В.И., Ларичев А.И., Балахонова А.С. Рудогенез диктионемовых сланцев и оболочных песчаников Прибалтийского бассейна. *Региональная геология и металлогения*. 2013;(55):87–98.



- Vyalov V.I., Larichev A.I., Balakhonova A.S. Ore genesis in dictyonema shales and obolus sandstones of the Baltic sedimentary basin. *Regional Geology and Metallogeny*. 2013;(55):87–98. (In Russ.)
37. Вялов В. И., Дю Т. А., Шишов Е. П. Уран и редкоземельные элементы в диктионемовых сланцах Прибалтийского бассейна (Кайболово-Гостилицкая площадь). *Георесурсы*. 2024;26(1):3–19. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.1.3>
Vyalov V.I., Dyu T.A., Shishov E.P. Uranium and Rare-Earth Elements in Dictyonema Shale of the Baltic Sedimentary Basin (Kaibolovo-Gostilitzy Area). *Georesources*. 2024;26(1):3–19. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.1.3>
38. Илясов В. С., Староверов В. Н., Илясов В. Н. Условия образования горючих сланцев Волжского бассейна с учетом их металлоносности на рений и другие ценные элементы. *Георесурсы*. 2024;26(2):3–16. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.2.3>
Ilyasov V.S., Staroverov V.N., Ilyasov V.N. The Formation Conditions of the Volga Basin Oil Shales in Relation to Their Metallogeny on Rhenium and Other Valuable Elements. *Georesources*. 2024;26(2):3–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2024.2.3>
39. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. *Геохимия черных сланцев*. Л.: Наука; 1988. 272 с.
Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geochemistry of black shales*. Leningrad: Nauka; 1988. 272 p. (In Russ.)
40. Тюленева В. М., Быстров И. Г., Расулова С. Д., Каминов Б. Ю. Особенности комплексных органо-фосфатных руд в Ергенинском районе Калмыкии. *Разведка и охрана недр*. 2014;(7):6–12.
Tyuleneva V.M., Bystrov I.G., Rasulova S.D., Kaminov B.Yu. Features of integrated organo-phosphate ores in Ergeninsky area of Kalmykia. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2014;(7):6–12. (In Russ.)
41. Маракушев А. А. Геохимия и генезис черных сланцев. *Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*. 2009;(7):2–4.
Marakushev A.A. Geochemistry and genesis of black shales. *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS*. 2009;(7):2–4. (In Russ.)
42. Кулешов В. Н., Брусницын А. И., Старикова Е. В. Месторождения марганца на северо-востоке Европейской части России и Урала: геохимия изотопов, генезис, эволюция рудогенеза. *Геология рудных месторождений*. 2014;56(5):423–439. <https://doi.org/10.7868/S0016777014050062> (Перев. вер.: Kuleshov V.N., Brusnitsyn A.I., Starikova E.V. Manganese deposits in northeastern European Russia and the Urals: isotope geochemistry, genesis, and evolution of ore formation. *Geology of Ore Deposits*. 2014;56(5):380–394. <https://doi.org/10.1134/S1075701514050067>)
Kuleshov V.N., Brusnitsyn A.I., Starikova E.V. Manganese deposits in northeastern European Russia and the Urals: isotope geochemistry, genesis, and evolution of ore formation. *Geology of Ore Deposits*. 2014;56(5):380–394. <https://doi.org/10.1134/S1075701514050067> (Orig. ver.: Kuleshov V.N., Brusnitsyn A.I., Starikova E.V. Manganese deposits in northeastern European Russia and the Urals: isotope geochemistry, genesis, and evolution of ore formation. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenij*. 2014;56(5):423–439. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0016777014050062>)
43. Гусев А. И. Типизация марганцевого оруденения Горного Алтая и Салаира. *Современные наукоемкие технологии*. 2014;(2):81–85.
Gusev A.I. Typization of manganese ore mineralization of mountain Altai and Salair. *Modern High Technologies*. 2014;(2):81–85. (In Russ.)
44. Разва О. С., Абрамова Р. Н. Петрографическая характеристика рудовмещающих пород и марганцевых руд Селезенского месторождения (Кемеровская область). *Национальная ассоциация ученых*. 2015;(2–11):15–18.
Razva O.S., Abramova R.N. Petrographic characteristics of ore-hosting rocks and manganese ores of the Selezenskoe deposit (Kemerovo region). *National Association of Scientists*. 2015;(2–11):15–18. (In Russ.)
45. Цыкин Р. А. Гипергенные марганцевые руды Центральной Сибири. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2008;1(1):3–16.
Tsykin R.A. Hypergene Manganese Ores of Central Siberia. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2008;1(1):3–16. (In Russ.)
46. Брусницын А. И., Белогуб Е. В., Жуков И. Г. и др. Минералогия и геохимия силикатно-карбонатных марганцевых руд Мазульского месторождения, Красноярский край. *Металлогения древних и современных океанов*. 2015;(1):68–71.
Brusnitsyn A.I., Belogub E.V., Zhukov I.G. et al. Mineralogy and geochemistry of silicate-carbonate manganese ores of the Mazulskoe deposit, Krasnoyarsk Territory. *Metallogeniya Drevnykh i Sovremennykh Okeanov*. 2015;(1):68–71. (In Russ.)
47. Бердников Н. В., Невструев В. Г., Саксин Б. Г. Источники и условия формирования железо-марганцевой минерализации Буреинского и Ханкайского массивов (Дальний Восток России). *Тихоокеанская геология*. 2016;35(4):28–39. (Перев. вер.: Berdnikov N.V., Nevstruev V.G., Saksin B.G. Sources and formation conditions of ferromanganese mineralization of the Bureya and Khanka massifs, Russian Far East. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2016;10(4):263–273. <https://doi.org/10.1134/S1819714016040023>)
Berdnikov N.V., Nevstruev V.G., Saksin B.G. Sources and formation conditions of ferromanganese mineralization of the Bureya and Khanka massifs, Russian Far East. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2016;10(4):263–273. <https://doi.org/10.1134/S1819714016040023> (Orig. ver.: Berdnikov N.V., Nevstruev V.G., Saksin B.G. Sources and formation conditions of ferromanganese mineralization of the Bureya and Khanka massifs, Russian Far East. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2016;35(4):28–39. (In Russ.))



48. 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-3-58-62>
49. 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. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2011;(5):32–40. (In Russ.)
50. Молдурушку М.О., Копылов Н.И. *Переработка отвалов Хову-Аксы*. Кызыл: Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН; 2021. 112 с.
Moldurushku M. O., Kopylov N. I. *Processing of waste dumps from Khovu-Aksy*. Kyzyl: Tuvinian Institute for Integrated Development of Natural Resources, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021. 112 p. (In Russ.)
51. Гильмутдинова Р.А., Мичурин С.В., Ковтуненко С.В., Елизарьева Е.Н. К вопросу об использовании и переработке отходов горно-обогатительных комбинатов Южного Урала. *Успехи современного естествознания*. 2017;(2):68–73.
Gilmutdinova R. A., Michurin S. V., Kovtunencko S. V., Elizareva E. N. On the question of using and recycling of waste of south ural mining and processing plants. *Advances in Current Natural Sciences*. 2017;(2):68–73. (In Russ.)
52. *ISBA/18/A/11. Decision of the Assembly of the International Seabed Authority relating to the Regulations on Prospecting and Exploration for Cobalt-rich Ferromanganese Crusts in the Area*. International Seabed Authority UN. Eighteenth session; Kingston, Jamaica; 2012:1-52.
53. Оганесян Л.В., Мирлин Е.Г. Минерально-сырьевые ресурсы твердых полезных ископаемых Мирового океана: современные реалии и потенциал рудоносности. *Океанологические исследования*. 2023;51(4):52–89. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).4)
Oganesyanyan L. V., Mirlin E. G. Mineral resources of solid minerals of the world ocean: modern realities and ore potential. *Journal of Oceanological Research*. 2023;51(4):52–89. (In Russ.) [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).4)
54. Tagliabue A., Hawco N. J., Bundy R. M. et al. The role of external inputs and internal cycling in shaping the global ocean cobalt distribution: insights from the first cobalt biogeochemical model. *Global Biogeochem Cycles*. 2018;32(4):594–616. <https://doi.org/10.1002/2017GB005830>
55. Пономарева И.Н., Юбко В.М., Хулапова Т.М. и др. Геологоразведочные работы на месторождении кобальтоносных железомарганцевых корок в пределах российского разведочного района Магеллановых гор Тихого океана: история и результаты исследований. *Океанологические исследования*. 2023;51(4):135–166. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).6)
Ponomareva I. N., Yubko V. M., Khulapova T. M. et al. Geological exploration works at the deposit of cobalt-rich ferromanganese crusts within the Russian exploration area of the Magellan mountains of the Pacific Ocean: history and research results. *Journal of Oceanological Research*. 2023;51(4):135–166. (In Russ.) [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).6](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).6)
56. Юбко В.М., Пономарева И.Н., Лыгина Т.И. Современные тенденции развития техники и технологий разведки и добычи железомарганцевых конкреций и кобальтоносных железомарганцевых корок Мирового океана. *Океанологические исследования*. 2023;51(4):186–215. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).8)
Yubko V. M., Ponomareva I. N., Lygina T. I. The modern trends in the development of equipment and technology exploration and mining of manganese nodules and cobalt-rich ferromanganese crusts in the world ocean. *Journal of Oceanological Research*. 2023;51(4):186–215. (In Russ.) [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).8](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).8)
57. Максимов С.О., Сафронов П.П. Геохимические особенности и генезис континентальных кобальтоносных железомарганцевых образований. *Геология и геофизика*. 2018;59(7):931–950. <https://doi.org/10.15372/GiG20180703> (Перев. вер.: Maksimov S. O., Safronov P. P. Geochemical features and genesis of continental cobalt-rich ferromanganese crusts. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;59(7):745–762. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.07.003>)
Maksimov S. O., Safronov P. P. Geochemical features and genesis of continental cobalt-rich ferromanganese crusts. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;59(7):745–762. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.07.003> (Orig. ver.: Maksimov S. O., Safronov P. P. Geochemical features and genesis of continental cobalt-rich ferromanganese crusts. *Geologiya i Geofizika*. 2018;59(7):931–950. <https://doi.org/10.15372/GiG20180703>)
58. Богущ И.А., Рябов Г.В., Шапошникова С.Д. Кобальтоносность руд медноколчеданных месторождений Северного Кавказа. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2014;(3):91–93.
Vogush I. A., Ryabov G. V., Shaposhnikova S. D. Ores copper pyritic deposits North Caucasus. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2014;(3):91–93. (In Russ.)
59. Паливода Н.К. Прогнозная оценка запасов полиметаллических руд и кобальтовой минерализации на Борчинском участке Хнов-Борчинского рудного поля (Дагестан). *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. 2008;(52):47–54.



- Palivoda N.K. Prognostic assessment of polymetallic ore and cobalt mineralization reserves at the Borchinsky site of the Khnov-Borchinsky ore field (Dagestan). *Trudy Instituta Geologii Dagestanskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2008;(52):47–54. (In Russ.)
60. Чернышов Н.М. Сульфидные платиноидно-медно-кобальт-никелевые месторождения Новохоперского рудного района и проблемы их комплексного освоения в условиях жестких экологических ограничений и сохранения уникальной экосистемы. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2013;(2):95–105.
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. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2013;(2):95–105. (In Russ.)
61. Меркулов И.А. Социально-экологические и экономические проблемы разработки медно-никелевых и никель-кобальтовых месторождений в пределах Воронежской антеклизы. В: *Экология и природопользование: устойчивое развитие сельских территорий. III Всероссийская научно-практическая конференция*. Краснодар, 05–09 июня 2023 г.; Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет; 2023. С. 494–497.
Merkulov I.A. Socio-ecological and economic problems of copper-nickel and nickel-cobalt deposits development within the Voronezh Anteclise. In: *Ecology and nature management: sustainable development of rural territories. III All-Russian Scientific-Practical Conference*. Krasnodar, June 05–09, 2023. Krasnodar: Kuban State Agrarian University; 2023. Pp. 494–497. (In Russ.)
62. Ключарев Д.С., Соесоо А. Рудное будущее горючих сланцев. *Разведка и охрана недр*. 2019;(1):57–62.
Klyucharev D.S., Soesoo A. Ore future of combustible shales. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2019;(1):57–62. (In Russ.)
63. Иванова Н.В., Гусев А.В., Матреничев А.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Карельская. Р-37-ХV (Поча). Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ; 2023. 136 с.
Ivanova N.V., Gusev A.V., Matrenichev A.V. et al. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second Edition. Karelian Series. Sheet P-37-XV (Pocha). Explanatory Note*. St. Petersburg: VSEGEI; 2023. 136 p. (In Russ.)
64. Семенов В.С., Корнеев С.И., Яковлева О.А. и др. Распределение Fe-Ni-Cu сульфидной минерализации в породах Бураковско-Аганозерской расслоенной интрузии. *Петрология*. 2004;12(3):303–320.
Semenov V.S., Semenov S.V., Zil'bershtein A.Kh. et al. Distribution of Fe-Ni-Cu sulfide mineralization in the rocks of the Burakovsko-Aganozerskii layered intrusion. *Petrology*. 2004;12(3):265–281. (Orig. ver.: Semenov V.S., Semenov S.V., Zil'bershtein A.Kh. et al. Distribution of Fe-Ni-Cu sulfide mineralization in the rocks of the Burakovsko-Aganozerskii layered intrusion. *Petrologiya*. 2004;12(3):303–320. (In Russ.))
65. 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>
66. Ларькина Н.Ю., Кулешевич Л.В. Рентгеноспектральный микроанализ в изучении минералогии золото-содержащих полиметаллических колчеданных руд на примере Северо- и Верхне-Вожминского проявлений Каменноозерской структуры, Восточная Карелия. *Минералы: строение, свойства, методы исследования*. 2011;(3):201–203.
Larkina N.Yu., Kuleshevich L.V. X-ray spectral microanalysis in the study of mineralogy of gold-bearing polymetallic pyrite ores: Case study of Severno- and Verkhne-Vozhminsky occurrences in the Kamenozerskaya structure, Eastern Karelia. *Mineralogy: Stroenie, Svoistva, Metody Issledovaniya*. 2011;(3):201–203. (In Russ.)
67. Турченко С.И. Платинометалльная и сульфидно-никелевая металлогения палеопротерозойского рифтогенеза на Балтийском щите. *Геология рудных месторождений*. 2017;59(2):83–92. <https://doi.org/10.7868/S0016777017020058> (Перев. вер.: Turchenko S.I. Low-sulfide PGE and nickel sulfide metallogeny of paleoproterozoic riftogenesis of the fennoscandian shield. *Geology of Ore Deposits*. 2017;59(2):103–111. <https://doi.org/10.1134/S1075701517020040>)
Turchenko S.I. Low-sulfide PGE and nickel sulfide metallogeny of paleoproterozoic riftogenesis of the fennoscandian shield. *Geology of Ore Deposits*. 2017;59(2):103–111. <https://doi.org/10.1134/S1075701517020040> (Orig. ver.: Turchenko S.I. Low-sulfide PGE and nickel sulfide metallogeny of paleoproterozoic riftogenesis of the fennoscandian shield. *Geologiya Rudnyh Mestorozhdenij*. 2017;59(2):83–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0016777017020058>)
68. Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б., Вымазалова А. и др. Кольская платинометалльная провинция. Гл. ред. академик РАН В.В. Адушкин. Апатиты: Кольский научный центр РАН; 2023. 193 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.493.8>
Mitrofanov F.P., Bayanova T.B., Vymazalova A. et al. *Kola platinum-group metal province*. Chief editor academician RAS V.V. Adushkin. Apatity: Kola Science Centre of RAS; 2023. 193 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.493.8>
69. Золоев К.К., Рапопорт М.С., Попов Б.А. и др. Геологическое развитие и металлогения Урала. М.: Недра; 1981. 256 с.
Zoloev K.K., Rapoport M.S., Popov B.A. et al. *Geological evolution and metallogeny of the Urals*. Moscow: Nedra; 1981. 256 p. (In Russ.)



70. Михайлов Б.М. Гипергенная металлогения Урала. *Литология и полезные ископаемые*. 2004;(2):136–160.
Mikhailov B.M. Supergene metallogeny of the Urals. *Lithology and Mineral Resources*. 2004;(2):136–160. (In Russ.)
71. Ковалев С.Г., Салихов Д.Н., Пучков В.Н. *Полезные ископаемые Республики Башкортостан (металлы)*. Уфа: Альфа-реклама; 2016. 554 с.
Kovalev S. G., Salikhov D. N., Puchkov V. N. *Mineral resources of the Republic of Bashkortostan (metals)*. Ufa: Alfa-reklama; 2016. 554 p. (In Russ.)
72. Михайлов Б.М., Иванов Л.А. Проблемы Fe-Co-Ni месторождения Буруктал, Южный Урал. *Руды и металлы*. 2003;(1):5–12.
Mikhailov B.M., Ivanov L.A. Problems of the Buruktal Fe-Co-Ni deposit, Southern Urals. *Ore & Metals*. 2003;(1):5–12. (In Russ.)
73. 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. *Geological structure of the Gaysky ore district and conditions of copper-pyrite mineralization localization (Southern Urals)*. Moscow: Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals; 1968. 214 p. (In Russ.)
74. Нагаева С.П., Мезенцева О.П., Козорез М.В. Минералогические исследования медных кобальтсодержащих руд Дергамышского месторождения. *Горный журнал*. 2014;(11):31–34.
Nagaeva S.P., Mezentseva O.P., Kozorez M.V. Mineralogical researches of copper cobalt-containing ores of Dergamysh deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(11):31–34. (In Russ.)
75. Зайков В.В., Мелекестева И.Ю. Ишкининское кобальт-медноколчеданное месторождение в ультрамафитах главного уральского разлома (Южный Урал). *Геология рудных месторождений*. 2006;48(3):179–204. (Перев. вер.: Zaikov V.V., Melekestseva I. Yu. The Ishkinino Co-Cu massive sulfide deposit hosted in ultramafic rocks of the Main Ural fault zone, the Southern Urals. *Geology of Ore Deposits*. 2006;48(3):151–174. <https://doi.org/10.1134/S1075701506030019>)
Zaikov V.V., Melekestseva I. Yu. The Ishkinino Co-Cu massive sulfide deposit hosted in ultramafic rocks of the Main Ural fault zone, the Southern Urals. *Geology of Ore Deposits*. 2006;48(3):151–174. <https://doi.org/10.1134/S1075701506030019> (Orig. ver.: Zaikov V.V., Melekestseva I. Yu. The Ishkinino Co-Cu massive sulfide deposit hosted in ultramafic rocks of the Main Ural fault zone, the Southern Urals. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii*. 2006;48(3):179–204. (In Russ.))
76. Мурзин В.В., Варламов Д.А., Викентьев И.В. Пышминско-Ключевское месторождение (Ср. Урал): минералогия, стадийность и условия образования медно-кобальтовых руд. *Уральская минералогическая школа*. 2022;(28):118–120.
Murzin V.V., Varlamov D.A., Vikent'ev I.V. Pyshminsko-Klyuchevskoye deposit (Middle Urals): Mineralogy, stages, and formation conditions of copper-cobalt ores. *Ural'skaya Mineralogicheskaya Shkola*. 2022;(28):118–120. (In Russ.)
77. 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>
78. Елфимова Л.Г., Король Ю.А., Набойченко С.С. Возможности гидromеталлургической переработки окисленных кобальт-никелевых руд Белининского месторождения. *Цветные металлы*. 2016;(3):23–30. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.04>
Elfimova L.G., Korol Yu.A., Naboychenko S.S. Possibilities of hydrometallurgical processing of oxidized cobalt-nickel ores of Belininskoye deposit. *Tsvetnye Metally*. 2016;(3):23–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.04>
79. Светлицкая Т.В., Фоминых П.А. Кобальт-никелевая арсенидно-сульфоарсенидная минерализация интрузии Седова Займка (Колывань-Томская складчатая зона). *Разведка и охрана недр*. 2018;(8):9–18.
Svetlitskaya T.V., Fominykh P.A. Cobalt-nickel arsenide-sulfoarsenide mineralization of the Sedova Zaimka intrusion (Kolyvan-Tomsk folded zone). *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2018;(8):9–18. (In Russ.)
80. Алабин Л.В. Структурно-формационная и металлогеническая зональность Кузнецкого Алатау. *Труды института геологии и геофизики*. Отв. ред. д-р геол.-мин. наук В. В. Хоментовский. Новосибирск: Наука, СО АН СССР; 1983. Вып. 527. 111 с.
Alabin L. V. Structural-formational and metallogenic zonation of Kuznetsk Alatau. *Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics*. Responsible editor Dr. Sci. (Geol.-Min.) V.V. Khomentovsky. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch of USSR Academy of Sciences; 1983. Vol. 527. 111 p. (In Russ.)
81. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Едильбаев А.И., Едильбаев Б.А. Марганцевые руды Кемеровской области – Кузбасса и методы их обогащения. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020;63(5):344–350. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-344-350>
Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Edil'baev A.I., Edil'baev B.A. Manganese ores of the Kemerovo region – Kuzbass and methods of their enrichment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(5):344–350. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-344-350>
82. Лебедев В.И. *Минеральные ресурсы Тувы: обзор и анализ полезных ископаемых*. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН; 2012. 284 с.



- Lebedev V.I. *Mineral resources of Tuva: review and analysis of mineral deposits*. Kyzyl: Tuva Institute for Integrated Development of Natural Resources, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; 2012. 284 p. (In Russ.)
83. Borisenko A.S., Pavlova G.G., Borovikov A.A., Obolenskiy A.A. Ag-Sb deposits of the Yustid depression, Eastern Russia and Northwest Mongolia. *International Geology Review*. 1999;41(7):639–664. <https://doi.org/10.1080/00206819909465163>
84. Трофимов А.А. Структурная позиция и минералогия руд кобальтового месторождения «Загадка» (Карагемское). *Минеральное сырье*. 1962;(4):1–32.
- Trofimov A.A. Structural position and mineralogy of ores from the “Zagadka” cobalt deposit (Karagemское). *Mineral’noe Syr’e*. 1962;(4):1–32. (In Russ.)
85. Калинина А.М., Сейров Ф.Е. О геолого-промышленном типе рудопрооявлений меди Уландрык и Аксай (Горный Алтай). В: *Проблемы геологии и освоения недр. Труды XXVII Международного молодежного научного симпозиума*. Томск, 03–07 апреля 2023 г. Томск: Томский политехнический университет; 2023. С. 84–85.
- Kalinina A.M., Seirov F.E. On the geological-industrial type of Ulandryk and Aksai copper occurrences (Gorny Altai). In: *Problems of geology and mineral resources development. Proceedings of the XXVII International Youth Scientific Symposium*. Tomsk, April 03-07, 2023. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2023. Pp. 84–85. (In Russ.)
86. Лебедев В.И. Хову-Аксынское месторождение арсенидных кобальтовых руд (Республика Тыва, Россия): новые взгляды на проблему возобновления добычи и переработки. *Геология рудных месторождений*. 2021;63(3):236–264. <https://doi.org/10.31857/S0016777021030059> (Перев. вер.: Lebedev V.I. The Khovu-Aksy cobalt-arsenide deposit, republic of Tuva, Russia: new perspectives on the problems of production and renewal of processing. *Geology of Ore Deposits*. 2021;63(3):212–238. <https://doi.org/10.1134/S1075701521030053>)
- Lebedev V.I. The Khovu-Aksy cobalt-arsenide deposit, republic of Tuva, Russia: new perspectives on the problems of production and renewal of processing. *Geology of Ore Deposits*. 2021;63(3):212–238. <https://doi.org/10.1134/S1075701521030053> (Orig. ver.: Lebedev V.I. The Khovu-Aksy cobalt-arsenide deposit, republic of Tuva, Russia: new perspectives on the problems of production and renewal of processing. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii*. 2021;63(3):236–264. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0016777021030059>)
87. Гусев А.И. Геохимия руд Владимирского кобальтового месторождения Горного Алтая. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016;(4–2):404–408.
- Gusev A.I. Geochemistry of ores Vladimirovskoe cobalt deposit of Mountain Altai. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016;(4–2):404–408. (In Russ.)
88. Гусев А.И., Гусев Н.И. Полихронное комплексное Cu-Bi-Co-Ni-W месторождение Каракуль Горного Алтая. *Руды и металлы*. 2012;(1):33–41.
- Gusev A.I., Gusev N.I. Polychronic complex Cu-Bi-Co-Ni-W Deposit Karakul of the Mountain Altai. *Ore & Metals*. 2012;(1):33–41. (In Russ.)
89. Суге-Маадыр Н.В., Кадыр-оол Ч.О. Урановая минерализация Чергакского медно-кобальтового месторождения (Западная Тыва). *Природные ресурсы, среда и общество*. 2022;(3):14–19. <https://doi.org/10.24412/2658-4441-2022-3-14-19>
- Suge-Maadyr N.V., Kadyr-Ool Ch.O. Uranium mineralization of the Chergak copper-cobalt deposit (Western Tuva). *Natural Resources, Environment and Society*. 2022;(3):14–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2658-4441-2022-3-14-19>
90. Третьякова И.Г., Борисенко А.С., Лебедев В.И. и др. Возрастные рубежи формирования кобальтового оруденения Алтае-Саянской складчатой области и его корреляция с магматизмом. *Геология и геофизика*. 2010;51(9):1379–1395. (Перев. вер.: Tretiakova I.G., Borisenko A.S., Pavlova G.G. et al. Cobalt mineralization in the Altai-Sayan orogen: age and correlation with magmatism. *Russian Geology and Geophysics*. 2010;51(9):1078–1090. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.012>)
- Tretiakova I.G., Borisenko A.S., Pavlova G.G. et al. Cobalt mineralization in the Altai-Sayan orogen: age and correlation with magmatism. *Russian Geology and Geophysics*. 2010;51(9):1078–1090. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.012> (Orig. ver.: Tretiakova I.G., Borisenko A.S., Pavlova G.G. et al. Cobalt mineralization in the Altai-Sayan orogen: age and correlation with magmatism. *Geologiya i Geofizika*. 2010;51(9):1379–1395. (In Russ.))
91. Лебедев В.И. Абсолютный возраст кобальтовых месторождений Алтае-Саян. В: *Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура. Материалы III-й Международной научно-практической конференции*. Кызыл, 23–25 октября 2019 г. Кызыл: ФГБУН ТуВИКОПР СО РАН; 2019. С. 324–328.
- Lebedev V.I. The absolute age of cobalt deposits in Altai-Sayan. In: *Regional Economy: Technologies, Economy, Ecology, and Infrastructure. Proceedings of the 3rd international scientific and practical conference*. 23–25 October 2019, Kyzyl, Russia. Kyzyl: Tuva Institute for Complex Development of Natural Resources, Siberian Branch; 2019. Pp. 324–328. (In Russ.)
92. 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.)
93. Кравцова О.А., Моторин Ю.М., Козырев С.М. и др. Перспективное медно-никелевое сырье Кингашского рудного района на примере Верхнекингашского рудопрооявления. *Разведка и охрана недр*. 2006;(8):32–37.
- Kravtsova O.A., Motorin Yu.M., Kozyrev S.M. et al. Prospective copper-nickel raw materials of the Kingash ore district: Case study of the Verkhnekingash ore occurrence. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2006;(8):32–37. (In Russ.)



94. Шевелев А.И. К вопросу образования месторождения магнезита. *Геология и геофизика*. 1977;(8):67–75. Shevelev A.I. On the formation of magnesite deposits. *Geologiya i Geofizika*. 1977;(8):67–75. (In Russ.)
95. Аксенов В.Н. Генезис Шунгулежского месторождения марганцевых руд (Присяянский прогиб). Известия Сибирского отделения РАН. *Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2010;(1):41–46. Aksenov V.N. Genesis of Shungulezh deposit of manganese ores (Trans-Sayan deflection). *Izvestiya Sibirskogo Otdeleniya RAN. Geologiya, Poiski i Razvedka Rudnykh Mestorozhdeniy*. 2010;(1):41–46. (In Russ.)
96. Малич К.Н. Критерии прогноза сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Норильской провинции. *Литосфера*. 2021;21(5):660–682. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-660-682> 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>
97. Кислов Е.В. Северо-Байкальская платинометалло-медь-никеленосная провинция: геодинамика, петрология, рудообразование. *Металлогения древних и современных океанов*. 2023;29:40–44. Kislov E.V. The north Baikal PGE-Ni-Cu province: geodynamics, petrology, ore genesis. *Metallogeniya Drevnykh i Sovremennykh Okeanov*. 2023;29:40–44. (In Russ.)
98. Светлицкая Т.В. Минеральные парагенезисы сульфидных руд Чайского медно-никелевого месторождения (Северное Прибайкалье). *Металлогения древних и современных океанов*. 2009;(1):210–213. Svetlitskaya T.V. Mineral parageneses of sulfide ores from the Chaya copper-nickel deposit (Northern Baikal region). *Metallogeniya Drevnykh i Sovremennykh Okeanov*. 2009;(1):210–213. (In Russ.)
99. Приходько В.С., Пересторонин 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 o Zemle RAN*. 2010;(2):NZ10005. (In Russ.) <https://doi.org/10.2205/2010NZ000054>
100. 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/10.30911/0207-4028-2022-41-56-3-23> (Перев. вер.: Guryanov V.A., Petukhova L.L., Abrazhevich A.V. et al. The geological position and minerals of rare and noble metals in the ores of the Kun-Manie copper-nickel deposit (southeastern rim of the Siberian Craton). *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 and minerals of rare and noble metals in the ores of the Kun-Manie copper-nickel deposit (southeastern rim of the Siberian Craton). *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. The geological position and minerals of rare and noble metals in the ores of the Kun-Manie copper-nickel deposit (southeastern rim of the Siberian Craton). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2022;41(6):3–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-56-3-23>)
101. 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; 2009. С. 111–114. Prikhodko V.S., Gur'yanov V.A., Petukhova L.L., Perestoronin A.N. Sulfide Cu-Ni mineralization of paleoproterozoic mafite-ultramafites on the south-east of the Aldan-Stanovoi shield. In: *Mafic-ultramafic complexes of Folded Regions and Related Deposits. Proceedings of the 3rd International Scientific Conference*. Kachkanar, August 28–September 2, 2009. Yekaterinburg: A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences; 2009. Pp. 111–114. (In Russ.)
102. Аристов В.В., Рыжов О.Б., Вольфсон А.А. и др. Орогенная золотая минерализация Адычанского рудного района (Восточная Якутия, Россия). Геологические условия локализации и геохимические особенности золото-кварцевых руд. *Тихоокеанская геология*. 2019;38(5):56–75. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2019-38-5-56-75> Aristov V.V., Ryzhov O.B., Volfson A.A. et al. Orogenic gold mineralization of the Adychansky ore cluster (Eastern Yakutia, Russia). Geological settings and geochemical features of ores. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2019;38(5):56–75. (In Russ.)
103. Трушин С.И., Кириллов В.Е., Лапенко А.С. Благороднометалльные рудные формации зон активизации востока Яно-Колымской складчатой системы (Магаданская область, Россия). *Региональная геология и металлогения*. 2021;(85):67–78. https://doi.org/10.52349/08697892_2021_85_67_78 Trushin S.I., Kirillov V.E., Lapenko A.S. Noble metal ore formations in the activation zones in the eastern yanakolyma fold system (Magadan region, Russia). *Regional Geology and Metallogeny*. 2021;(85):67–78. (In Russ.) https://doi.org/10.52349/08697892_2021_85_67_78
104. Горячев Н.А., Гамянин Г.Н., Прокофьев В.Ю. и др. Серебро-кобальтовый тип минерализации верхне-сейсмического рудного узла (северо-восток России). *Геология рудных месторождений*. 2014;56(5):362–386.



- <https://doi.org/10.7868/S0016777014050050> (Перев. вер.: Goryachev N.A., Savva N.E., Gamyarin G.N. et al. Silver-cobalt mineralization in the upper Seymchan ore cluster, Northeastern Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2014;56(5):322–345. <https://doi.org/10.1134/S1075701514050055>)
Goryachev N.A., Savva N.E., Gamyarin G.N. et al. Silver-cobalt mineralization in the upper Seymchan ore cluster, Northeastern Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2014;56(5):322–345. <https://doi.org/10.1134/S1075701514050055>
(Orig. ver.: Goryachev N.A., Savva N.E., Gamyarin G.N. et al. Silver-cobalt mineralization in the upper Seymchan ore cluster, Northeastern Russia. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii*. 2014;56(5):362–386. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0016777014050050>)
105. Колова Е.Е., Малиновский М.А. Минералогия и условия формирования золотосодержащих кобальтовых руд месторождения Обход (Северо-Восток России). *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2015;(2):15–27.
Kolova E.E., Malinovskiy M.A. Mineralogy and conditions of gold-bearing cobalt ore formation at the Obkhod deposit (North-East of Russia). *The Bulletin of the North-East Scientific Center*. 2015;(2):15–27. (In Russ.)
106. Сухорукова В.А. Рудная минерализация Наталкинского золоторудного месторождения (Магаданская область). В: *Проблемы геологии и освоения недр. Труды XXVI Международного симпозиума*. Томск, 04–08 апреля 2022 г. Томск: Томский политехнический университет; 2022. С. 98–100.
Sukhorukova V.A. Ore mineralization of the Natalka gold deposit (Magadan region). In: *Problems of Geology and Subsurface Use. Proceedings of the XXVI International Symposium*. Tomsk, April 04–08, 2022. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2022. Pp. 98–100. (In Russ.)
107. 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.)
108. Оганесян В.В., Орлова Е.Ф. Оценки рисков нанесения ущерба экономике опасными метеорологическими явлениями погоды. *Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2016;(362):214–223.
Oganesyanyan V.V., Orlova E.A. Estimations of risks of drawing of damages to economy the dangerous meteorological phenomena of weather. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2016;(362):214–223. (In Russ.)
109. Соколов Ю.И. Риски экстремальных погодных явлений. *Проблемы анализа риска*. 2018;15(3):6–21. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-3-6-21>
Sokolov Yu.I. Risks of extreme weather events. *Issues of Risk Analysis*. 2018;15(3):6–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-3-6-21>
110. van den Brink S., Kleijn R., Sprecher B., Tukker A. Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020;(156):104743. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104743>
111. Самигуллин А.А., Савельев Д.Е., Васильев А.М., Никонов В.Н. Петрохимические и минералогические особенности габбро-долеритов Суранского флюоритового месторождения (Южный Урал). *Геологический вестник*. 2024;(1):76–90. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2024-1-6>
Samigullin A.A., Saveliev D.E., Vasiliev A.M., Nikonov V.N. Petrochemical and mineralogical features of gabbro-dolerites of Suran fluorite deposit (Southern Ural). *Geologicheskii Vestnik*. 2024;(1):76–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2024-1-6>
112. Митрофанов Ф.П. Поисковые индикаторы новых промышленных месторождений родий-платиново-палладиевых, кобальт-медно-никелевых и хромовых руд на Кольском полуострове. *Отечественная геология*. 2006;(4):3–9.
Mitrofanov F.P. Exploration indicators for new industrial deposits of rhodium-platinum-palladium, cobalt-copper-nickel, and chromium ores on the Kola Peninsula. *Otechestvennaya Geologiya*. 2006;(4):3–9. (In Russ.)
113. Лебедев В.И. Хову-Аксынское месторождение арсенидных кобальтовых руд (Республика Тыва, Россия): новые взгляды на проблему возобновления добычи и переработки. *Геология рудных месторождений*. 2021;63(3):236–264. <https://doi.org/10.31857/S0016777021030059> (Перев. вер.: Lebedev V.I. The Khovu-Aksy cobalt-arsenide deposit, Republic of Tuva, Russia: new perspectives on the problems of production and renewal of processing. *Geology of Ore Deposits*. 2021;63(3):212–238. <https://doi.org/10.1134/S1075701521030053>)
Lebedev V.I. The Khovu-Aksy cobalt-arsenide deposit, Republic of Tuva, Russia: new perspectives on the problems of production and renewal of processing. *Geology of Ore Deposits*. 2021;63(3):212–238. <https://doi.org/10.1134/S1075701521030053>
(Orig. ver.: Lebedev V.I. The Khovu-Aksy cobalt-arsenide deposit, Republic of Tuva, Russia: new perspectives on the problems of production and renewal of processing. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenij*. 2021;63(3):236–264. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0016777021030059>)
114. Машковцев Г.А. Минерально-сырьевая база твердых полезных ископаемых, пригодная для освоения методами физикохимической геотехнологии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(3–1):384–393.
Mashkovtsev G.A. Mineral resource base of solid minerals suitable for development by physicochemical geotechnology methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(3–1):384–393. (In Russ.)



115. Гаврилов А. С., Ординарцев Д. П., Крашенинин А. Г., Петрова С. А. Извлечение никеля и кобальта из продукционных растворов кучного выщелачивания окисленных никелевых руд. *Разведка и охрана недр*. 2022;(8):63–68. https://doi.org/10.53085/0034-026X_2022_08_63
Gavrilov A. S., Ordinartsev D. P., Krashenin A. G., Petrova S. A. Extraction of nickel and cobalt from production solutions of heap leaching of oxidated nickel ores. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2022;(8):63–68. https://doi.org/10.53085/0034-026X_2022_08_63
116. Елфимова Л. Г., Король Ю. А., Набойченко С. С. Возможности гидromеталлургической переработки окисленных кобальт-никелевых руд Белининского месторождения. *Цветные металлы*. 2016;(3):23–30. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.04>
Elfimova L. G., Korol Yu. A., Naboychenko S. S. Possibilities of hydrometallurgical processing of oxidized cobalt-nickel ores of Belininskoe deposit. *Tsvetnye Metally*. 2016;(3):23–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.04>
117. Заболоцкий А. И., Хамитов Р. И., Заболоцкий К. А. Подземное выщелачивание никеля из силикатных руд ниже дна карьера. Предварительные результаты геотехнологических исследований. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(2):65–69.
Zabolotskiy A. I., Khamitov R. I., Zabolotskiy K. A. Underground leaching of nickel from silicate ores below the open-pit bottom: Preliminary results of geotechnological studies. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(2):65–69. (In Russ.)
118. Левенец О. О., Балыков А. А., Яковишина О. А. Бактериальное выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч в мезофильных условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(10):89–93.
Levenets O. O., Balykov A. A., Yakovishina O. A. Bacterial leaching of sulphide cobalt-copper-nickel ore from ore deposit shanuch under mesophilic conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(10):89–93. (In Russ.)
119. Светлов А. В., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Возможности кучного биовыщелачивания некондиционных медно-никелевых руд и техногенного сырья. *Math Designer*. 2016;(1):40–45.
Svetlov A. V., Makarov D. V., Masloboev V. A. Possibilities of compact bioleaching of sub-standard copper-nickel ores and technogenic raw materials. *Math Designer*. 2016;(1):40–45. (In Russ.)

Информация об авторах

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

Людмила Михайловна Болсуновская – кандидат филологических наук, доцент отделения иностранных языков школы общественных наук, 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 of the Oil and Gas Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; ORCID 0000-0002-0715-7807, Scopus ID 56350674500; e-mail gub@tpu.ru

Liudmila M. Bolsunovskaya – Cand. Sci. (Philolog.), Associate Professor of the Foreign Languages Department, School of Social Sciences, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; ORCID 0000-0002-1499-8970, Scopus ID 56350747600; e-mail bolsunovskl@tpu.ru

Поступила в редакцию 22.02.2025
Поступила после рецензирования 27.04.2025
Принята к публикации 30.04.2025

Received 22.02.2025
Revised 27.04.2025
Accepted 30.04.2025



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-300>

УДК 622.276.1/.4:552.578 + 550.82 + 519.6:622.276

**Анализ механизма циклического геомеханического воздействия
для увеличения продуктивности скважин
в карбонатных коллекторах**И. М. Индрупский¹  , Е. А. Сухина² , Ю. В. Алексеева¹   ¹ Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Российская Федерация² Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,
г. Москва, Российская Федерация avajul@ipng.ru**Аннотация**

Методы создания околоскважинной области микротрещиноватости (разуплотнения породы коллектора) за счет глубокого снижения порового давления и основанные на них способы повышения продуктивности скважин активно развиваются в рамках научной деятельности институтов РАН в последние десятилетия. Обязательным условием применения таких методов является создание достаточной по величине и продолжительности депрессии на скважинах для формирования техногенной микротрещиноватости. В статье рассматривается циклическое геомеханическое воздействие (ЦГВ) – один из методов увеличения продуктивности нефтяных скважин в карбонатных коллекторах, основанных на создании глубокой депрессии на скважине. Эффективное планирование и применение таких методов связано с пониманием механизма возникновения микротрещиноватости в околоскважинной зоне при достижении критической величины снижения порового давления. Целью работы является обоснование геомеханического механизма формирования микротрещиноватости, согласующегося с результатами лабораторных исследований керны и применения ЦГВ и близких ему методов на скважинах. Задачи исследования включали анализ особенностей постановки лабораторных экспериментов и их результатов, определение возможных механизмов и критериев формирования микротрещиноватости, а также проведение сопряженного гидрогеомеханического моделирования с оценкой характерных размеров области воздействия. Показано, что результаты лабораторных экспериментов и опытного применения метода ЦГВ не согласуются с механизмом сдвигового разрушения, но могут быть объяснены механизмом разрушения сжатия. Выполнено сопряженное численное гидрогеомеханическое моделирование опытного применения ЦГВ на скважине с оценкой параметров критерия разрушения сжатия по керновым данным. Расчетный радиус зоны воздействия составил около 7 м, при этом оцененный прирост коэффициента продуктивности хорошо согласуется с фактическими данными.

Ключевые слова

скважина, продуктивность, проницаемость, коллектор, микротрещиноватость, циклическое геомеханическое воздействие, разрушение, геомеханический критерий, гистерезис, моделирование, эксперимент

Благодарности

Работа выполнена в рамках выполнения Государственного задания ИПНГ РАН по теме FMME-2025-0009 «Создание новых технологий эффективного экологически чистого извлечения углеводородов в сложных горно-геологических условиях на основе системного подхода к изучению и моделированию полного жизненного цикла нефтегазовых месторождений».

Для цитирования

Индрупский И. М., Сухина Е. А., Алексеева Ю. В. Analysis of the mechanism of cyclic geomechanical treatment to increase well productivity in carbonate reservoirs. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):148–160. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-300>



MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Analysis of the mechanism of cyclic geomechanical treatment to increase well productivity in carbonate reservoirsI. M. Indrupskiy¹  , E. A. Sukhinina² , Yu. V. Alekseeva¹   ¹ Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation² Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation avajul@ipng.ru**Abstract**

Methods for creating microfracture zones (loosening of reservoir rock) in well vicinity by significant reducing pore pressure and techniques for increasing well productivity based on these methods have been actively developed by Russian Academy of Sciences institutes over the past decades. A prerequisite for the application of such methods is the creation of a depression of sufficient magnitude and duration in wells to form man-made microfractures. The paper discusses cyclic geomechanical treatment (CGT), one of the methods for increasing the productivity of oil wells in carbonate reservoirs based on the creation of a deep depression in a well. Effective planning and application of such methods requires understanding the mechanism of microfracturing in the vicinity of a well when a critical pore pressure reduction value is reached. The aim of this study is to substantiate the geomechanical mechanism of microfracturing formation consistent with the results of laboratory studies of core samples and the application of CGT and related methods in wells. The objectives of the study included analyzing the characteristics of laboratory experiments and their results, identifying possible mechanisms and criteria for the formation of microfracturing, and conducting coupled hydrogeomechanical modeling with an assessment of the characteristic dimensions of the affected area. It has been shown that the results of the laboratory experiments and experimental application of the CGT method are inconsistent with the shear failure mechanism, but can be explained by the compaction failure mechanism. Coupled numerical hydrogeomechanical modeling of the pilot CGT application in a well was performed with an assessment of the compaction failure criteria parameters based on core data. The estimated radius of the stimulation zone was approximately 7 m, with the estimated increase in the productivity index to be consistent with actual data.

Keywords

well, productivity, permeability, reservoir, microfracturing, cyclic geomechanical treatment, fracturing (failure), geomechanical criterion, hysteresis, modeling, experiment

Acknowledgments

The study was carried out as part of the State Assignment of the OGRI RAS on the topic FMME-2025-0009 “Creation of new techniques for the efficient and environmentally friendly extraction of hydrocarbons under complex mining-and-geological conditions based on a systematic approach to the study and modeling of the complete life cycle of oil and gas fields”.

For citation

Indrupskiy I.M., Sukhinina E.A., Alekseeva Yu.V. Analysis of the mechanism of cyclic geomechanical treatment to increase well productivity in carbonate reservoirs. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):148–160. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-300>

Введение

Методы создания околоскважинной области микротрещиноватости (разуплотнения породы коллектора) за счет глубокого снижения порового давления и основанные на них способы повышения продуктивности скважин активно развиваются в рамках научной деятельности институтов РАН в последние десятилетия. Обязательным условием применения таких методов является создание достаточной по величине и продолжительности депрессии на скважинах для формирования техногенной микротрещиноватости. Образующаяся система микротрещин кратно повышает проницаемость породы-коллектора в околоскважинной зоне, что приводит к значительному повышению продуктивности скважин. Подобные

методы наиболее эффективны для глубокозалегающих пластов (более 3 км) в условиях уплотненных пород-коллекторов с достаточным запасом пластового давления. Дополнительным благоприятным фактором для их применения является аномально высокое пластовое давление.

Один из первых способов воздействия на призабойную зону скважин, основанный на методах рассматриваемого типа, описан в патенте¹. Он опирается на результаты лабораторных экспериментов с карбонатными коллекторами Тенгизского месторождения [1].

¹ SU 1609978. Бакиров Э.А., Закиров С.Н., Щербаков Г.А. и др. Способ обработки призабойной зоны пласта. Опубл. 30.11.1990. Бюл. № 44.



Наибольшую известность получили метод георыхления и его дальнейшая модификация – метод направленной разгрузки пласта (НРП), разработанные в Институте проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН² [2, 3]. При лабораторных исследованиях для обоснования применимости метода НРП на образце керна моделируют напряжения, формирующиеся на стенке скважины для конструкции необсаженного ствола и на конце перфорационного отверстия для конструкции обсаженного ствола скважины³ [4]. Особенностью метода НРП является необходимость создания в качестве концентраторов напряжений дополнительных перфорационных отверстий, в том числе и для конструкции необсаженного ствола. Продуктивность скважины в результате проведения работ увеличивается в 1,5–2 раза в случае обсаженной скважины и в 2–4 раза в случае необсаженной скважины⁴.

Альтернативным методом создания области микротрещиноватости за счет глубокого снижения порового давления является метод циклического геомеханического воздействия (ЦГВ), предложенный сотрудниками Института проблем нефти и газа РАН. На методе ЦГВ основан способ повышения продуктивности скважин⁵. Некоторые особенности практической реализации рассмотрены в работе [5]. Основной особенностью ЦГВ является полный цикл воздействия, включающий глубокое снижение порового давления и последующее повышение давления выше начального для раскрытия микротрещин. Прирост коэффициента продуктивности скважины в результате промышленной апробации метода в пласте с начальным пластовым давлением около 11 МПа оценивается в 44–49 %. Описание программ и результатов лабораторных экспериментов, численного моделирования и промысловых работ представлено в статье [6].

Традиционное теоретическое обоснование формирования зоны повышенной проницаемости (микротрещиноватости) при глубоком снижении порового давления строится на механизме сдвигового разрушения. Оно возникает под действием избыточного касательного напряжения, когда максимальное главное эффективное напряжение превышает минимальное главное эффективное напряжение на критическую величину⁶. В то же время использованная в работе [6] методика исследования ЦГВ на образцах керна включала изменение только порового давления

при постоянной псевдотрехосной внешней нагрузке, что соответствует неизменным касательным напряжениям. Тем не менее в этих экспериментах также был зафиксирован прирост проницаемости образцов в процессе снижения порового давления после достижения его критической величины.

Целью данной работы является обоснование геомеханического механизма разуплотнения коллектора, согласующегося с результатами лабораторных исследований керна и применения рассматриваемых методов на скважинах. Задачи исследования включали анализ особенностей постановки лабораторных экспериментов и их результатов и определение возможных механизмов формирования микротрещиноватости, а также обоснование геомеханического критерия с последующим составлением сопряженной гидрогеомеханической модели и расчетом радиуса формируемой околоскважинной зоны повышенной проницаемости.

Теория и методы

Для анализа возможных геомеханических механизмов формирования микротрещиноватости коллектора при воздействии методами НРП и ЦГВ рассмотрим особенности постановки и результатов лабораторных экспериментов для данных методов.

Метод направленной разгрузки пласта

Методика проведения эксперимента

Цель лабораторных исследований по методу НРП состоит в моделировании на образце керна напряжений, существующих на стенке скважины для конструкции необсаженного ствола или на кончике перфорационного отверстия для конструкции обсаженного ствола⁷ [4].

Исследования проводятся на испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН). Установка ИСТНН воссоздает эффективные напряжения, действуя на грани образца породы кубической формы (рис. 1, а). Схематично этапы нагружения показаны на рис. 1, б.

На каждом из трех этапов эффективные напряжения изменяются за счет внешних нагрузок на грани образца. Поровое давление поддерживается постоянным на уровне атмосферного (или первых единиц атмосфер).

Этап 1. Образец сжимается равномерно со всех сторон до достижения заданного эффективного напряжения (отрезок ОА на рис. 1, б). Точка А отвечает эффективным напряжениям S_p , действовавшим в скелете породы до бурения скважины, при упрощающем предположении равенства вертикального и бокового горного давления.

Этап 2. Среднее нормальное напряжение $S = (S_1 + S_2 + S_3)/3$ на всем протяжении этапа 2 сохраняется постоянным. Каждая точка на отрезке АВ соответствует давлению на забое скважины, большему, чем пластовое, т.е. определенной величине репрессии. Конечная точка этапа (точка В) отвечает состоя-

² RU 2645684 С1. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Титоров М.Ю. Способ направленной разгрузки пласта. Опубл. 27.02.2018. Бюл. № 6.

³ Коваленко Ю.Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин. [Дис. ... д-ра физ.-мат. наук]. М.; 2012. 314 с.

⁴ Там же.

⁵ RU 2620099 С1. Закиров С.Н., Дроздов А.Н., Закиров Э.С. и др. Способ повышения продуктивности добывающих и приемистости нагнетательных скважин. Опубл. 23.05.2017. Бюл. № 15.

⁶ Коваленко Ю.Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин. [Дис. ... д-ра физ.-мат. наук]. М., 2012. 314 с.; Химуля В.В. Реологические и фильтрационные свойства горных пород в условиях сложного трехосного нагружения. [Дис. ... канд. физ.-мат. наук]. 01.02.04. М.; 2021. 133 с.

⁷ Там же.

нию, когда скважина пробурена и давление на забое равно пластовому.

Этап 3. Моделируется процесс создания депрессии, т.е. понижения давления на забое скважины (отрезок ВС на рис. 1, б). Третий этап продолжался до достижения образцом состояния разрушения.

В течение всех этапов измеряется деформация образца в трех направлениях и регистрируется его проницаемость (при прокачке газа). Более подробно ход эксперимента описан в диссертации Ю.Ф. Коваленко⁸.

Суммарно три последовательных этапа нагружения соответствуют теоретическим представлениям об изменении эффективных напряжений на стенке скважины с открытым стволом в процессе разбуривания продуктивного пласта и последующего создания депрессии. Близкие закономерности соответствуют изменению эффективных напряжений на поверхности перфорационных каналов для обсаженной скважины. Отметим, что в этих и рассматриваемых далее исследованиях предполагается, что закон Био для эффективных напряжений применим в форме Терцаги (коэффициент Био равен 1).

Для вертикальной скважины с открытым стволом в отсутствие фильтрации флюида справедливо решение задачи Ламе [7]:

$$\begin{aligned} S_2 = S_r &= (\sigma_r - p_0)(1 - (r_w/r)^2), \\ S_3 = S_\theta &= (\sigma_r - p_0)(1 + (r_w/r)^2), \\ S_1 = S_z &= \sigma_r - p_0, \\ q|_{r=r_w} &= \sigma_r - p_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где S_1 – эффективное вертикальное напряжение; S_2 – эффективное радиальное напряжение; S_3 – эффективное тангенциальное напряжение в пласте на расстоянии r от оси скважины; r_w – радиус скважины; σ_r – начальное горное (полное) напряжение; p_0 – пла-

⁸ Коваленко Ю.Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин. [Дис. ... д-ра физ.-мат. наук]. М., 2012. 314 с.

стовое (поровое) давление; q – максимальное эффективное касательное напряжение. По мере снижения порового давления p_0 эффективные напряжения на стенке скважины $r = r_w$ будут меняться в соответствии с этапом 3 описанного эксперимента (см. рис. 1, б).

Результаты экспериментов и их интерпретация

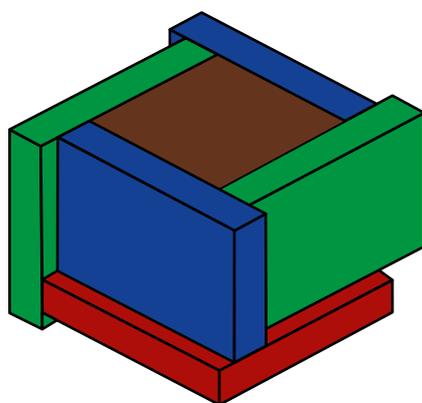
Результаты экспериментов по методу направленной разгрузки пласта различны для разных типов образцов керна⁹. В качестве характерных примеров в диссертации Ю.Ф. Коваленко¹⁰ описаны результаты для образцов песчаника с большим содержанием глины и образцов карбонатных пород.

В первом случае проницаемость образца керна монотонно снижалась и к концу эксперимента достигла нулевого значения. Во втором случае результат воздействия на образцы карбонатных пород состоял в приросте проницаемости. Этапы нагружения и кривая изменения проницаемости для одного из карбонатных образцов приведены на рис. 2.

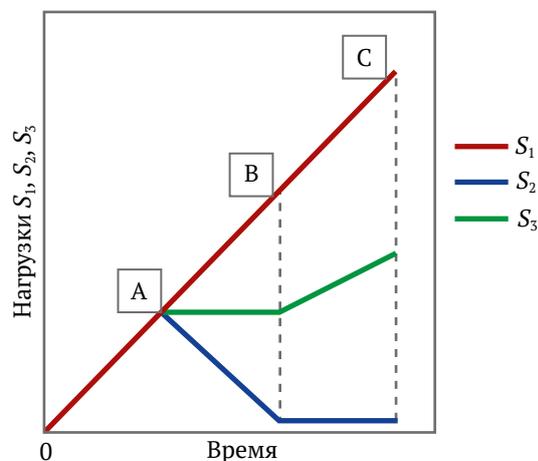
Первый этап, которому соответствует равномерный всесторонний обжим образца, продолжался до 800-й секунды. К концу этапа напряжение S_3 достигло значения 26 МПа. Его проницаемость к этому моменту составляет не более 10 % от начальной, что указывает на неупругую деформацию. При значении напряжения S_3 выше 10 МПа в образце развиваются значительные деформации, проницаемость при этом снижается и к 400-й секунде опускается почти до нуля (см. рис. 2, б). Это указывает на то, что на этапе всестороннего обжима в структуре образца происходят необратимые изменения, связанные с уплот-

⁹ Карев В.И. Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрационный процесс и дебит скважин. [Автореф. дис. ... д-ра техн. наук]. М.: ИПМех РАН, 2010. 33 с.

¹⁰ Коваленко Ю.Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин. [Дис. ... д-ра физ.-мат. наук]. М., 2012. 314 с.



а



б

Рис. 1. Схема воздействия на кубический образец (а) и этапы нагружения образца (б) при моделировании поля эффективных напряжений в окрестности вертикальной необсаженной скважины:

S_1, S_2, S_3 – эффективные нормальные напряжения на гранях куба

Источник: Коваленко Ю.Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин. [Дис. ... д-ра физ.-мат. наук]. М., 2012. 314 с.

нением. Следовательно, в образце превышен предел упругости, а возникшее уплотнение значительно. После 800-й секунды, когда на образец начинают воздействовать касательные напряжения, начинается интенсивный рост проницаемости.

Предполагается, что неупругое уплотнение и сопровождающее его изменение структуры образца на первом этапе эксперимента повлекли за собой разрушение сдвига с сильным ростом проницаемости образца на втором этапе. В противном случае разрушение внутренней структуры породы началось бы при более высоких касательных напряжениях и проницаемость не увеличилась бы настолько значительно.

Таким образом, причиной снижения проницаемости образца в экспериментах по методу НРП считают упругое и неупругое уплотнение при росте эффективных напряжений, а причиной последующего роста проницаемости – сдвиговое разрушение внутренней структуры образца с формированием микротрещи-

новатости при достижении критических касательных напряжений.

Для пористых материалов деформации при сжатии могут происходить как в отсутствие касательных напряжений, то есть при гидростатической нагрузке (уплотнение), так и при их наличии. Тогда их называют уплотнением, усиленным сдвигом. Линия разрушения сдвига для горных пород в пространстве «среднее нормальное напряжение – максимальное касательное напряжение» обычно может быть описана прямой линией согласно критерию Мора–Кулона (рис. 3, а) [7].

В работе [8] рассмотрены два варианта перехода от уплотнения, усиленного сдвигом, к неупругому увеличению объема материала, находящегося в напряженном состоянии, вследствие образования и раскрытия трещин. Первый заключается в действии на образец касательных напряжений с самого начала эксперимента. Другой вариант состоит в том, что

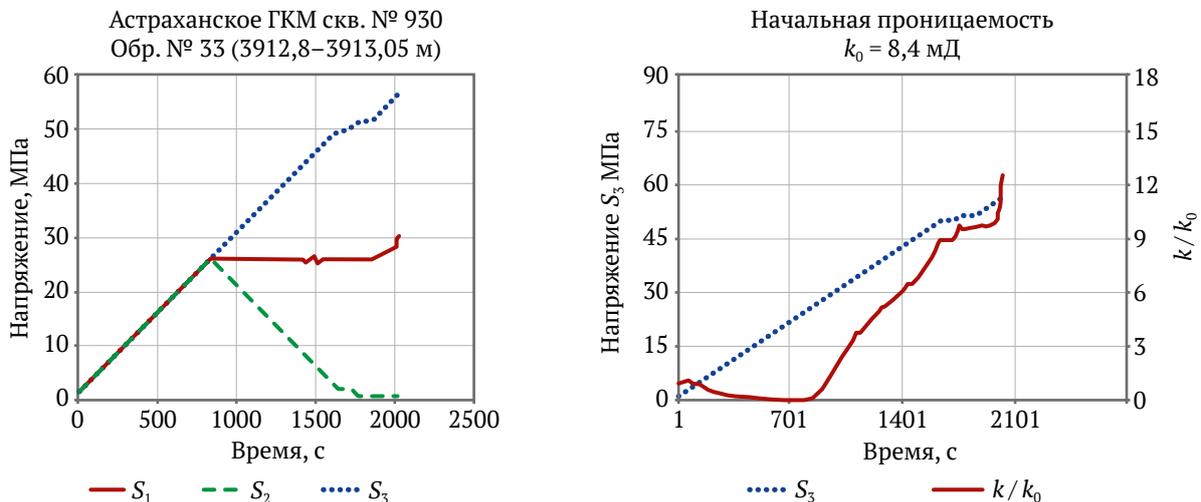


Рис. 2. Этапы нагружения и изменение проницаемости карбонатного образца (Астраханское месторождение)
Источник: Коваленко Ю. Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин. [Дис. ... д-ра физ.-мат. наук]. М., 2012. 314 с.

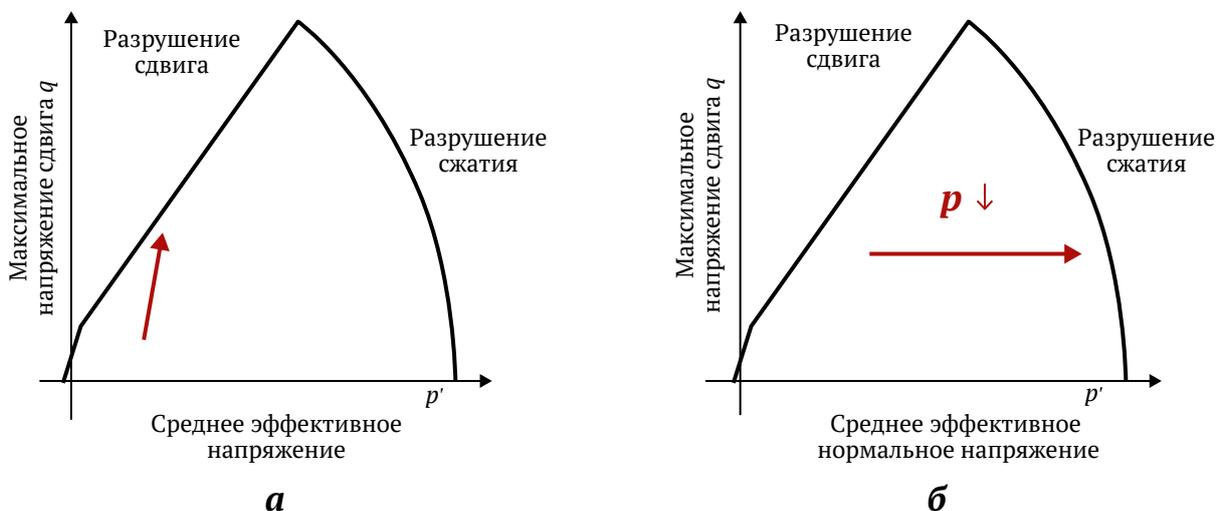


Рис. 3. Диаграммы разрушения и направление изменения эффективных напряжений в экспериментах при моделировании поля эффективных напряжений в окрестности вертикальной необсаженной скважины (а) и в экспериментах с изменением порового давления (б)

образец может быть гидростатически уплотнен до состояния неупругой деформации сжатия. Затем при создании критических касательных напряжений начинается разрушение. Именно такой случай подходит для описания приведенных выше результатов эксперимента по методу направленной разгрузки пласта. Красная стрелка на рис. 3, а схематично показывает направление изменения напряжений в эксперименте.

Метод циклического геомеханического воздействия

Методика проведения экспериментов

Суть метода ЦГВ состоит в комбинации полупериода глубокой депрессии для создания зоны разуплотнения коллектора с последующим полупериодом репрессии для раскрытия и дальнейшего роста созданных микротрещин.

Особенности лабораторных экспериментов рассмотрим на примере исследований, описанных в работе [6]. Для проведения экспериментов на керне по методу ЦГВ были отобраны карбонатные образцы породы турнейского яруса. Остановимся на трех образцах керна, после экстракции насыщенного керосином при наличии остаточной водонасыщенности. Для них по итогам эксперимента было отмечено кратное повышение проницаемости относительно начальной. Основные характеристики образцов керна приведены в табл. 1. Другие три образца керна в тех же исследованиях полностью насыщались моделью пластовой воды и не продемонстрировали прироста проницаемости. Влияние насыщения породы на характер изменения проницаемости при ЦГВ является положительным фактором для применения на нефтяных скважинах [6].

Исследования проводились в условиях псевдотрехосного сжатия с моделированием характерных для рассматриваемого объекта вертикального горного давления (осевая нагрузка на образец $P_{\text{верт}}$) и минимального бокового напряжения (давление обжима $P_{\text{обж}}$). Начальное поровое (пластовое) давление $P_{\text{пор}}$ соответствовало начальному пластовому давлению моделируемого объекта. Схематично условия эксперимента изображены на рис. 4, а. В процессе исследования осуществлялось циклическое изменение порового давления. Этапы эксперимента представлены на рис. 4, б.

На каждом этапе эксперимента поровое давление поддерживалось постоянным. Осуществлялась прокачка насыщающего флюида до стабилизации перепада давления и определялось текущее значение проницаемости. Также акустическим методом оценивались текущие значения динамических упругих модулей – модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Более подробно эксперимент описан в [6].

Результаты экспериментов и их интерпретация

Результаты экспериментов для всех образцов керна, насыщенного керосином с остаточной водой, согласуются на качественном уровне. На начальных этапах снижения порового давления наблюдалось уплотнение породы со снижением проницаемости и увеличением модуля Юнга. Но с дальнейшим ростом сжимающих напряжений при снижении порового давления ниже критического уровня отмечались признаки разуплотнения внутренней структуры коллектора. Далее следовал рост проницаемости при повышении давления за счет раскрытия образовавшихся микротрещин. Также по ряду образцов при превышении начального

Таблица 1

Параметры образцов керна турнейского яруса

№ образца	Глубина, м	Литология	Пористость, %	Проницаемость по газу, мД	Флюид	Остаточная водонасыщенность, %
2	1224,29	Известняк	14,24	484	Керосин	10,81
5к	1224,67	Известняк	12,88	270	Керосин	14,33
6	1224,71	Известняк	12,31	60	Керосин	19,04

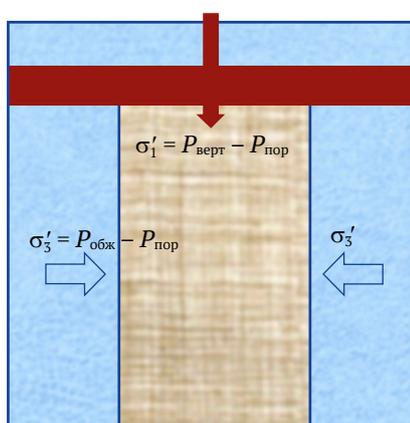
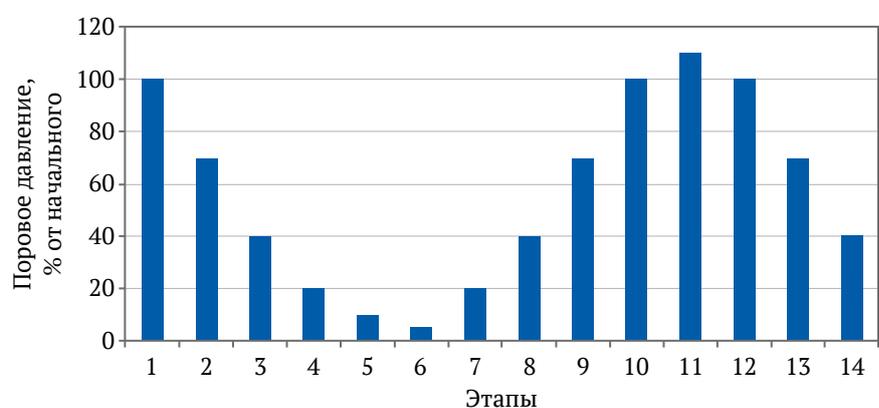

а

б

Рис. 4. Схемы псевдотрехосного нагружения в экспериментах (а) и этапов эксперимента (б): σ'_i – эффективные напряжения

давления отмечался характерный резкий рост проницаемости со снижением модуля Юнга, соответствующий образованию трещины разрыва на фоне предшествующего разуплотнения. Эффект прироста проницаемости сохранялся на стадии вторичного снижения давления до начального или меньших величин. Образцы керна с пониженными значениями модуля Юнга и повышенными величинами пористости (изначально более «рыхлые» с вероятным присутствием микротрещин) характеризуются более интенсивным уменьшением проницаемости в процессе первичного снижения давления. Для более плотных образцов керна, наоборот, отмечаются наибольшие приросты проницаемости в результате ЦГВ [6].

Характерный вид зависимостей изменения модуля Юнга и проницаемости приведен на рис. 5 для образца 6.

Рассмотрим первые шесть этапов эксперимента, соответствующих полциклу снижения порового давления. Увеличение проницаемости в этом случае свидетельствует о превышении предела прочности в образце и начале разрушения внутренней структуры.

Первые три этапа эксперимента рост модуля Юнга сопровождается снижением проницаемости – образец уплотняется. На 5-м этапе происходит совместное увеличение модуля Юнга и проницаемости, а на 6-м – снижение модуля Юнга, что может указывать на образование трещин в образце, при этом структура образца стала более плотной. Необходимо уточнить, что совместный рост модуля Юнга и проницаемости мог происходить уже в течение 4-го этапа, что не удалось зафиксировать в силу дискретности измерений. Значит, разрушение внутренней структуры начинается в ходе 4-го или 5-го этапа.

Особенностью рассматриваемых экспериментов является изменение только порового давления при постоянных боковом обжиге и осевой нагрузке. Следовательно, имеет место синхронный рост эффективных нормальных напряжений по всем главным направлениям. При этом эффективные касательные напряжения остаются постоянными, поэтому снижение порового давления не может вызвать разрушения сдвига. Под действием возрастающих эффективных нормальных напряжений возможно разрушение сжатия.

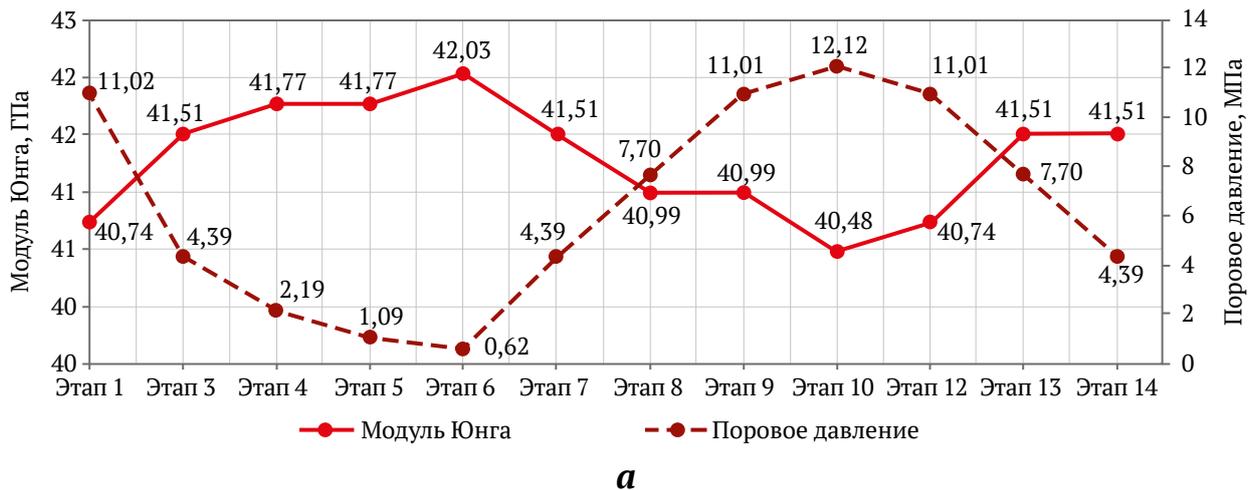


Рис. 5. Результаты лабораторных исследований для образца 6, насыщенного керосином с остаточной водой: а – изменение модуля Юнга, б – изменение проницаемости по этапам эксперимента. Красной штриховой линией показано изменение порового давления

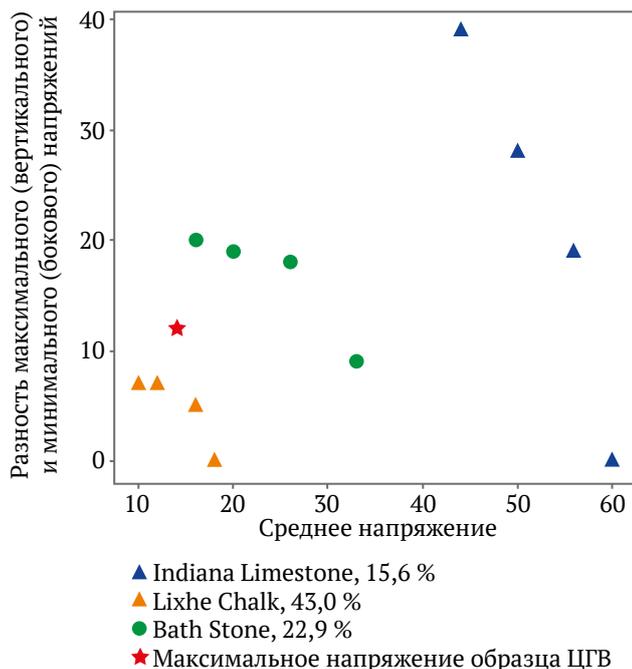


Рис. 6. Огибающие разрушения сжатия по данным работы [8] и предельное напряженное состояние для образца турнейского яруса

В пространстве «среднее нормальное напряжение – максимальное касательное напряжение» линия разрушения сжатия соответствует дуге окружности – см. рис. 3, б [7]. Красной стрелкой схематично обозначено направление изменения эффективных напряжений в рассматриваемых экспериментах.

На рис. 6 сопоставлены условия проявления внутреннего разрушения, полученные в описанном эксперименте на образце турнейского яруса, с огибающими линиями разрушения сжатия для различных карбонатных пород, исследованных в работе [8]. Подобная форма огибающих характерна для карбонатных коллекторов и подтверждается результатами лабораторных экспериментов [9–11] и геомеханического моделирования [12]. Отметим, что наблюдаемое на рис. 5 увеличение модуля Юнга при одновременном росте проницаемости образца яруса (начале формирования микротрещин) на соответствующем этапе эксперимента также соответствует характерным особенностям поведения горной породы при начале разрушения сжатия [13].

На рис. 6 треугольными и круглыми маркерами трех цветов отмечены результаты экспериментального определения напряженных состояний, соответствующих разрушению сжатия, для образцов трех различных карбонатных пород по данным [8]. Горизонтальная ось соответствует среднему эффективному нормальному напряжению, вертикальная – дифференциальному напряжению (разности максимального и минимального нормальных напряжений). Огибающие разрушения сжатия для каждой из трех пород имеют форму дуг окружностей, причем для оранжевых треугольников и зеленых кругов эти окружности подобны. Красной звездочкой отмечена

точка, соответствующая эффективным напряжениям на этапе начала роста проницаемости (разуплотнения) в описанном выше эксперименте на образце карбонатной породы турнейского яруса из работы [6].

Образование микротрещин возникает в первую очередь в тех участках породы, для которых характерно сильное уплотнение. Наиболее пористые участки более подвержены неупругому уплотнению. На прочность образцов, которые подвергались эксперименту по методу ЦГВ, могли действовать как химические эффекты, возникающие при взаимодействии породы и флюида (керосина и остаточной воды), так и особенности структуры породы коллектора. Наличие неоднородных включений, каверн и естественная трещиноватость также влияют на прочностные характеристики образцов. Все эти факторы влияют на положение точки для турнейского образца на рис. 6 в сравнении с сухими карбонатными образцами различной пористости из работы [8]. При этом можно ожидать, что форма огибающей разрушения сжатия сохраняется и должна проходить через красную точку на рис. 6 параллельно огибающим для оранжевых и зеленых точек.

Таким образом, в рассмотренных экспериментах по ЦГВ увеличение проницаемости образцов при снижении порового давления ниже критического уровня нельзя объяснить сдвиговым разрушением под действием касательных напряжений. Предположительно оно связано с разрушением сжатия. Огибающая для разрушения сжатия может быть приближенно получена путем совмещения полученной точки критических напряжений с формой огибающих, характерной для других карбонатных пород.

Результаты

Оценка радиуса зоны повышенной проницаемости при сдвиговом разрушении

Основной причиной трещинообразования в околоскважинной зоне при создании глубокой депрессии в методах НРП и ЦГВ является снижение локального пластового давления, которое приводит к увеличению эффективных напряжений. При применении метода направленной разгрузки пласта низкое давление на забое скважины необходимо поддерживать в течение достаточно длительного времени. Предполагается, что продолжительное создание депрессии способно вызвать понижение давления до уровня, необходимого для срабатывания критерия сдвигового разрушения, на достаточном расстоянии от скважины для достижения ощутимого эффекта повышения продуктивности¹¹. Таким образом, оценка радиуса зоны сдвигового разрушения важна для расчета увеличения продуктивности и, как следствие, возможного эффекта от воздействия.

Такая оценка выполнена Ю. Ф. Коваленко в диссертации¹² для условий скважины с открытым стволом. Постановка задачи близка к задаче Ламе, но поровое давление не постоянно, а возрастает от

¹¹ Коваленко Ю.Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин. [Дис. ... д-ра физ.-мат. наук]. М.; 2012. 314 с.

¹² Там же.

стенки скважины в направлении удаленной границы в соответствии со стационарным решением для осесимметричного притока с заданной депрессией Δp_w (решение Дюпюи). Таким образом, предполагается длительная работа скважины на заданном интенсивном режиме. Деформация породы считается упругой до достижения критерия сдвигового разрушения Мора–Кулона. По результатам расчета оценивается радиус разрушенной зоны R^* , где по критерию Мора–Кулона прогнозируется сдвиговое разрушение с формированием области трещиноватости.

В диссертации Ю.Ф. Коваленко представлены графики относительного радиуса разрушенной зоны R^*/R_w (R_w – радиус скважины) от угла внутреннего трения при трех величинах депрессии Δp_w для характерных условий Астраханского нефтегазоконденсатного месторождения: глубина залегания 3800–3900 м, начальное пластовое давление 60 МПа, вертикальное горное давление 90 МПа.

Результаты расчетов из диссертации Ю. Ф. Коваленко показывают, что при характерных для реальных горных пород значениях угла внутреннего трения от 15° и выше расчетный радиус разрушенной зоны не превышает 3–4 радиусов скважины (~30–40 см) даже при депрессии 60 МПа.

Используя модель диссертации Ю.Ф. Коваленко, авторы провели аналогичные расчеты для исходных данных, соответствующих характерным условиям карбонатных коллекторов турнейского яруса (глубина залегания 1200 м, начальное пластовое давление 11 МПа, вертикальное горное давление 26,06 МПа, депрессия 10 МПа). На рис. 7 представлены графики зависимости максимальных касательных напряжений от расстояния до стенки скважины. Точка максимума соответствует границе зоны разрушения.

Как видно из рис. 7, а, даже в случае заниженных значений коэффициента когезии и угла внутреннего трения радиус зоны разрушения составляет около 35 см от стенки скважины. Для более характерных значений параметров (рис. 7, б) он снижается до ~5 см.

Более сложные особенности формируемой зоны разрушения (трещиноватости) характерны для обсаженной скважины с перфорацией. В диссертации В.В. Химули¹⁵ оценка напряжений на кончике единичного перфорационного отверстия выполнена с использованием аналитического решения задачи для сферической полости, заполненной флюидом под давлением [14]. Распределение напряжений в околоскважинной зоне с учетом взаимовлияния перфорационных каналов можно оценить из опубликованных в литературе результатов численных расчетов. В работе [15] рассматривался вопрос устойчивости ствола скважины при разной плотности перфорации по толщине пласта. На рис. 8 показана область разрушения при плотности перфорации 8 перфорационных отверстий на 0,3 м. Синим цветом показана зона упругости, зеленым – зона разрушения. Как видно из рисунка, касательные напряжения достаточно высоки, чтобы вызвать разрушение вдоль перфорационного отверстия, однако в пласт вне зоны перфорации разрушение не распространяется. Формируемое поле напряжений создает высокие риски нарушения цементной оболочки ствола скважины, но не создает условий для формирования протяженной зоны трещиноватости, которая могла бы способствовать объяснению существенного прироста продуктивности при применении в подобных условиях метода НРП.

¹⁵ Химуля В.В. Реологические и фильтрационные свойства горных пород в условиях сложного трехосного нагружения. [Дис. ... канд. физ.-мат. наук]. 01.02.04. М.; 2021. 133 с.

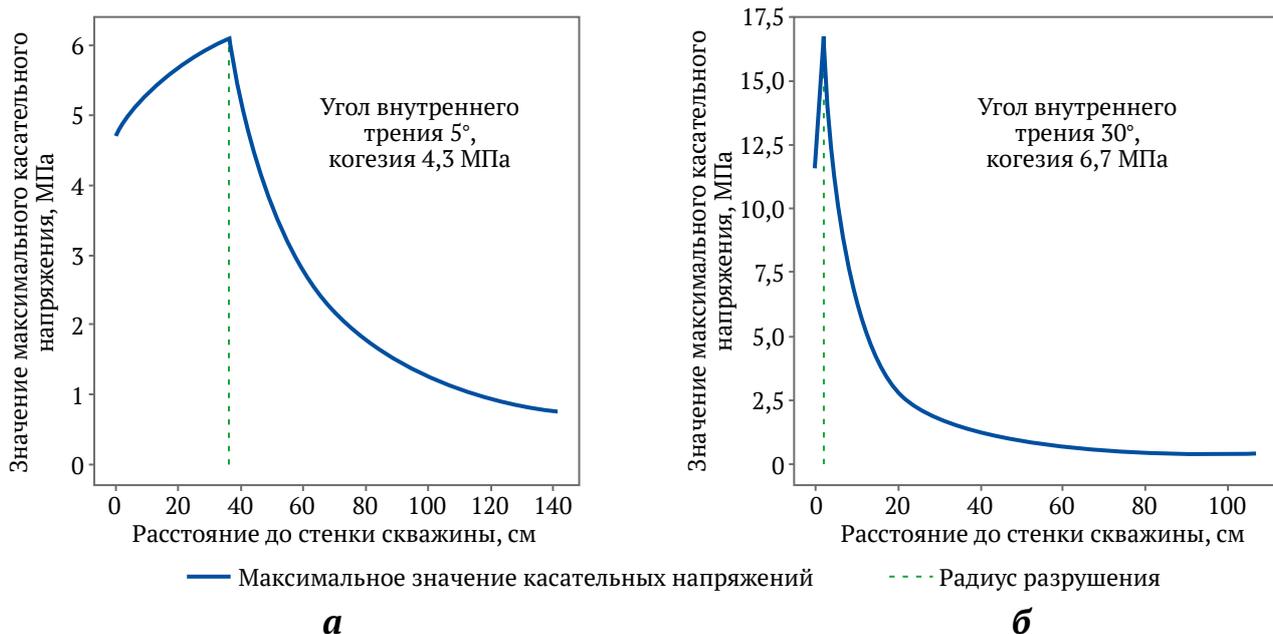


Рис. 7. Распределение максимальных касательных напряжений в окрестности необсаженного ствола скважины для значений параметров: коэффициент Пуассона – 0,25; горное давление – 26,06 МПа; начальное поровое давление – 11,0 МПа; депрессия – 10 МПа; радиус скважины – 0,1 м

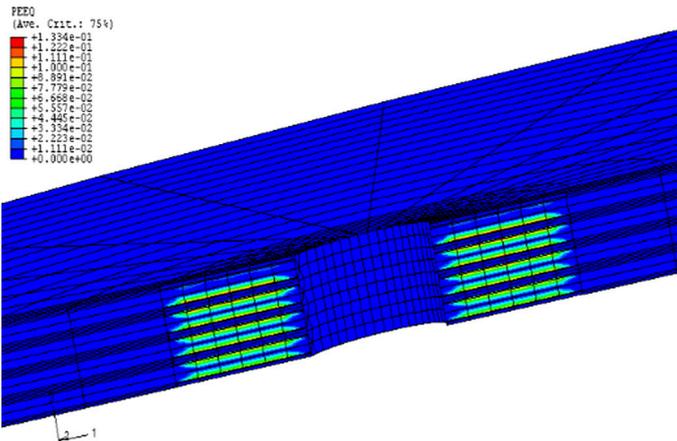


Рис. 8. Численное решение задачи о распределении напряжений в окрестности перфорационных каналов при плотности перфорации 8 перфорационных отверстий на 0,3 м для обсаженной скважины. Синим цветом показана зона упругости, другими цветами – зона срабатывания критерия сдвигового разрушения [15]

Представленные далее результаты моделирования подтверждают, что оценки размеров зоны трещиноватости при сдвиговом разрушении (рис. 7, 8) не могут объяснить достигаемых приростов коэффициента продуктивности: в 1,5 раза – при проведении опытной апробации метода ЦГВ (для обсаженного ствола скважины в условиях неглубоких турнейских отложений [6]), и до 3–4 раз – по методу НРП (для необсаженного ствола скважины, при проведении дополнительной перфорации и в условиях более глубоких отложений с большим запасом пластового давления¹⁴).

Сопряженное гидрогеомеханическое моделирование: оценка радиуса зоны повышенной проницаемости для ЦГВ при разрушении сжатия

Выше было показано, что результаты лабораторных экспериментов по ЦГВ в условиях постоянного псевдотрехосного нагружения с изменением порового давления можно объяснить действием механизмов неупругого уплотнения с последующим разрушением сжатия. Для моделирования соответствующих эффектов в околоскважинной зоне при создании депрессии на скважине использован программный пакет гидродинамического моделирования tNavigator компании Rock Flow Dynamics (RFD)¹⁵. Он позволяет осуществлять численное решение задач многофазной фильтрации флюидов в пласте при разработке месторождения совместно с решением упрощенной геомеханической задачи об изменении распределения напряжений и деформаций в породе пласта.

В RFD tNavigator существует два способа совместного решения задач фильтрации и упругости:

¹⁴ Коваленко Ю.Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин. [Дис. ... д-ра физ.-мат. наук]. М.; 2012. 314 с.

¹⁵ ТНавигатор 23.1. Техническое руководство по Симулятору. РФД; 2023.

сопряженный и модульный. Использован сопряженный подход, при котором решается единая система уравнений, описывающая фильтрационные процессы в пласте (уравнения неразрывности с учетом закона Дарси) и геомеханические эффекты (в данном случае – уравнения Ламе с учетом закона Гука), на единой вычислительной сетке¹⁶.

Для учета эффектов неупругого уплотнения и разрушения сжатия реализован скрипт на встроенной в tNavigator реализации языка Python, производящий обработку текущих полей эффективных напряжений на каждом расчетном шаге. Уплотнение задавалось через корректировку текущего множителя проницаемости в ячейке (относительно начального значения) в зависимости от среднего эффективного нормального напряжения. Соответствующая убывающая зависимость принималась по первым этапам лабораторного эксперимента (см. рис. 4, этапы 1–5).

Критерий разрушения сжатия при текущем изменении эффективных напряжений в ячейке модели проверялся через пересечение огибающей, проходящей через экспериментальную точку, соответствующую росту проницаемости в лабораторном эксперименте (красная точка на рис. 6). Форма огибающей принята по аналогии с экспериментальными данными работы [8] (см. рис. 6). На рис. 9 показан пример огибающей для одного из образцов, с достаточной точностью аппроксимированной дугой окружности с подобранными параметрами – в данном случае с радиусом в координатах напряжения 13,4 МПа и центром в точке (7 МПа; 0 МПа). Также на рис. 9 показана прямая Мора–Кулона для критерия сдвигового разрушения, которая не достигалась в расчетах. Бордовой горизонтальной стрелкой обозначено направление изменения эффективных напряжений при снижении порового давления.

При срабатывании критерия сжатия (пересечении огибающей) проницаемость ячейки увеличивалась в 4 раза, что соответствует итоговому приросту проницаемости после ЦГВ по результатам одного из экспериментов на образцах керна турнейского яруса.

В качестве исходных данных для моделирования были использованы характеристики пласта турнейского яруса одного из месторождений Республики Татарстан. Модель пласта имела горизонтальные размеры 2000×2000 м, условная толщина модели – 1 м, в центре размещена вертикальная скважина. По осям Ox и Oy задавалось сгущение сетки к скважине с постоянным коэффициентом 1,1. Минимальный размер ячейки (центральная ячейка со скважиной) – 0,5×0,5 м.

Параметры пласта и флюидов задавались в соответствии с характеристиками принятого турнейского объекта. Течение однофазное (нефть). Граничные условия на внешних гранях модели соответствовали условиям непротекания и постоянным вертикальному и боковому горным напряжениям. На скважине задавалась величина дебита нефти, соответствующая максимально возможной депрессии для данного объекта.

¹⁶ Там же.

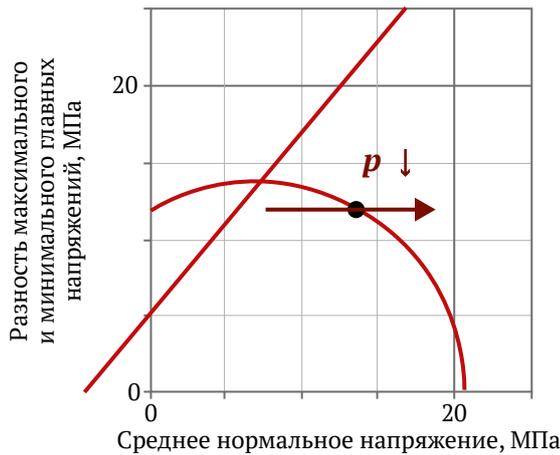


Рис. 9. Огибающая для критерия разрушения сжатия и точка срабатывания критерия, полученная экспериментально, а также прямая Мора–Кулона для разрушения сдвига

Центральный фрагмент полученного в результате моделирования поля коэффициента изменения проницаемости показан на рис. 10. Зеленым цветом отмечена зона с исходным значением проницаемости (множитель 1). Оттенками синего цвета – область уплотнения. Среднее снижение проницаемости в голубой зоне (радиусом около 70 м) – ~5 %, в темно-синей (радиус около 25 м) – ~8 %.

Красным цветом показана область разрушения (радиус около 7 м), где проницаемость возросла в 4 раза в результате срабатывания критерия сжатия.

Таким образом, для условий турнейского пласта через механизм разрушения сжатия, позволяющий объяснить результаты лабораторных экспериментов по ЦГВ, прогнозируется формирование околоскважинной зоны повышенной проницаемости радиусом около 7 м. Эта величина минимум в 20 раз превышает радиус аналогичной зоны, прогнозируемой на основе механизма сдвигового разрушения (см. рис. 7).

Обсуждение результатов и практическое применение

Сопоставим полученную оценку размера зоны разуплотнения ~7 м при реализации ЦГВ с фактическими результатами применения метода на скважине, эксплуатирующей турнейский ярус [6].

Определим расчетный прирост коэффициента продуктивности скважины. Величину скин-фактора, формируемого в результате ЦГВ, можно приближенно оценить по известной формуле для двухзонного осесимметричного пласта:

$$S = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w} \approx -3,19, \quad (2)$$

где r_s – радиус ближней зоны с проницаемостью k_s , $r_s = 7$ м; r_w – радиус скважины, $r_w = 0,1$ м; k/k_s – отношение проницаемости в удаленной зоне (неизменный пласт) к проницаемости в ближней зоне (зона трещиноватости), $k/k_s = 1/4$. Влиянием уплотнения за пре-

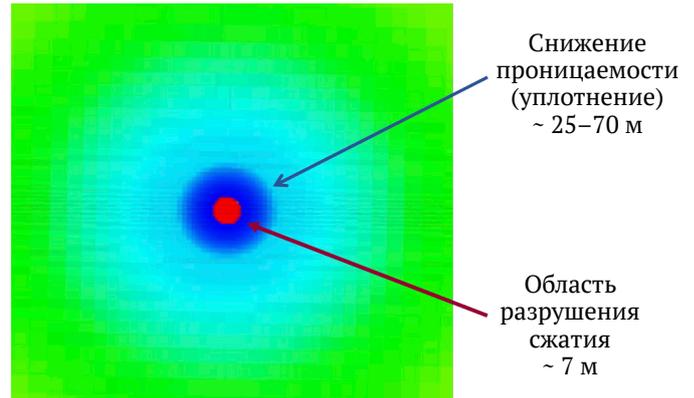


Рис. 10. Поле коэффициента изменения проницаемости по результатам расчетов сопряженной модели в tNavigator (гидродинамика + геомеханика) с использованием скрипта для учета уплотнения и разрушения сжатия через анализ эффективных напряжений. Цвета пояснены в тексте

делами зоны трещиноватости можно пренебречь из-за небольшого влияния на среднюю проницаемость удаленной зоны (первые единицы процентов).

Полученное значение скин-фактора позволяет оценить прирост коэффициента продуктивности PI по отношению к его исходному значению PI_0 . Для совершенной скважины и условного радиуса контура питания $r_e = 500$ м, используя формулу Дюпюи, получим:

$$\frac{PI}{PI_0} = \frac{\ln \frac{r_e}{r_w}}{\ln \frac{r_e}{r_w} + S} \approx 1,6. \quad (3)$$

Таким образом, моделирование эффекта от ЦГВ на основе механизма разрушения сжатия дает приближенную оценку прироста коэффициента продуктивности скважины в 1,6 раз. Данная оценка согласуется с фактическим приростом продуктивности в 1,45–1,5 раза, полученным при промысловых исследованиях на турнейском пласте [6]. Отметим, что, поскольку механизм разрушения сжатия определяется преимущественно ростом средних эффективных нормальных напряжений за счет снижения порового давления, иной тип заканчивания скважины (обсаженная скважина с перфорацией) существенно не влияет на оценку эффекта.

Полученная через критерий разрушения сжатия величина 1,6 также полностью соответствует результатам выполненных в работе [6] гидродинамических расчетов, где прирост проницаемости от ЦГВ задавался в зависимости от порового давления, без анализа геомеханических эффектов.

В то же время из формул (2), (3) очевидно, что размеры области разуплотнения, полученные по механизму сдвигового разрушения (см. рис. 7, 8), не позволяют объяснить фактический прирост коэффициента продуктивности при опытной реализации метода, описанной в работе [6].



Выводы

Представленный в данной статье анализ позволяет сделать ряд выводов в отношении вероятного геомеханического механизма формирования околоскважинной зоны повышенной проницаемости при создании глубокой депрессии в методе ЦГВ и схожем с ним методе НРП.

1. Лабораторные эксперименты на установке ИСТНН моделируют условия нагружения, соответствующие напряженному состоянию на стенке открытого ствола скважины или перфорационного канала. При этом предполагается, что околоскважинная зона повышенной проницаемости возникает за счет разрушения сдвига при росте касательных напряжений. Оценки размера области распространения данного эффекта не превышают 30–40 см от стенки скважины, по крайней мере, для характерных параметров и условий залегания карбонатных коллекторов Урало-Поволжья.

2. Эффект прироста проницаемости при создании критической депрессии в лабораторных экспериментах с постоянным псевдотрехосным нагружением и изменением порового давления может объясняться механизмом разрушения сжатия за счет роста эффективных нормальных напряжений.

3. По результатам сопряженного гидрогеомеханического моделирования для характерных условий турнейских пластов Республики Татарстан с учетом эффектов неупругого уплотнения и разрушения сжатия через анализ эффективных напряжений околоскважинная зона микротрещиноватости (увеличения проницаемости) достигает ~7 м. Это минимум в 20 раз превышает размер зоны, прогнозируемый через механизм сдвигового разрушения.

4. С учетом кратности прироста проницаемости по лабораторным данным оцененный размер зоны трещиноватости на основе механизма разрушения сжатия находится в соответствии с приростом продуктивности, наблюдавшимся в промышленном эксперименте на скважине.

Таким образом, результаты данной работы уточняют представления о геомеханическом механизме повышения проницаемости околоскважинной зоны в методе ЦГВ и других методах, основанных на создании глубокой депрессии. Это позволит более достоверно прогнозировать ожидаемый эффект на основе лабораторных исследований и моделирования, а также повысить результативность применения рассматриваемых методов для повышения продуктивности скважин и извлечения запасов нефти из карбонатных пластов.

Список литературы / References

1. Закиров С.Н. *Разработка газовых, газоконденсатных и нефте-газоконденсатных месторождений*. М.: Струна; 1998. 628 с.
Zakirov S.N. *Development of gas, gas-condensate, and oil-gas-condensate fields*. Moscow: Struna Publ. House; 1998. 628 p. (In Russ.)
2. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления. *Нефть и газ Евразия*. 2000;(2):90–94.
Khristianovich S.A., Kovalenko Yu.F., Kulinich Yu.V., Karev V.I. Oil well productivity enhancement using geoloosening. *Oil and Gas Eurasia*. 2000;(2):90–94. (In Russ.)
3. Климов Д.С., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Реализация метода георыхления для увеличения приемистости нагнетательной скважины. *Технологии топливно-энергетического комплекса*. 2003;(4):59–64.
Klimov D.S., Kovalenko Yu.F., Karev V.I. Implementation of the geoloosening method to increase the injectivity of an injection well. *Tekhnologii Toplivno-Energeticheskogo Kompleksa*. 2003;(4):59–64. (In Russ.)
4. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Химуля В.В., Шевцов Н.И. Определение параметров метода направленной разгрузки пласта на основе физического моделирования на установке истинно трехосного нагружения. *Записки Горного института*. 2022;258:906–914. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.95>
Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Khimulia V.V., Shevtsov N.I. Parameter determination of the method of directional unloading of the reservoir based on physical modelling on a true triaxial loading setup. *Journal of Mining Institute*. 2022;258:906–914. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.95>
5. Закиров С.Н., Дроздов А.Н., Закиров Э.С. и др. Технико-технологические аспекты геомеханического воздействия на пласт. *Neftegaz.RU*. 2018;(6):24–29.
Zakirov S.N., Drozdov A.N., Zakirov E.S. et al. Technical and technological aspects of geomechanical impact on a formation. *Neftegaz.RU*. 2018;(6):24–29. (In Russ.)
6. Индрупский И.М., Ибрагимов И.И., Цаган-Манджиев Т.Н. и др. Лабораторная, численная и промышленная оценка эффективности циклического геомеханического воздействия на карбонатном коллекторе турнейского яруса. *Записки Горного института*. 2023;262:581–593. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.5>
Indrupskiy I.M., Ibragimov I.I., Tsagan-Mandzhiev T.N. et al. Laboratory, numerical and field assessment of the effectiveness of cyclic geomechanical treatment on a tournaian carbonate reservoir. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:581–593. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.5>
7. Fjær E., Holt R.M., Horsrud P. et al. *Petroleum related rock mechanics*. 2nd edition. Elsevier; 2008. 492 p.
8. Vajdova V., Baud P., Wong T.-F. Compaction, dilatancy, and failure in porous carbonate rocks. *Journal of Geophysical Research*. 2004;109:B05204. <https://doi.org/10.1029/2003jb002508>



9. Sari M., Sarout J., Poulet T. et al. The brittle–ductile transition and the formation of compaction bands in the Savonnières limestone: impact of the stress and pore fluid. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022;55:6541–6553. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02963-z>
10. Ji Y., Stephen H. A., Baud P., Wong T.-F. Characterization of pore structure and strain localization in Majella limestone by X-ray computed tomography and digital image correlation. *Geophysical Journal International*. 2015;200:700–719. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu414>
11. Baud P., Vinciguerra S., David C. et al. Compaction and failure in high porosity carbonates: mechanical data and microstructural observations. *Pure and Applied Geophysics*. 2009;166:869–898. <https://doi.org/10.1007/s00024-009-0493-2>
12. Stefanov Yu.P., Chertov M.A., Aidagulov G.R., Myasnikov A.V. Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2011;59:2323–2340.
13. Chen X., Roshan H., Lv A. et al. The dynamic evolution of compaction bands in highly porous carbonates: the role of local heterogeneity for nucleation and propagation. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2020;7(28). <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00344-0>
14. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. *Теория упругости*. М.: Наука; 1979. 560 с. (Ориг. вер.: Timoshenko S.P., Goodier J. *Theory of elasticity*. 3rd ed. N.-Y.: McGraw-Hill; 1970.)
Timoshenko S.P., Goodier J. *Theory of elasticity*. 3rd ed. N.-Y.: McGraw-Hill; 1970. (Trans. ver.: Timoshenko S.P., Goodier J. *Theory of elasticity*. Moscow: Nauka Publ. House; 1979. 560 p. (In Russ.))
15. Zhang J., Standifird W.B., Shen X. Borehole stability in naturally deformable fractured reservoirs – a fully coupled approach. In: *SPE Annual Technical Conference Exhibition*. Scheveningen, The Netherlands, May 30, 2007. <https://doi.org/10.2118/107785-MS>

Информация об авторах

Илья Михайлович Индрупский – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по научной работе, Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-0038-6279](https://orcid.org/0000-0002-0038-6279), Scopus ID [14015783600](https://scopus.com/authorid/14015783600), ResearcherID [G-2176-2014](https://orcid.org/G-2176-2014); e-mail i-ind@ipng.ru

Екатерина Алексеевна Сухина – студентка, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-0483-8723](https://orcid.org/0009-0007-0483-8723); e-mail aesuhinina01@gmail.com

Юлия Владимировна Алексеева – младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5108-5874](https://orcid.org/0000-0001-5108-5874), ScopusID [57222130758](https://scopus.com/authorid/57222130758); e-mail avajul@ipng.ru

Information about the authors

Ilya M. Indrupskiy – Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Research, Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-0038-6279](https://orcid.org/0000-0002-0038-6279), Scopus ID [14015783600](https://scopus.com/authorid/14015783600), ResearcherID [G-2176-2014](https://orcid.org/G-2176-2014); e-mail i-ind@ipng.ru

Ekaterina A. Sukhinina – Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0007-0483-8723](https://orcid.org/0009-0007-0483-8723); e-mail aesuhinina01@gmail.com

Yulia V. Alekseeva – Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5108-5874](https://orcid.org/0000-0001-5108-5874), ScopusID [57222130758](https://scopus.com/authorid/57222130758); e-mail avajul@ipng.ru

Поступила в редакцию 28.08.2024

Поступила после рецензирования 07.11.2024

Принята к публикации 13.01.2025

Received 28.08.2024

Revised 07.11.2024

Accepted 13.01.2025



ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-11-338>

УДК 612:799.1–0.7(470.23–25)



Исследование элементного статуса молодого населения посёлка Солнечный Хабаровского края в рамках горно-экологического мониторинга

Н. К. Растанина¹ , Д. А. Голубев^{1,2} , А. В. Перфильев³ , П. Л. Растанин¹ , И. А. Попадъев¹ ¹ Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация² Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, г. Хабаровск, Российская Федерация³ Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Российская Федерация✉ n.rastanina@yandex.ru

Аннотация

В Солнечном районе Хабаровского края в результате длительной работы горно-обогательного комбината сформировалась горнопромышленная техногенная система. Здесь образовались биогеохимические зоны с высоким содержанием соединений химических элементов, в том числе тяжёлых металлов и мышьяка. Установлено, что в мониторинговых точках, расположенных на различном расстоянии от второго хвостохранилища Солнечного ГОКа, в том числе на территории посёлка Солнечный (Хабаровский край), концентрации определяемых тяжёлых металлов в почвах превышают нормативные значения по Cu, Zn, Pb и Hg от 1,4 до 12,36 ПДК, содержание As составило 571 ПДК. В водных объектах отмечается превышение по Cr, Cu, Fe и Zn от 2 до 110 ПДК. Превышение содержания As в исследуемых пробах воды не обнаружено. Элементный статус в растущем организме человека является индикаторным показателем состояния экосистем, в связи с чем была проведена оценка элементного состава волос жителей посёлка Солнечный в возрасте до 14 лет. Показано, что особенностью элементного статуса для девочек в исследуемой группе являются высокие показатели содержания тяжёлых металлов Hg, Cr, Pb, Cu, а также пониженное содержание важного эссенциального элемента Zn. Для мальчиков отмечаются превышения по концентрациям Hg, Fe, Cr, Zn и Cu. В связи с этим предложены технические решения с целью снижения распространения загрязняющих веществ от хвостохранилищ, в том числе Солнечного ГОКа.

Ключевые слова

горное дело, обогащение, оловорудное сырьё, отходы, хвостохранилище, окружающая среда, техногенное загрязнение, почва, грунт, вода, проба, тяжелые металлы, хром (Cr), железо (Fe), медь (Cu), цинк (Zn), мышьяк (As), кадмий (Cd), олово (Sn), ртуть (Hg), свинец (Pb), спектрометрия, спектрофотометр, детское население, элементный статус, рекультивация, консервация, Хабаровский край, посёлок Солнечный

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 24-27-20085 <https://rscf.ru/project/24-27-20085/> и Министерства образования и науки Хабаровского края (Соглашение № 121С/2024).

Для цитирования

Rastanina N.K., Golubev D.A., Perfiliev A.V., Rastanin P.L., Popadyev I.A. Assessment of the elemental status of the young population in Solnechny, Khabarovsk krai, as part of mining environmental monitoring. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):161–168. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-11-338>

ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Assessment of the elemental status of the young population in Solnechny, Khabarovsk krai, as part of mining environmental monitoring

N. K. Rastanina¹ , D. A. Golubev^{1,2} , A. V. Perfiliev³ , P. L. Rastanin¹ , I. A. Popadyev¹ ¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation² Far East Forestry Research Institute, Khabarovsk, Russian Federation³ Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation✉ n.rastanina@yandex.ru

Abstract

Prolonged operation of the mining and processing plant in Solnechny District, Khabarovsk Krai, led to the formation of a technogenic mining system. Biogeochemical zones with elevated concentrations of chemical compounds, including heavy metals and arsenic, developed in the area. Monitoring revealed that soil samples taken



at varying distances from the second tailings dump of the Solnechny Mining and Processing Plant (MPP), including within the settlement of Solnechny, contained heavy metals – Cu, Zn, Pb, and Hg – at levels exceeding the maximum permissible concentrations (MPCs) by factors of 1.4 to 12.36. Arsenic levels reached 571 times the MPC. Surface water bodies showed excess concentrations of Cr, Cu, Fe, and Zn, ranging from 2 to 110 times the MPC. No arsenic excess was found in water samples. The elemental status of a developing child reflects the health of the surrounding ecosystem. Hair samples from children under 14 years of age residing in the settlement of Solnechny were analyzed. Girls showed elevated levels of Hg, Cr, Pb, and Cu, along with reduced concentrations of the essential element Zn. Boys showed increased levels of Hg, Fe, Cr, Zn, and Cu. To reduce the spread of pollutants from tailings dumps, including those of the Solnechny plant, technical solutions have been proposed.

Keywords

mining, beneficiation, tin ore, waste, tailings dump, environment, technogenic pollution, soil and subsoil, water, sample, heavy metals, chromium (Cr), iron (Fe), copper (Cu), zinc (Zn), arsenic (As), cadmium (Cd), tin (Sn), mercury (Hg), lead (Pb), spectrometry, spectrophotometer, child population, elemental status, land reclamation, waste containment, Khabarovsk Krai, settlement of Solnechny

Funding

This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project No. 24-27-20085 (<https://rscf.ru/project/24-27-20085/>), and by the Ministry of Education and Science of Khabarovsk Krai (Agreement No. 121C/2024).

For citation

Rastanina N.K., Golubev D.A., Perfiliev A.V., Rastanin P.L., Popadyev I.A. Assessment of the elemental status of the young population in Solnechny, Khabarovsk krai, as part of mining environmental monitoring. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):161–168. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-11-338>

Введение

Интенсивное освоение минеральных ресурсов с начала 70-х годов XX в. горными предприятиями Дальневосточного федерального округа привело к значительному техногенному загрязнению всех компонентов окружающей среды [1, 2]. В окрестностях горнопромышленных предприятий, подверженных в той или иной степени воздействию техногенной системы, сформировались биогеохимические зоны с высоким содержанием соединений химических элементов, в том числе тяжёлых металлов и мышьяка. К таким градообразующим горным предприятиям в прошлом столетии относился и Солнечный горно-обогатительный комбинат (ГОК) в Хабаровском крае. В годы перестройки он не справился с трудностями переходного периода и был обанкрочен [3, 4]. Первое хвостохранилище Солнечной обогатительной фабрики (СОФ) находится в непосредственной близости от посёлка Горный (около 100 м) в долине р. Силинка (в районе слияния р. Силинка и р. Амур). Отходы накапливались с 1963 по 1997 г. Мощность отвальных хвостов составляет около 20–25 м. Площадь его составляет 20 га и объём – 10,6 млн т. Это хвостохранилище используется для повторной переработки сырья обогатительной фабрикой. Второе хвостохранилище СОФ располагается напротив горняцкого посёлка Солнечный. Данное хвостохранилище занимает 40,3 га, объём накопленных отходов составляет 24,09 млн т. В настоящее время активы бывшего Солнечного ГОКа, месторождения «Фестивальное» и «Перевальное», находятся под управлением «Оловянной рудной компании», которая перезапустила добычу олова и вольфрама и продолжила наполнять третье хвостохранилище, а компания ООО «Геопроминвест» активно перерабатывает отходы второго, построив за ним новое хвостохранилище. Согласно ранее проведённым исследованиям хвостохранилища, содержащие огромное количество отходов, оказывающих негативное

воздействие на окружающую среду, представляют реальную угрозу для здоровья человека, флоры и фауны, а также водных объектов [5–7] вследствие накопления токсичных тяжёлых металлов в живых организмах.

Известно, что волосы являются информативным и качественным биологическим материалом, несущим информацию об экологической обстановке, наличии заболеваний и отклонений в здоровье человека [8]. Химический состав волос отражает как внутреннее состояние организма, так и следствия воздействия различных экзогенных факторов [9]. В связи с малой скоростью роста волос их анализ показывает усреднённое содержание макро- и микроэлементов за несколько месяцев. По мнению А.Е. Побилат и др. [10, 11], мониторинг содержания микроэлементов в волосах позволяет решать целый спектр задач, стоящих перед наукой, таких как индикация загрязнения окружающей среды и оценка вредных факторов, влияющих на человека.

Целью исследования является оценка распространения соединений Pb, Hg, Cu, Cr, Fe, Zn, Cd, Sn и As с использованием элементного статуса молодого населения горняцкого посёлка. Исходя из цели сформулированы следующие задачи: 1. Анализ и систематизация литературных данных по проблеме техногенного загрязнения экосферы отходами переработки оловянного сырья. 2. Оценка распространения химических элементов в компонентах окружающей среды от хвостохранилища Солнечного ГОКа. 3. Исследование элементного статуса населения в возрасте до 14 лет пос. Солнечный Хабаровского края в рамках горно-экологического мониторинга. 4. Разработка предложений по снижению уровня распространения техногенного загрязнения в экосистеме.

Объектами исследования являются горнопромышленные техногенные территории, сформировавшиеся в результате деятельности Солнечного ГОКа, а также элементный статус волос детей и подростков горняцкого посёлка.



Рис. 1. Поверхность второго хвостохранилища Солнечной обогатительной фабрики

Второе хвостохранилище Солнечного ГОКа расположено на отметках 286–303 м, в 6,5 км к юго-западу от места слияния р. Холдоми и р. Силенка, напротив второй перерабатывающей фабрики. На противоположном борту долины, на более высоких отметках, находится горняцкий посёлок Солнечный (рис. 1).

Методы исследования

Для характеристики техногенной обстановки в границах влияния хвостохранилища проводился отбор проб почвогрунтов на валовое содержание тяжёлых металлов и мышьяка в почве вблизи второго хвостохранилища Солнечного ГОКа. Отбор проб проводился согласно ГОСТ 17.4.3.01–2017¹.

Также были отобраны пробы воды в границах влияния второго хвостохранилища в различных точках бассейна р. Силенка². Определение концентраций элементов осуществлялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрофотометра Thermo Solaar M. Series и спектрометра Agilent 720 ICP-OES.

Карта-схема отбора проб почв и воды приведена на рис. 2.

Были изучены образцы волос детей и подростков в возрасте от 3 до 14 лет (мальчики и девочки), проживающих в посёлке Солнечном. Проведено определение элементного статуса у 45 детей, из них 20 мальчиков и 25 девочек в возрасте до 14 лет. Средний возраст составил при этом 6,68 лет ± 2 года. Мальчики до 7 лет включительно составляли 26,7 %, девочки – 33,3 %, мальчики 8–14 лет – 22,1 %; девочки 8–14 лет – 17,9 %. В выборку включены дети и подростки, постоянно проживающие в данном населённом пункте. Все про-

¹ ГОСТ 17.4.3.01–2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.

² Р 52.24.353–2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод.

бы волос подвергались отбору, подготовке по методике определения микроэлементов в биосубстратах³, проанализированы в аккредитованном Информационно-аналитическом центре при Институте тектоники и геофизики ДВО РАН (г. Хабаровск). Определено содержание следующих элементов: Cr, Fe, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Hg, Pb. Полученные данные обработаны в наборе офисных приложений Microsoft Office.

Результаты и обсуждение

За период с 1969 по 2001 г. во втором хвостохранилище Солнечного ГОКа накопилось около 24,1 млн т отходов. Отмечается, что на территории хвостохранилища на 1990 год было накоплено: 46 392 т олова (при среднем содержании 0,183 %), 707 000 т меди (0,28 %), 39 356 т цинка (0,156 %), 47 853 т свинца (0,188 %), 6742 т вольфрама (0,015 %), 5874 т висмута (0,013 %) и 339 т серебра (116 г/т), а также редких элементов и золота. Согласно ранее проведённым исследованиям по определению класса опасности отходов освоенные хвосты относятся к высоко опасному классу токсичности⁴ [2]. На территории нарушенных земель рекультивация в соответствии с Законом РФ «О недрах» не проводилась⁵. По нашим расчётам, учитывая

³ Методика определения микроэлементов в диагностируемых биосубстратах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Методические рекомендации. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России; 2003. С. 22.

⁴ Приказ Минприроды России от 08.07.2010 № 238 (ред. от 18.11.2021) «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды: зарегистрировано в Минюсте России 07.09.2010 № 18364. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902227668>

⁵ О недрах. Закон РФ от 21.02.1992 № 2395-1 2024. Последняя редакция. М.: ЦЕНТРМАГ; 2024. 136 с.

глубину отбора проб (до 20 см), степень загрязнения, площадь загрязнённого участка, соответствующие коэффициенты и показатели, общий размер вреда, причинённого почвам, составляет 19 306 руб/м² [13].

В мониторинговых точках, расположенных на различном расстоянии от второго хвостохранилища Солнечного ГОКа, концентрации определяемых тяжёлых металлов и мышьяка в почвенных горизонтах 10–20 см значительно превышают нормативные значения (табл. 1).

Отмечается неблагоприятная ситуация на территории жилой застройки, находящейся в непосредственной близости от объекта (1,5–3,0 км), где превышение нормативных значений на уровне средних концентраций составило для Cu – 12,36, Zn – 2,73, Pb – 9,71, Hg – 1,40, As – 569,09 ПДК.

Отобранные образцы техногенных (Т. 1) и природных (Т. 2–5) вод (см. рис. 2) изучены на содержание следующих элементов: As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Sn, Zn. Результаты представлены в табл. 2.

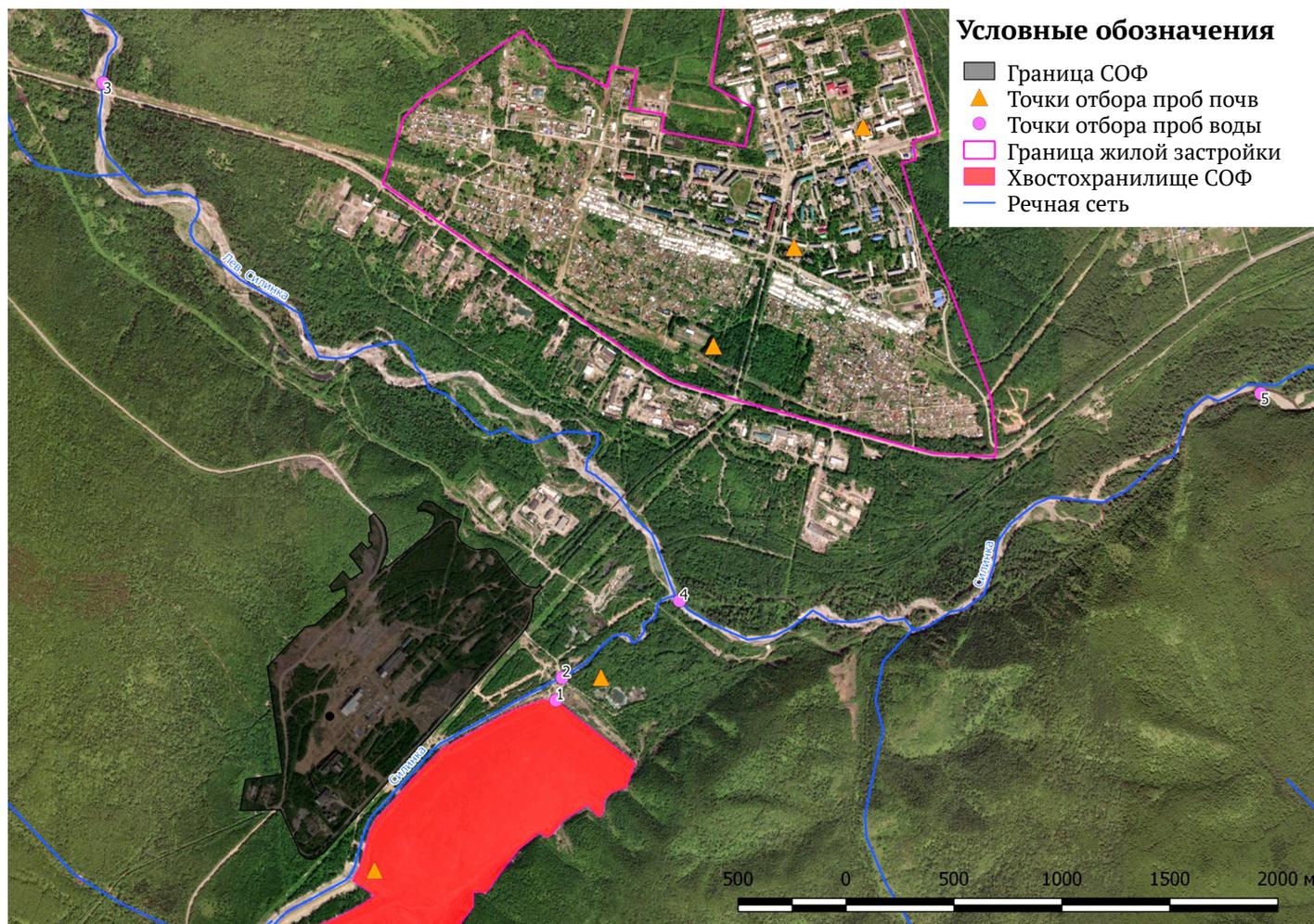


Рис. 2. Карта-схема отбора проб почв и воды вблизи второго хвостохранилища Солнечного ГОКа

Таблица 1

Содержание отдельных тяжёлых металлов и мышьяка в почвах на глубине 10–20 см на различном расстоянии от второго хвостохранилища Солнечного ГОКа, мг/кг

Элементы	Zn	Cu	Pb	Hg	As
Хвостохранилище	140,00	620,18	713,22	5,78	7792,60
0,3 км от хвостохранилища	168,30	749,79	282,74	2,29	2306,47
1,5 км от хвостохранилища	71,68	319,76	642,22	8,3	3254,48
2,5 км от хвостохранилища	264,16	643,56	195,37	0,3	105,12
3 км хвостохранилища	119,62	260,91	36,31	0,22	54,95
ПДК	55,5	33,0	30,0	2,1	2,0
Фон	60,46	38,78	81,5	0,58	42,49

В природных водах по течению р. Силенка после второго хвостохранилища отмечается превышение химических веществ в воде поверхностных водных объектов рыбохозяйственного назначения по Cr от 4 до 11,5, Cu – 110, Fe – от 2 до 24,2, Zn – от 31 до 46 ПДК. Превышение содержания As в исследуемых пробах воды не обнаружено.

Таким образом, население горняцкого посёлка Солнечный проживает в условиях превышения нормативных показателей загрязняющих веществ в почвогрунтах и водных объектах.

Для выявления региональной геохимической специфики природной среды были использованы коэффициенты, рассчитанные как отношение содержания химических элементов в волосах молодого населения посёлка к их среднему содержанию в волосах молодого населения (с учётом пола) (рис. 3).

Полученные данные позволили установить специфику геохимической составляющей волос детей и подростков горняцкого посёлка Солнечный:

для девочек: $Hg_{3,66} > Cr_{3,52} > Pb_{2,61} > Cu_{1,43} > Cd_{0,95} = Fe_{0,95} > Zn_{0,94} > Sn_{0,32} > As_{0,13}$;

для мальчиков: $Hg_{9,81} > Fe_{8,75} > Cr_{2,95} > Zn_{1,54} > Cu_{1,45} > Pb_{1,06} > Sn_{0,87} > Cd_{0,57} > As_{0,33}$.

Особенностью элементного статуса детей в исследуемой группе посёлка Солнечный являются повышенные показатели содержания токсичных металлов Pb, Hg, Cr. Отмечается, что у девочек содержание эссенциального элемента Zn приближено к минимальному нормативному значению (124–320 мкг/г).

Для снижения распространения загрязняющих веществ в компонентах природной среды требуется

Таблица 2

Содержание отдельных тяжёлых металлов и мышьяка в воде бассейна р. Силенка на различном расстоянии от второго хвостохранилища Солнечного ГОКа, мг/л

Пробные точки	Т. 1	Т. 2	Т. 3	Т. 4	Т. 5	ПДК*, мг/л
As (общ.)	0,0180±0,0076	0,0240±0,0101	0,0090±0,0038	0,0050±0,0021	0,0050±0,0021	0,05
Cd	0,20	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,005
Co	3,78	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,01
Cr (VI)	0,18	0,09	0,19	0,23	0,20	0,02
Cu	166,30	0,11	<0,03	<0,03	<0,03	0,001
Fe (III)	292,90	2,42	0,38	0,20	0,20	0,1 (общее)
Mn	104,79	2,22	0,42	0,28	0,37	0,01
Pb	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,006
Sn	0,0390±0,0133	<0,005	0,0090±0,0031	0,0060±0,0020	0,0110±0,0037	0,112
Zn	51,09	0,46	0,37	0,35	0,31	0,01

* Приказ Минсельхоза России №552 от 13.12.2016 (с изменениями на 13.06.2024 г.) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного назначения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного назначения».

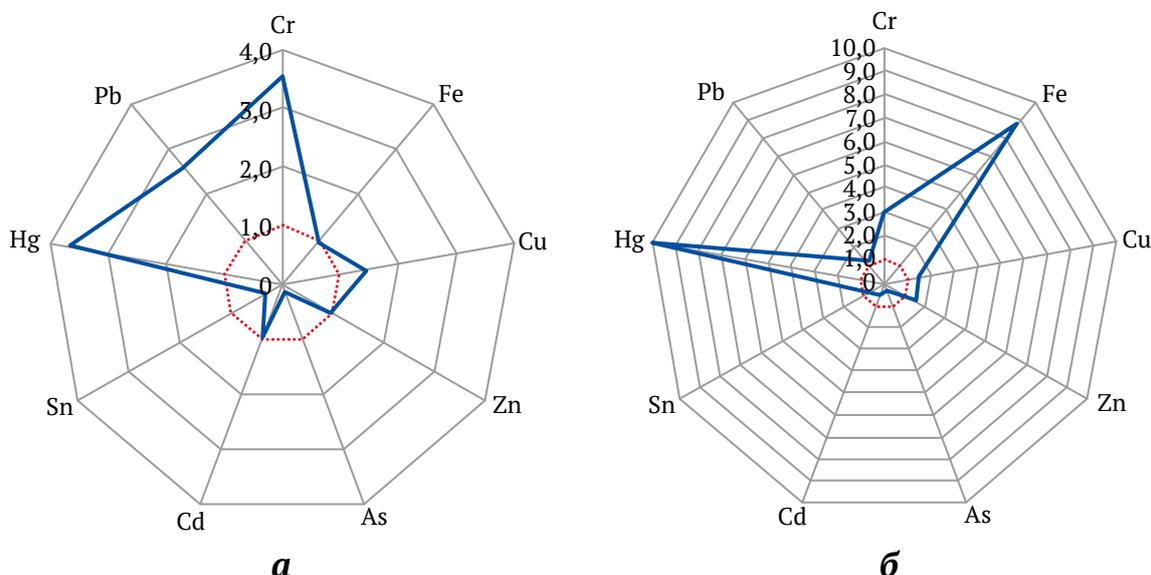


Рис. 3. Элементный состав волос молодого населения пос. Солнечный относительно средних показателей по России: а – девочки; б – мальчики



проведение экологических мероприятий путём внедрения технологических решений, в том числе с учётом современных технологий. Так, за последние 10 лет исследователями Тихоокеанского государственного университета предложено проведение рекультивации или консервации отходов с использованием субстратов из измельченной коры ели, лиственницы и берёзы с добавлением азотного активатора и триходермы⁶. В дальнейшем компоненты субстрата изменялись и добавлялись. Так, в 2015 г. был получен Патент РФ на состав для рекультивации хвостохранилища с использованием фототрофных бактерий⁷. Эффективными показали себя также составы с добавлением биоугля⁸ и отработанного мицелия вешенки⁹. Использование биологических субстратов из отходов других производств подразумевает снижение затрат на приобретение чаще всего применимых для процесса рекультивации плодородных почв. За последние годы в крае после лесозаготовки и переработки

древесины накоплено более миллиона тонн лесопромышленных отходов. Таким образом, рекультивация или консервация поверхности хвостохранилища с их использованием является наиболее актуальной для Хабаровского края. В связи с этим необходимо совершенствование и внедрение предлагаемой технологии, которая способствует снижению затрат на рекультивацию и ликвидацию эрозионных процессов.

Заключение

На основании проведенных исследований и анализа литературных данных отмечается, что второе хвостохранилище Солнечного ГОКа является серьезным источником техногенного загрязнения окружающей среды. Концентрации тяжёлых металлов в почвогрунтах превышают ПДК по Cu, Zn, Pb и Hg в 12,36, 2,73, 9,71 и 1,4 соответственно. Среднее содержание As в почвах превышает нормативные значения в 569,09 раз. В водных объектах максимальные значения по содержанию химических элементов выявлены по Cr, Cu, Fe и Zn. При этом содержание As не превышает нормативных показателей.

Оценка элементного статуса населения горняцкого посёлка Солнечный в возрасте до 14 лет относительно концентрации химических элементов в волосах детей и подростков в зависимости от пола показала превышение содержания Hg, Pb и Cr. Особенностью элементного статуса для девочек в исследуемой группе является пониженное содержание важного эссенциального элемента Zn. Для мальчиков отмечается превышение по концентрации Fe.

Предложены технические решения с целью снижения распространения загрязняющих веществ от хвостохранилищ, в том числе Солнечного ГОКа, с использованием отходов лесоперерабатывающей промышленности.

⁶ Крупская Л.Т., Майорова Л.П., Орлов А.М. и др. Патент РФ 2486733. Способ рекультивации земель, нарушенных токсичными отходами, складированными в хвостохранилище, в условиях муссонного климата. 2013.

⁷ Крупская Л.Т., Кириенко О.А., Майорова Л.П. и др. Патент № 2569582. Способ рекультивации поверхности хвостохранилища, содержащего токсичные отходы, с использованием фототрофных бактерий. 2015.

⁸ Крупская Л.Т., Леоненко Н.А., Голубев Д.А., Леоненко А.В. Патент РФ № 2625469 от 14.07.2017. Состав пылеподавления и рекультивации поверхности хвостохранилища. Заявка № 2016122808 от 08.06.2016.

⁹ Крупская Л.Т., Ищенко Е.А., Голубев Д.А. и др. Патент РФ № 2707030 от 21.11.2019. Состав для снижения пылевой нагрузки на экосферу и рекультивации поверхности хвостохранилища. Заявка № 2019114495 от 13.05.2019.

Список литературы / References

1. Зверева В.П., Фролов К.Р. Оценка влияния техногенных процессов, протекающих на хвостохранилище ЦОФ Комсомольского оловорудного района, на гидросферу в широком интервале температур. *Экологическая химия*. 2016;25(4):217–221.
Zvereva V.P., Frolov K.R. Estimation of action of technogenic processes, proceeding at the CCM Tailing Dump in the Komsomol'sky tin-ore district, on the hydrosphere within a wide temperature range. *Ecological Chemistry*. 2016;25(4):217–221. (In Russ.)
2. Гула К.Е., Крупская Л.Т., Дебенцева А.М. и др. К вопросу оценки хвостохранилища как источника загрязнения природной среды. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(S5):234–241.
Gula K.E., Krupskaya L.T., Derbentseva A.M. et al. On the issue of assessing tailings dumps as a source of environmental pollution. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(S5):234–241. (In Russ.)
3. 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 ecosystem and human health. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):16–22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22>
4. Крупская Л.Т., Зверева В.П., Майорова Л.П. и др. *Эколого-геохимические основы оценки влияния техногенной системы на окружающую среду и ее охрана (на примере закрытого горного предприятия «Солнечный ГОК»)*. Монография. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та; 2019. 260 с.
Krupskaya L.T., Zvereva V.P., Mayorova L.P. et al. *Ecological and geochemical bases for assessing the impact of man-made systems on the environment and their protection (on the example of the Solnechny GOK closed mining enterprise)*. Monograph. Khabarovsk: Pacific State University Publishing House; 2019. 260 p. (In Russ.)



5. Ханчук А.И., Крупская Л.Т., Зверева В.П. Экологические проблемы освоения оловорудного сырья в Приморье и Приамурье. *География и природные ресурсы*. 2012;(1):62–67. (Перев. вер.: Khanchuk A.I., Krupskaya L.T., Zvereva V.. Ecological problems of development of tin ore resources in Primorie and Priamurie. *Geography and Natural Resources*. 2012;33(1):45–49. <https://doi.org/0.1134/S1875372812010076>)
Khanchuk A.I., Krupskaya L.T., Zvereva V.P. Ecological problems of development of tin ore resources in Primorie and Priamurie. *Geography and Natural Resources*. 2012;33(1):45–49. <https://doi.org/0.1134/S1875372812010076> (Orig. ver.: Khanchuk A.I., Krupskaya L.T., Zvereva V.P. Ecological problems of development of tin ore resources in Primorie and Priamurie. *Geografia i Prirodnye Resursy*. 2012;(1):62–67. (In Russ.))
6. Постникова В.В., Яхонтова Л.К. *Минералогия зоны гипергенеза оловорудных месторождений Комсомольского района*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР; 1984. 122 с.
Postnikova V.V., Yakhontova L.K. *Mineralogy of the hypergenetic zone of tin ore deposits in the Komsomolsk region*. Vladivostok: DVNTS of the USSR Academy of Sciences; 1984. 122 p. (In Russ.)
7. Растанина Н.К., Крупская Л.Т. О роли экологических факторов в изучении здоровья населения горняцких поселков на юге Дальнего Востока. *Экология и промышленность России*. 2008;(12):56–57.
Rastanina N.K., Krupskaya L.T. On the role of environmental factors in the study of the health of the population in mining settlements in the South of the Far East. *Ecology and Industry of Russia*. 2008;(12):56–57. (In Russ.)
8. Байкенова Г.Е., Барановская Н.В., Какабаев А.А. и др. Индикаторные показатели состояния экосистем в элементном составе волос жителей районов Северного Казахстана. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(7):148–158.
Baikenova G.E., Baranovskaya N.V., Kakabaev A.A. et al. Indicators of the state of the ecosystems based on the hair compositions of the Northern Kazakhstan residents. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(7):148–158. (In Russ.)
9. Афтанас Л.И. и др. *Элементный статус населения России. Ч. 5: Элементный статус населения Сибирского и Дальневосточного федеральных округов*. Под ред. А. В. Скального, М. Ф. Киселева. СПб: Медкнига «ЭЛБИ-СПб»; 2014. 543 с.
Aftanas L.I. et al. *The elemental status of the Russian population. Part 5: The elemental composition of the population in the Siberian and Far Eastern federal districts*. Skalny A. V., Kiselyov M. F. (Eds.) St. Petersburg: Medical book “ELBI-SPb”; 2014. 543 p. (In Russ.)
10. Побилат А.Е., Киричук А.А., Баранова О.В. Особенности элементного статуса коренного населения юга Средней Сибири. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2024;32(2):163–171. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-2-163-171>
Pobilat A.E., Kirichuk A.A., Baranova O.V. Features of the elemental status of the indigenous population of the south of Central Siberia. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(2):163–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-2-163-171>
11. Побилат А.Е., Киричук А.А., Баранова О.В. и др. Изучение элементного статуса населения различных промышленных районов как индикатора экологического загрязнения. *АгроЭкоИнфо*. 2023;(6). <https://doi.org/10.51419/202136619>
Pobilat A.E., Kirichuk A.A., Baranova O.V. et al. The study of the elemental status of the population of various industrial areas as an indicator of environmental pollution. *AgroEcoInfo*. 2023;(6). (In Russ.) <https://doi.org/10.51419/202136619>
12. Растанина Н.К., Галанина И.А., Попадёв И.А. Горно-экологический мониторинг изменения почв в границах влияния оловорудного ГОКа в Приамурье. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки*. 2024;(5):22–26.
Rastanina N.K., Galanina I.A., Popadyev I.A. Mining and environmental monitoring of soil changes within the boundaries of the influence of tin ore mining in the Amur region. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Natural and Technical Sciences*. 2024;(5):22–26. (In Russ.)

Информация об авторах

Наталья Константиновна Растанина – кандидат биологических наук, доцент высшей школы промышленной инженерии, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-0252-6220](https://orcid.org/0000-0002-0252-6220); e-mail n.rastanina@yandex.ru

Дмитрий Андреевич Голубев – кандидат технических наук, доцент высшей школы управления природными ресурсами, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск; ведущий научный сотрудник отдела охраны, защиты леса и лесной экологии, Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, г. Хабаровск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9416-2913](https://orcid.org/0000-0001-9416-2913); e-mail poet.golubev@mail.ru

Александр Владимирович Перфильев – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9331-2710](https://orcid.org/0000-0002-9331-2710); e-mail a.v.perfilev@mail.ru



Павел Леонидович Растанин – студент, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация; ORCID [0009-0008-6693-2747](https://orcid.org/0009-0008-6693-2747)

Илья Андреевич Попадъев – студент, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация; ORCID [0009-0009-7054-3856](https://orcid.org/0009-0009-7054-3856)

Information about the authors

Natalia K. Rastanina – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor of the Higher School of Industrial Engineering, Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-0252-6220](https://orcid.org/0000-0002-0252-6220); e-mail n.rastanina@yandex.ru

Dmitry A. Golubev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Higher School of Natural Resources Management, Pacific State University, Khabarovsk; Leading Researcher at the Department of Forest Protection and Forest Ecology, Far East Forestry Research Institute, Khabarovsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9416-2913](https://orcid.org/0000-0001-9416-2913); e-mail poet.golubev@mail.ru

Alexander V. Perfiliev – Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9331-2710](https://orcid.org/0000-0002-9331-2710); e-mail a.v.perfilev@mail.ru

Pavel L. Rastanin – Student, Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation; ORCID [0009-0008-6693-2747](https://orcid.org/0009-0008-6693-2747)

Илья А. Попадьев – Student, Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation; ORCID [0009-0009-7054-3856](https://orcid.org/0009-0009-7054-3856)

Поступила в редакцию 08.11.2024

Поступила после рецензирования 03.12.2024

Принята к публикации 04.12.2024

Received 08.11.2024

Revised 03.12.2024

Accepted 04.12.2024



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-274>

УДК 621.671.22

**Снижение загрязнения шахтных вод
в системе участкового водоотлива кимберлитового рудника**Н. П. Овчинников   

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

 ovchinnlar1986@mail.ru**Аннотация**

Осветление загрязненных шахтных вод путем отстаивания в специальных водосборных емкостях сопровождается постепенным снижением их рабочего объема из-за заиления. Эксплуатация насосных агрегатов комплекса водоотлива в условиях заиленных водосборников подземного горного предприятия негативно отражается на их долговечности и энергоэффективности. Для недопущения сильного ухудшения условий эксплуатации насосного оборудования заиленные водосборные емкости регулярно выводятся из работы в целях чистки от осевших продуктов заиления с помощью самоходной техники. С выходом кимберлитовых рудников РФ на проектную мощность периодичность работы водосборников участкового водоотлива между чистками заметно снижается. В настоящее время на кимберлитовых рудниках чистка заиленных водосборников систематически происходит с задействованием всех имеющихся погрузочно-доставочных машин механоэнергетической службы. Увеличение рабочего парка указанных машин сдерживается их дороговизной. В связи с этим снижение интенсивности загрязнений шахтных вод, поступающих в водосборники участкового водоотлива, является актуальной задачей и представляет практический интерес. По результатам математического моделирования установлено, что добиться существенного снижения интенсивности загрязнения шахтных вод в системе участкового водоотлива кимберлитового рудника можно путем ликвидации шламообразований, возникающих в результате просыпа руды при перегружении с питателя на ленту конвейера основного горизонта. Для устранения указанного источника шламообразования был разработан механизированный комплекс по сбору просыпанной горной массы, где ключевым элементом является заборно-погрузочное устройство.

Ключевые слова

кимберлитовый рудник, шахтные воды, участковый водоотлив, водосборник, осветление, заиление, шламообразование, просып руды, энергоэффективность, математическое моделирование, технологическое решение

Для цитирования

Ovchinnikov N.P. Reducing mine water contamination at the local drainage facility of a kimberlite mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):169–179. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-274>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research paper

**Reducing mine water contamination
at the local drainage facility of a kimberlite mine**N. P. Ovchinnikov   

North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russian Federation

 ovchinnlar1986@mail.ru**Abstract**

The clarification of contaminated mine water by means of sedimentation in designated water collectors is accompanied by a gradual decrease in their effective volume due to siltation. The operation of pumping units within the drainage facility under conditions of silted water collectors at underground mining site adversely affects both their service life and energy efficiency. To prevent severe degradation in pump operating conditions, silted underground water collectors are regularly taken out of operation for cleaning, using self-propelled equipment. As Russian kimberlite mines reach their design capacity, the interval between cleaning cycles of the local drainage system's water collectors has significantly decreased. Currently, at kimberlite mines, the cleaning of silted water collectors is routinely carried out using all available load-haul-dump (LHD) machines



operated by the mine's Mechanical and Power Service. The expansion of the LHD fleet is constrained by the high cost of these machines. In this context, reducing the intensity of mine water contamination entering the water collectors of the local drainage system has become a pressing and practically significant objective. Mathematical modeling has shown that a substantial reduction in mine water contamination within the local drainage system of a kimberlite mine can be achieved by eliminating sludge formation caused by ore spillage during transfer from the feeder to the main level conveyor belt. To eliminate this source of sludge formation, a mechanized system for collecting ore spillage has been developed, with a specially designed collecting and loading unit as its key component.

Keywords

kimberlite mine, mine water, local drainage facility, water collector, water clarification, siltation, sludge formation, ore spillage, energy efficiency, mathematical modeling, technological solution

For citation

Ovchinnikov N.P. Reducing mine water contamination at the local drainage facility of a kimberlite mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):169–179. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-274>

Введение

На сегодняшний день значительная часть месторождений твердых полезных ископаемых в мире обрабатывается подземным способом. В обозримом будущем количество горнодобывающих предприятий, перешедших на подземный способ добычи минерального сырья, будет только увеличиваться.

Подземный способ добычи твердых полезных ископаемых обычно сопровождается поступлением шахтных вод в горные выработки, которые в конечном итоге откачиваются насосным оборудованием комплекса водоотлива на дневную поверхность [1, 2].

Одной из отличительных черт шахтных вод является наличие в их составе нерастворимых механических примесей, контакт которых с элементами насоса приводит к истиранию металла [3–5].

На подземных горных предприятиях осветление шахтных вод реализуется путем их отстаивания в специальных водосборных емкостях (осветлители и водосборники) [6].

Отстаивание загрязненной воды сопровождается постепенным ухудшением аккумулирующей способности емкостей по причине заиления. Уменьшение их рабочего объема закономерно ведет к снижению качества осветления шахтных вод, что в конечном итоге негативно отражается на долговечности и энергоэффективности насосного оборудования водоотлива [7–10], а в случае худшего развития событий – может привести к приостановлению горных работ на руднике (шахте) в связи с угрозой затопления. Причиной этому в первую очередь служит ускоренный гидроабразивный износ деталей проточной части насосного оборудования [11, 12]. Поэтому заиленные водосборные емкости регулярно выводятся из работы в целях их чистки от осевших продуктов заиления с задействованием самоходной техники механоэнергетической службы (МЭС) предприятия, главным образом погрузочно-доставочных машин (ПДМ) [13, 14].

Практика показывает, что с выходом отечественных кимберлитовых рудников на проектную мощность периодичность работы водосборников участкового водоотлива между чистками заметно снижается и может составлять до 3 сут [15]. Такой расклад событий справедливо подразумевает увеличение рабочего парка ПДМ МЭС, так как сбор и откатка продуктов заи-

ления в настоящее время нередко происходят с задействованием всех имеющихся машин и в случае отказа одной из них процесс чистки заиленных емкостей существенно затрудняется. Однако вопрос о приобретении дополнительного количества ПДМ для нужд МЭС в настоящее время находится в стадии проработки в связи с их дороговизной. Кроме этого, снижение периодичности работы водосборных емкостей между чистками негативно влияет на финансовые затраты, связанные с эксплуатацией действующего парка ПДМ МЭС [16].

Снижения скорости заиления водосборников участкового водоотлива при условии выхода кимберлитового рудника на проектную мощность можно добиться путем ограничения поступления в них различного рода шламообразований.

Стоит отметить, что до сегодняшнего дня исследования по установлению долевого участия источников шламообразования в загрязнении шахтных вод на кимберлитовых рудниках не проводились.

Целью настоящей работы является установление основных источников шламообразования, влияющих на скорость заиления водосборников участкового водоотлива кимберлитовых рудников, с последующей разработкой технологического решения по ограничению их воздействия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- разработать математические модели шламообразования в условиях участкового водоотлива с учетом выбранной технологии подземной отработки месторождения кимберлитовых руд;

- выполнить доленое распределение источников шламообразования в загрязнении шахтных вод применительно к участковому водоотливу кимберлитовых рудников с последующим установлением наиболее значимых среди них;

- разработать и обосновать технологическое решение в целях минимизации воздействия источников шламообразования в плане загрязнения шахтных вод применительно к участковому водоотливу кимберлитовых рудников.

В качестве основных методов исследований в работе использовались методы визуального наблюдения и математического моделирования.



Сведения об объекте исследования

Многочисленные наблюдения за процессом загрязнения шахтных вод, поступающих в водосборники участкового водоотлива кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА», свидетельствуют, что природа возникновения шламообразований весьма разнообразна.

На отечественных кимберлитовых рудниках с традиционной (слоевой) технологией отработки месторождения характерными источниками шламообразования являются вторичные продукты закладочных работ, в частности пульпа, образованная вследствие промывки водой закупоренных сегментов трубопровода, реже по причине вытекания закладочной смеси из разрушенного участка изолирующей перемычки закладываемой горной выработки. Эпизодически возникающие случаи разрушения изолирующей перемычки объясняются нарушением технологии проведения закладочных работ [17].

На обводненных кимберлитовых рудниках, где применяется закладка выработанного пространства, также характерным источником шламообразования является пульпа, твердая фаза которой представлена горной массой, отбитой проходческим комбайном в процессе добычных работ.

В плане формирования шламообразований отличительной чертой кимберлитового рудника «Удачный», где используется технология отработки месторождения путем обрушения горного массива, является систематический пролив содержимого скипового сосуда при выдаче продуктов заилиения на дневную поверхность. Пролив продуктов заилиения из скипа объясняется низкой конструкционной надежностью донного клапана, отвечающего за опорожнение подъемного сосуда [18].

Вне зависимости от принятой технологии подземной отработки кимберлитовых месторождений традиционными источниками шламообразования являются: пульпа, твердая фаза которой – просыпанная в процессе перегрузки с питателя на ленточный конвейер кимберлитовая руда, пульпа, пролитая из ковша ПДМ МЭС при откатке продуктов заилиения, а также пульпа, образованная в результате замывки рабочей ветви ленты конвейера в целях устранения ее порыва [19, 20]. Порыв ленты является результатом износа ее полотна шахтостроительным мусором, а также перегруза.

Математические модели шламообразования в условиях участкового водоотлива кимберлитового рудника

В соответствии с результатами визуальных наблюдений за процессом загрязнения шахтных вод в условиях участкового водоотлива кимберлитового рудника общий суточный объем шламообразования при разработке алмазонасного месторождения с применением слоевой технологии с закладкой выработанного пространства V_{cf} , м³, а также технологии обрушения горного массива V_{bc} , м³, можно определить следующим образом:

$$V_{cf} = V_{flush} + V_{leak} + V_{exc} + V_{spill} + V_{wash} + V_{LHD}; \quad (1)$$

$$V_{bc} = V_{spill} + V_{wash} + V_{skip} + V_{LHD}, \quad (2)$$

где V_{flush} – объем шламообразования, возникший в результате промывки водой закупоренных сегментов закладочного трубопровода, м³; V_{leak} – объем шламообразования, возникший в результате протечки закладочной смеси из разрушенного участка изолирующей перемычки, м³; V_{exc} – объем шламообразования, где твердая фаза представлена горной породой, отбитой проходческим комбайном в процессе добычных работ, м³; V_{spill} – объем шламообразования, где твердая фаза представлена кимберлитовой рудой, просыпанной при ее перегрузке с питателя на ленту конвейера, м³; V_{wash} – объем шламообразования, возникший в результате замывки рабочей ветви ленты конвейера, м³; V_{skip} – объем шламообразования, возникший в результате проливания продуктов заилиения из скипового сосуда, м³; V_{LHD} – объем шламообразования, возникший в результате проливания продуктов заилиения из ковша ПДМ МЭС, м³.

Величина V_{flush} представляет собой:

$$V_{flush} = k_{backfill} n_{flush} S_{pipe} k_v, \quad (3)$$

где $k_{backfill}$ – коэффициент, учитывающий время отработки очистной камеры t_1 , ее подготовки t_2 и заполнения закладочной смесью t_3 ; n_{flush} – количество промывок закладочного трубопровода при заполнении смесью одной отработанной очистной камеры; S_{pipe} – площадь поперечного сечения закладочного трубопровода, м²; l_{pipe} – длина заполнения участка закладочного трубопровода, м; k_v – коэффициент, учитывающий суммарный объем закупоренных сегментов закладочного трубопровода.

Коэффициент $k_{backfill}$ рассчитывается как:

$$k_{backfill} = \frac{1}{t_1 + t_2 + t_3}. \quad (4)$$

Согласно наблюдениям за проведением закладочных работ на рудниках «Мир» и «Интернациональный» коэффициент k_{resid} принимается равным 0,2.

Величина V_{leak} определяется следующим образом:

$$V_{leak} = k_0 k_{backfill} \frac{86400}{t_{flow1}} V_l, \quad (5)$$

где k_0 – коэффициент, учитывающий риск дренажа закладочной смеси из изолирующей перемычки закладываемой горной выработки; t_{put1} – время перемещения потоком воды объема закладочной смеси, вытекающей за секунду из разрушенного участка изолирующей перемычки закладываемой горной выработки V_{disch} , с.

Время t_{flow1} находится как:

$$t_{flow1} = \frac{b_w h_w l_{flow1}}{q_{prod}}, \quad (6)$$

где b_w и h_w – ширина и глубина потока воды, который увлекает в водосборники участкового водоотлива часть закладочной смеси, вытекающей из изолирующей перемычки, м; l_{flow1} – горизонтальное расстояние от очага разлива закладочной смеси до водосборника, м; q_{prod} – приток воды в условиях добычного горизонта, м³/с.



Объем V_l равен:

$$V_l = \frac{V_{layer}}{t_l}, \quad (7)$$

где V_{layer} – объем слоя закладочной смеси, m^3 ; t_l – время вытекания слоя смеси из изолирующей перемычки закладываемой горной выработки, с.

Объем V_{layer} представляет собой:

$$V_{layer} = b_k l_k h_{layer}, \quad (8)$$

где b_k и l_k – ширина и длина отработанной очистной камеры, м; h_{layer} – высота слоя закладочной смеси в отработанной очистной камере, м.

Время t_l равно:

$$t_l = \frac{V_{layer}}{86400 S_{crack} h_{layer}} \cdot \sqrt{\frac{2h_{layer}}{g}}, \quad (9)$$

где S_{crack} – площадь трещины в изолирующей перемычке камеры, откуда дренирует закладочная смесь, m^2 .

Объем V_{exc} равен:

$$V_{exc} = k_{sl} k_{trans} \frac{A_0}{t_{flow2} \rho_r}, \quad (10)$$

где k_{sl} – коэффициент, учитывающий соотношение твердой и жидкой фаз шламобразования; k_{trans} – коэффициент, учитывающий количество отбитой комбайном горной породы, поступившей с добычного на основной горизонт кимберлитового рудника; t_{flow2} – время перемещения потоком воды горной породы, отбитой комбайном за секунду, с; A_0 – производительность рудника, кг/сут; ρ_r – средняя плотность отбитой горной породы, kg/m^3 .

Время t_{flow2} определяется следующим образом:

$$t_{flow2} = \frac{b_w h_w l_{flow2}}{q_{prod}}, \quad (11)$$

где l_{flow2} – среднее горизонтальное расстояние от места расположения отбитой горной породы до водосборника участкового водоотлива, м.

Объем V_{spill} равен:

$$V_{spill} = k_{sl} \cdot \frac{10A_0}{t_{flow3} \rho_r} \cdot k_{loss}, \quad (12)$$

где t_{flow3} – время перемещения потоком воды части руды, просыпанной за секунду при перегрузке с питателя на ленту конвейера, с; k_{loss} – коэффициент, учитывающий количество просыпанной горной массы.

Величина t_{flow3} :

$$t_{flow3} = \frac{b_w h_w l_{flow3}}{q_{main}}, \quad (13)$$

где l_{flow3} – среднее горизонтальное расстояние от места просыпа горной массы до водосборника участкового водоотлива, м; q_{main} – приток воды в условиях основного горизонта, m^3/c .

Коэффициент k_{loss} рассчитывается как:

$$k_{loss} = \frac{86400 m_{spill}}{A_0}, \quad (14)$$

где m_{loss} – масса просыпанной горной массы за секунду, кг.

В соответствии с натурными исследованиями, выполненными на рудниках «Удачный» и «Мир», $m_{spill} \approx 0,5$ кг при $A_0 = 11000$ т/сут, $m_{spill} \approx 0,1$ кг при $A_0 = 2700$ т/сут.

Величина V_{wash} определяется следующим образом:

$$V_{wash} = k_{failure} k_{sl} V_{conv}, \quad (15)$$

где $k_{failure}$ – коэффициент, учитывающий долговечность ленты конвейера; V_{conv} – вместимость ленты конвейера, m^3 .

Коэффициент $k_{failure}$ равен:

$$k_{failure} = \frac{24}{t_{belt}}, \quad (16)$$

где t_{belt} – средний ресурс ленты конвейера, ч.

Объем V_{conv} определяется как:

$$V_{conv} = b_{conv} l_{conv} H_{layer}, \quad (17)$$

где b_{conv} и l_{conv} – ширина и длина ленты конвейера, м; H_{layer} – высота слоя транспортируемой горной массы, м.

Объем V_{skip} находится следующим образом:

$$V_{skip} = k_{spill,skip} k_{fill,skip} n_{skip} V_{vessel}, \quad (18)$$

где $k_{spill,skip}$ – коэффициент, учитывающий интенсивность пролива содержимого скипа при выдаче на дневную поверхность продуктов заиливания; $k_{fill,skip}$ – коэффициент, учитывающий наполнение скипа продуктами заиливания; n_{skip} – количество поднятых на дневную поверхность скипов; V_{vessel} – вместимость скипа, m^3 .

Коэффициент $k_{spill,skip}$ равен:

$$k_{spill,skip} = \frac{V_{spill,skip}}{k_{fill,skip} V_{vessel}}, \quad (19)$$

где $V_{spill,skip}$ – объем продуктов заиливания, пролитых из скипового сосуда за один подъем, m^3 .

Согласно натурным исследованиям, проведенным на руднике «Удачный», $V_{spill,skip} \approx 0,05$ m^3 при $A_0 = 11000$ т/сут (грузоподъемность скипа = 30 т).

Объем V_{LHD} :

$$V_{LHD} = k_{spill,LHD} k_{fill,LHD} n_{trip} V_{bucket}, \quad (20)$$

где $k_{spill,LHD}$ и $k_{fill,LHD}$ – коэффициенты, учитывающие интенсивность пролива содержимого ковша ПДМ МЭС и его наполнение; n_{trip} – количество рейсов одной машины за сутки; V_{bucket} – вместимость ковша машины, m^3 .

Коэффициент $k_{spill,LHD}$ равен:

$$k_{spill,LHD} = \frac{V_{spill,LHD}}{k_{fill,LHD} V_{bucket}}, \quad (21)$$

где $V_{spill,LHD}$ – количество продуктов заиливания, пролитых из ковша ПДМ МЭС за один рейс, m^3 .

Результаты наблюдений на рудниках «Удачный» и «Мир» свидетельствуют, что $V_{spill,LHD} \approx 0,02$ m^3 при $V_{bucket} = 3,5...4$ m^3 .

С учетом преобразования системы выражений (3)–(21) на основе арифметических операций величины V_{cf} (1) и V_{bc} (2) принимают следующий вид:



$$V_{cf} = \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{0,2n_{leak} S_{pipe} l_{pipe}}{t_1 + t_2 + t_3} \right) + \\ & + \frac{1}{t_1 + t_2 + t_3} \cdot k_0 \cdot \frac{86400q_{prod}}{b_w h_w l_{flow1}} \cdot \frac{86400S_{crack} h_{layer}}{\sqrt{\frac{2h_{layer}}{g}}} + \\ & + \left(k_{sl} \frac{q_{prod} A_0}{b_w h_w l_{flow2} \rho_r} k_{trans} \right) + \\ & + \left(k_{sl} \frac{10q_{main}}{b_w h_w l_{flow3} \rho_r} \cdot 86400m_{spill} \right) + \\ & + \left(\frac{24}{t_{belt}} k_{sl} b_{conv} l_{conv} h_{layer} \right) + \\ & + (V_{spill,LHD} n_{trip}) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

и

$$V_{bc} = \left\{ \begin{aligned} & \left(k_{sl} \frac{10q_{main}}{b_w h_w l_{flow3} \rho_r} \cdot 86400m_{spill} \right) \\ & + \left(\frac{24}{t_{belt}} \cdot k_{sl} b_{conv} l_{conv} h_{layer} \right) \\ & + (V_{spill,skip} + n_{skip}) \\ & + (V_{spill,LHD} n_{trip}) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Таким образом, были разработаны две математические модели шламообразования в условиях участкового водоотлива, учитывающие особенности подземной отработки месторождений кимберлитовых руд.

Классификация источников шламообразования в условиях участкового водоотлива кимберлитового рудника

Долевое участие каждого отдельно взятого источника шламообразования Δ_i в загрязнении шахтных вод в системе участкового водоотлива кимберлитового рудника определяется следующим путем:

$$\Delta_i = \frac{V_i}{V_{sludge}} \cdot 100\%, \quad (24)$$

где V_i – объем шламообразования за сутки от источника i , m^3 ; V_{sludge} – общий объем шламообразования за сутки, т.е. V_{cf} или V_{bk} (в зависимости от принятой технологии подземной отработки месторождения кимберлитовых руд), m^3 .

Для установления величин V_i и V_{sludge} используются ранее выведенные математические модели (22) и (23).

В табл. 1 приведены результаты расчетов величин V_{cf} и V_{bk} , а также их составляющих применительно к кимберлитовым рудникам «Мир» и «Удачный».

На рис. 1 показано долевое участие ранее установленных источников шламообразования в загрязнении шахтных вод, поступающих в водосборники участковых водоотливов рудников «Мир» и «Удачный».

Исследованиями установлено, что на руднике «Мир» основными источниками загрязнения шахтных вод являются шламообразования V_{exc} , V_{flush} и V_{spill} , а на руднике «Удачный» – V_{spill} и V_{skip} . В обоих рассмотренных случаях значимым источником загрязнения является V_{spill} – на его долю приходится 24 и 75 % общего объема шламообразования.

Таблица 1

Результаты расчетов объемов шламообразований V_i , V_{cf} и V_{bk}

Рудник «Мир»		Рудник «Удачный»	
$V_{flush} = 3,96 \text{ м}^3$	$V_{spill} = 3,33 \text{ м}^3$	$V_{spill} = 23,19 \text{ м}^3$	$V_{LHD} = 0,14 \text{ м}^3$
$V_{leak} = 0,64 \text{ м}^3$	$V_{wash} = 0,77 \text{ м}^3$	$V_{wash} = 0,0024 \text{ м}^3$	–
$V_{exc} = 4,84 \text{ м}^3$	$V_{LHD} = 0,01 \text{ м}^3$	$V_{skip} = 7,5 \text{ м}^3$	–
$V_{cf} = 13,55 \text{ м}^3$		$V_{bk} = 30,83 \text{ м}^3$	

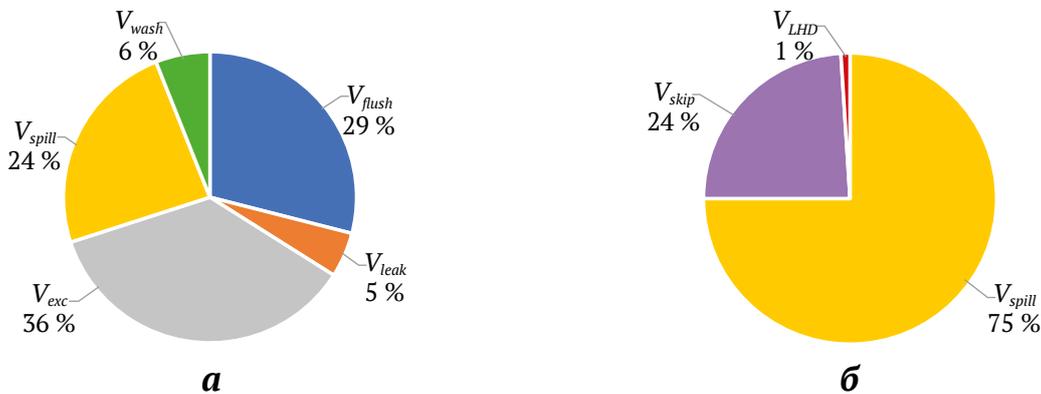


Рис. 1. Ранжирование источников шламообразования в плане загрязнения шахтных вод в условиях участкового водоотлива рудников «Мир» (а) и «Удачный» (б):

1 – V_{flush} ; 2 – V_{leak} ; 3 – V_{exc} ; 4 – V_{spill} ; 5 – V_{wash} ; 6 – V_{skip} ; 7 – V_{LHD}

Полученные результаты исследований справедливы в отношении действующих и планируемых к строительству обводненных кимберлитовых рудников АК «АЛРОСА».

Разработка и обоснование механизированного комплекса по сбору просыпанной горной массы

Для минимизации воздействия шламообразования V_{spill} на процесс загрязнения шахтных вод в условиях участкового водоотлива кимберлитового рудника предложен механизированный комплекс по сбору просыпанной кимберлитовой руды (далее – механизированный комплекс). Данный комплекс целесообразней монтировать в зоне перегрузки руды с питателя на ленту конвейера, так как в подконвейерном пространстве указанной зоны наблюдается основная доля просыпей. Она составляет 65–70 % от общего объема твердой фазы шламообразования V_{spill} .

С учетом вышесказанного констатируем, что в условиях подземной отработки кимберлитовых руд системами с закладкой выработанного пространства практическое применение предлагаемого технологического решения обеспечивает снижение интенсивности загрязнения шахтных вод в системе участкового водоотлива на ~ 16 %, на рудниках с технологией обрушения горного массива – в 2 раза.

Принцип работы механизированного комплекса заключается в следующем (рис. 2) [19].

При перегрузке кимберлитовой руды с питателя 1 на ленту конвейера 2 просыпанная горная масса скапливается на почве горизонта в зоне, огороженной от остального подконвейерного пространства перегородкой 3. Заборно-погрузочное устройство 4, с помощью которого осуществляется сбор просыпанной руды, крепится на боковой части несущей рамы ленточного конвейера. Указанное устройство с помощью

вращающихся лучей перемещает шламообразования в шламособорник 5. Поступающие на горизонт шахтные воды, которые ранее увлекали в сторону участкового водоотлива просыпанную горную массу, стекают в водосборник 6, при этом не вступая в контакт с отложениями. Из водосборника вода перекачивается погружным насосом 7 в водосборники участкового водоотлива. Часть воды через ответвляющуюся часть нагнетательного трубопровода насоса 7 систематически подается в шламособорник 5, где она при помощи агитатора погружного насоса 8 перемешивается с имеющейся горной массой до состояния пульпы и перекачивается им в накопительную емкость 9. Через сливной кран емкости 9 пульпа равномерно подается на ленту конвейера.

Для регулирования подачи воды в шламособорник 5 конец ответвляющейся части нагнетательного трубопровода погружного насоса 7 оснащается шаровым краном.

Насосное оборудование 7 и 8 должно быть оснащено средствами автоматизации для его своевременного пуска или останова в зависимости от степени заполнения водосборника 5 и шламособорника 6 содержимым.

Заборно-погрузочное устройство состоит из мотор-редуктора 1, диска 2, стержня 3, лучей 4, муфт 5 (рис. 3). Стержень с резьбой на одном конце ввинчивается в резьбовое отверстие, расположенное в середине диска. На другом конце стержня посажена муфта. Лучи посажены с натягом в пазах диска. Детали 2, 3 и 4 образуют нагребную звезду. Стоит отметить, что мотор-редуктор крепится путем болтового соединения 6 в продолговатых отверстиях 7 швеллера 8, приваренного к боковой части несущей рамы конвейера 9. Указанная форма отверстий позволяет регулировать положение мотор-редуктора в вертикальном и горизонтальном направлениях при его соединении с нагребной звездой с помощью муфт.

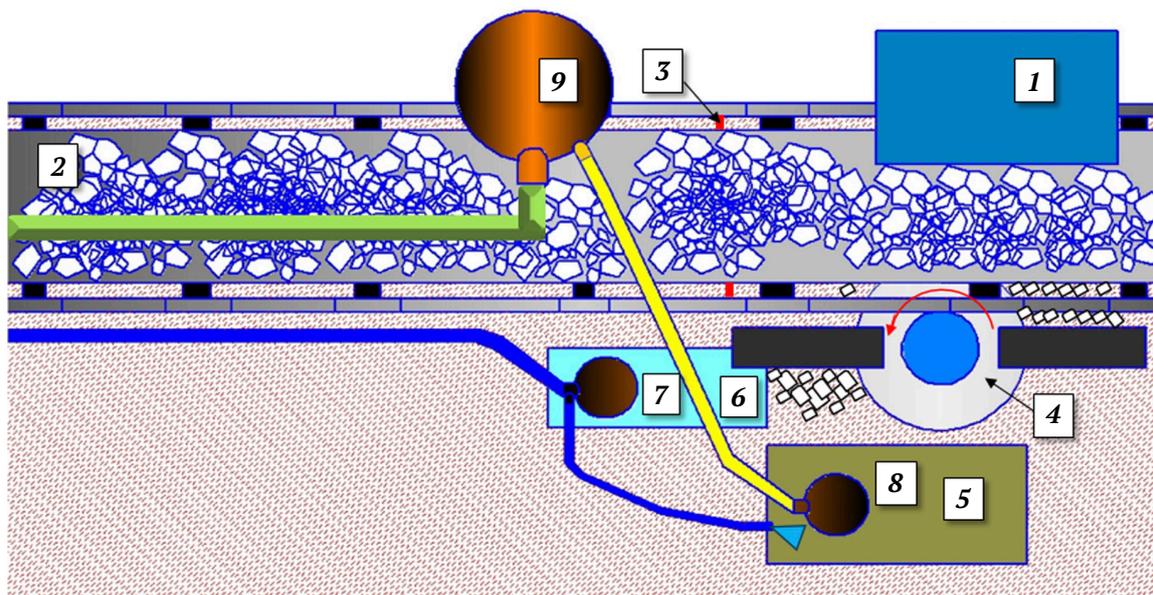


Рис. 2. Механизированный комплекс по сбору просыпанной руды: 1 – питатель; 2 – ленточный конвейер; 3 – перегородка; 4 – заборно-погрузочное устройство; 5 – шламособорник; 6 – водосборник; 7 – погружной насос; 8 – погружной насос с агитатором; 9 – емкость для сбора приготовленной пульпы

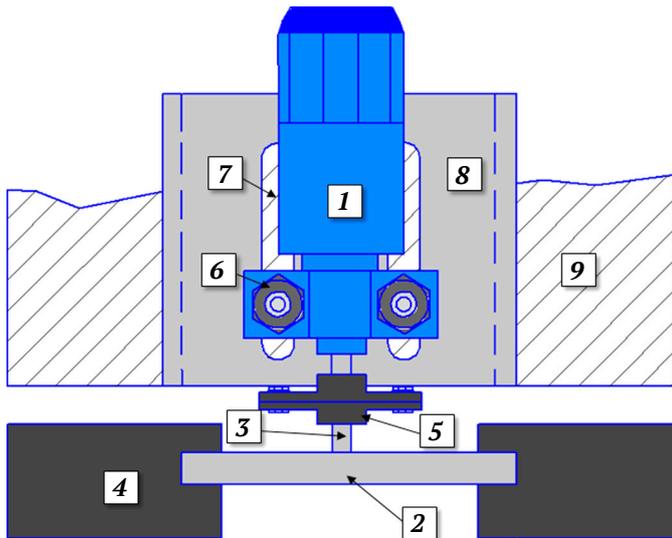


Рис. 3. Заборно-погрузочное устройство:

- 1 – мотор-редуктор; 2 – диск; 3 – стержень; 4 – луч;
- 5 – муфта; 6 – болтовое соединение; 7 – отверстие;
- 8 – пластина; 9 – боковая поверхность конвейера

Для снижения энергоемкости рассматриваемого устройства лучи 4 изготавливаются из облегченных материалов: дерева или композитов. Кроме этого, не стоит забывать, что указанные материалы менее восприимчивы к агрессивному воздействию высокоминерализованных шахтных вод.

Рекомендуемые соотношения геометрических параметров элементов заборно-погрузочного устройства:

$R_{disk} : l_{arm} - 1 : 3$; $l_{arm-in-slot} : R_{disk} - 1 : 2$; $b_{arm} : l_{arm-in-slot} - 1 : 4$, где R_{disk} – радиус диска; l_{arm} – длина луча; $l_{arm-in-slot}$ – длина участка луча, посаженного в пазу диска; b_{arm} – толщина луча.

Рабочие параметры заборно-погрузочного устройства зависят от количества лучей z_{star} , диаметра d_{star} и числа оборотов n_{star} нагребающей звезды [21, 22]. Количество лучей $z_{star} - 1-8$ штук, число оборотов $n_{star} - 24-45$ об/мин [22].

Эксплуатационные затраты механизированного комплекса во многом зависят от количества потребляемой электроэнергии мотор-редуктором заборно-погрузочного устройства.

Потребляемая мощность мотор-редуктора P_{mot} , кВт, определяется как:

$$P_{mot} = \frac{(M_1 + M_2)n_{star}}{9550 \cdot \eta}, \quad (25)$$

где M_1 – статический момент на нагребающей звезде, Н·м; M_2 – момент сопротивления на нагребающей звезде, Н·м; η – КПД мотор-редуктора.

Момент M_1 равен:

$$M_1 = \frac{2\pi I n_{star}}{60 t_{time}}, \quad (26)$$

где I – момент инерции нагребающей звезды, кг·м²; t_{time} – заданное время раскрутки или останова нагребающей звезды, с.

Момент I определяется как:

$$I = \frac{(m_{star} + m_{coupling})R_{star}^2}{2}, \quad (27)$$

где m_{star} – масса нагребающей звезды, кг; $m_{coupling}$ – общая масса двух муфт, кг; R_{star} – радиус нагребающей звезды, м.

Радиус R_{star} равен:

$$R_{star} = R_{disk} + l_{arm} + l_{arm-in-slot}. \quad (28)$$

В связи с тем что просыпанная руда скапливается между центром и дальним от питателя краем подконвейерной зоны, оптимальный радиус R_{star} находится согласно следующему равенству:

$$R_{star} - d_{mot} - b_{chan.sect} \geq \frac{b_{conv}}{2}, \quad (29)$$

где d_{mot} – диаметр корпуса мотор-редуктора, м; $b_{chan.sect}$ – ширина швеллера, м; b_{conv} – ширина ленты конвейера, м.

Момент M_2 равен:

$$M_2 = k_{resist} F_{capt} h_{arm} z_{star} \rho_{ore} g d_{star}, \quad (30)$$

где k_{resist} – коэффициент, учитывающий оказываемое сопротивление просыпанной горной массы при перемещении лучом нагребающей лапы в зависимости от ее степени обводненности w ; F_{capt} – средняя площадь захвата просыпанной горной массы одним лучом нагребающей звезды, м²; ρ_{ore} – плотность руды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

После перемножения величин F_{capt} и h_{arm} выражение (30) принимает следующий вид:

$$M_2 = k_{resist} V_{spill} z_{star} \rho_{ore} g d_{star}, \quad (31)$$

где V_{spill} – средний объем просыпанной горной массы за секунду, м³.

Согласно собранным практическим данным на кимберлитовом руднике «Удачный» обводненность просыпанной горной массы w не превышает 20 %. Результаты выполненных лабораторных исследований на физической модели нагребающей лапы показали, что при перемещении обводненной горной массы потребляемая мощность устройства P может возрасти в 1,15 раза (при $w = 20\%$) в сравнении с мощностью при ее перемещении в сухом состоянии P_0 (рис. 4).

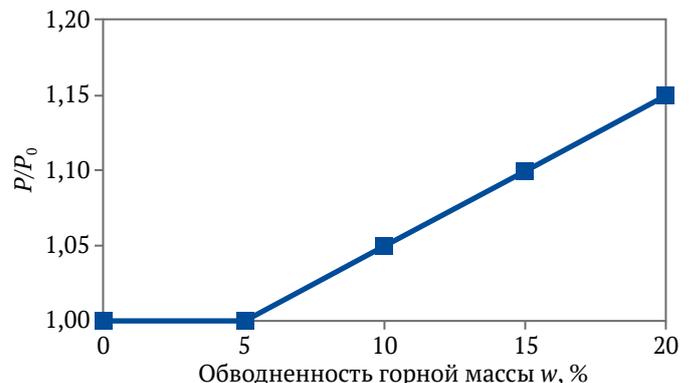


Рис. 4. Зависимость отношения P/P_0 от степени обводненности просыпанной горной массы w



На основании полученных результатов физического моделирования коэффициент k_{resist} принимается равным 1,15.

Объем V_{spill} равен:

$$V_{spill} = k_{zone} \frac{m_{spill}}{\rho_{ore}}, \quad (32)$$

где k_{zone} – коэффициент, учитывающий объем просыпанной горной массы непосредственно в зоне ее перегрузки с питателя на ленту конвейера; m_{spill} – масса просыпанной горной массы за секунду, кг.

Расчет ожидаемого технико-экономического эффекта от внедрения результатов исследования (на примере рудника «Удачный»)

Значительная часть твердой фазы шахтных вод обычно остается на дне водосборных горных выработок в виде ило-шламовых отложений, которые в дальнейшем удаляются с помощью погрузочно-доставочных машин и затем в зависимости от принятой технологии отработки месторождения кимберлитовых руд или используются в качестве одного из компонентов закладочной смеси, или выдаются на дневную поверхность подъемными установками [15].

Характерной особенностью осевшей ило-шламовой пульпы в водосборных горных выработках кимберлитовых рудников является наличие в ней полостей, наполненных шахтной водой. В процессе удаления пульпы ковшом погрузочно-доставочной машины данным полостям свойственно лопаться, что приводит к разливу воды. Это ведет к обильному загрязнению узлов и агрегатов машины (особенно подвергаются воздействию подвесной подшипник шарнирно-сочлененной рамы и электрооборудование), что в дальнейшем негативно сказывается на их долговечности.

Практика показывает, что средняя наработка таких погрузочно-доставочных машин на отказ на 30–40 % ниже, чем у аналогичной техники, используемой на других производственных участках кимберлитовых рудников.

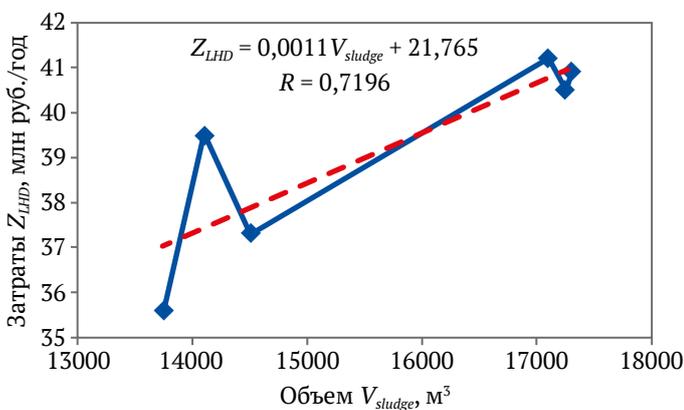


Рис. 5. Зависимость затрат на ремонты погрузочно-доставочных машин Z_{LHD} от объема перевозимых ими продуктов заилиения за год V_{sludge}

Таким образом, при расчете основных расходов на эксплуатацию водоотливного хозяйства кимберлитового рудника необходимо обязательно учитывать затраты на ремонты погрузочно-доставочных машин Z_{LHD} , млн руб/год, которые возникают вследствие чистки заиленных водосборных горных выработок и последующей откатки ило-шламовой пульпы:

$$Z_{LHD} = k_{failure} Z_{LHD*}, \quad (33)$$

где $k_{failure}$ – коэффициент, учитывающий среднюю долю отказов машин, вызванных их контактом с ило-шламовой пульпой ($k_{failure} \approx 0,35$); Z_{LHD*} – суммарные затраты на эксплуатацию машин в течение календарного года.

Согласно выполненным статистическим исследованиям [16] зависимость затрат Z_{LHD} от объема перевозимых погрузочно-доставочными машинами продуктов заилиения V_{sludge} , M^3 , описывается следующим уравнением регрессии (рис. 5).

Внедрение механизированного комплекса позволит значительно сократить затраты Z_{PDM} при эксплуатации водоотливных хозяйств кимберлитовых рудников.

Его ожидаемый срок окупаемости $T_{payback}$, мес, рассчитывается по формуле:

$$T_{payback} = \frac{Z_1 + Z_2}{\Delta Z_{LHD}} \cdot 12, \quad (34)$$

где Z_1 – расчетные затраты на разработку и монтаж комплекса, млн руб.; Z_2 – расчетные затраты на эксплуатацию комплекса, млн руб; ΔZ_{LHD} – разность затрат между текущими и ожидаемыми (при внедрении комплекса) затратами Z_{LHD} .

Ожидаемый ежегодный технико-экономический эффект Z_0 от практического внедрения технологического решения (после истечения срока окупаемости) определяется следующим образом:

$$Z_0 = \Delta Z_{LHD} - Z_2. \quad (35)$$

Согласно выполненным расчетам внедрение механизированного комплекса на рудник «Удачный» окупится за 10 мес. Ожидаемый ежегодный технико-экономический эффект от его использования составит 4 млн руб.

С учетом того что применение предлагаемого технологического решения дает возможность отказаться от приобретения дополнительной единицы машины для нужд МЭС рассматриваемого рудника, его ожидаемая технико-экономическая эффективность увеличивается в разы.

Заключение

По итогам выполненных исследований получены следующие значимые результаты:

1. На основе построенных математических моделей шламообразования в условиях водосборной сети участкового водоотлива кимберлитового рудника были определены основные источники загрязнения шахтных вод механическими примесями в зависимо-



сти от принятой технологии разработки алмазосодержащих руд. Установлено, что на рудниках с закладкой выработанного пространства основными источниками загрязнения шахтных вод являются объемы шламообразования, возникающие в результате промывки водой закупоренных сегментов закладочного трубопровода (29 %), объемы шламообразования в результате комбайновой отбойки горных пород (36 %), а также объемы шламообразования, возникающие вследствие просыпания руды при ее перегрузке с питателя на ленту конвейера основного горизонта (24 %). На рудниках с технологией отработки месторождений кимберлитовых руд путем обрушения горного массива доминирующим источником загрязнения шахтных вод являются объемы шламообразования, возникающие в результате просыпания руды с ленты конвейера. На их долю приходится 75 % от общего объема шламообразования.

2. Для снижения скорости загрязнения шахтных вод в условиях участков водоотливных установок применительно к кимберлитовым рудникам предложен механизированный комплекс по сбору просыпанной горной массы из подконвейерного пространства, исполнительный орган которого – погрузочно-заборное устройство – монтируется в зоне перегрузки руды с питателя на ленту конвейера. В условиях подземной отработки кимберлитовых руд системами с закладкой выработанного пространства внедрение указанного комплекса позволит добиться снижения интенсивности загрязнения шахтных вод на ~16 %, а на рудниках с технологией обрушения горного массива – в 2 раза. Установлено, что ожидаемый срок окупаемости технологического решения составит менее года (10 мес), а дальнейший технико-экономический эффект от внедрения – 4 млн руб/год (на примере рудника «Удачный»).

Список литературы / References

1. Паламарчук Н.В., Соломин А.П., Крутоус Н.С. Резервы повышения экономичности и надежности центробежных секционных насосов с осевым уравниванием ротора. *Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2023;(69):74–90.
Palamarchuk N.V., Solomin A.P., Krutous N.S. Reserves for increasing the efficiency and reliability of centrifugal sectional pumps with axial balancing of the rotor. *Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport*. 2023; (69):74–90. (In Russ.)
2. Сенкус В.В., Стефанюк Б.М. Исследование процесса осаждения шлама в отстойниках. *Известия вузов. Горный журнал*. 2006;(5):54–62.
Senkus V.V., Stefanyuk B.M. Investigation of the sludge deposition process in sedimentation tanks. *Minerals and Mining Engineering*. 2006;(5):54–62. (In Russ.)
3. Тимухин С.А., Долганов А.В., Попов Ю.В. и др. О разработке шахтных центробежных секционных двухпоточных насосов. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2014;2(34):39–41.
Timukhin S.A., Dolganov A.V., Popov Yu.V. et al. On the development of the mine sectional centrifugal dual-stream pumps. *News of the Ural State Mining University*. 2014;2(34):39–41. (In Russ.)
4. Александров В.И., Горелкин И.М. Гидравлический расчет трубопровода системы шахтного водоотлива с учетом потерь напора на транспортирование твердых частиц. *Горное оборудование и электромеханика*. 2013;(7):44–47.
Aleksandrov V.I., Gorelkin I.M. Hydraulic calculation of the mine drainage system pipeline of the taking into account pressure losses for the transportation of solid particles. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2013;(7):44–47. (In Russ.)
5. Зарипов А.Х. Оценка энергетической эффективности работы водоотливных установок и систем подачи сжатого воздуха. *Известия вузов. Горный журнал*. 2010;(4):74–77.
Zaripov A.H. Assessment of the energy efficiency of drainage installations and compressed air supply systems. *Minerals and Mining Engineering*. 2010;(4):74–77. (In Russ.)
6. Олизаренко В.В., Мингажев М.М. Определение времени заиливания и периодичности очистки главных водосборников подземных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;(7):27–30.
Olizarenko V.V., Mingazhev M.M. Determination of silting time and frequency of cleaning of the main reservoirs of underground mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2010;(7):27–30. (In Russ.)
7. Долганов А.В. Повышение энергоэффективности при эксплуатации комплексов шахтного водоотлива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;5(S9):16–23. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-5-9-16-23>
Dolganov A.V. Energy efficiency improvement during operation of mine waterlets. *Mining Informational and Analytical Bulletin* 2019;5(S9):16–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-5-9-16-23>
8. Зотов В.В., Мнацакян В.У., Базлин М.М. и др. Повышение ресурса рабочих колес центробежных насосов шахтного водоотлива. *Горная промышленность*. 2024;(2):143–146. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-143-146>
Zotov V.V., Mnatsakanyan V.U., Bazlin M.M. et al. Extending the service life of centrifugal dewatering pump impellers in mines. *Russian Mining Industry*. 2024;(2):143–146. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-143-146>



9. Долганов А.В. Гидроабразивный износ и экономичность водоотливных установок шахт и рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;5(S9):3–8. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-5-9-3-8>
Dolganov A.V. Hydroabrasive wear and profitability of water-drainage installations in mine and ore mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;5(S9):3–8. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-5-9-3-8>
10. Разумный Ю.Т. Рухлова Н.Ю., Рухлов А.В. *Энергоэффективность работы главного водоотлива угольной шахты*. Днепропетровск: Национальный горный университет; 2016. 109 с.
Razumnyi Yu.T. Ruxlova N.Yu., Ruxlov A.V. *Energy efficiency of the main drainage of the coal mine*. Dnepropetrovsk: National Mining University; 2016. 109 p. (In Russ.)
11. Uralov B., Berdiev S., Rakhmatov M., et al. Theoretical models and dependences for calculating intensity of hydroabrasive wear of pump working parts. In: *E3S Web of Conferences*. 2023;(365):03019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336503019>
12. Deng L., Hu Q., Chen J., et al. Particle Distribution and Motion in Six-Stage Centrifugal Pump by Means of Slurry Experiment and CFD-DEM Simulation. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(7):716. <https://doi.org/10.3390/jmse9070716>
13. Долганов А.В., Тимухин С.А. *Гидроабразивный износ насосов рудничного водоотлива*. М.: Изд. дом «Академия Естествознания»; 2016. 180 с.
Dolganov A.V., Timukhin S.A. *Hydroabrasive wear of mine drainage pumps*. Moscow: Academy of Natural Sciences Publ.; 2016. 180 p. (In Russ.)
14. Корпачев В.В., Харьков А.В., Березин С.Е. Технология очистки шламоотстойников с использованием погружных насосов. *Горная промышленность*. 2013;1(107):58.
Korpachev V.V., Kharkov A.V., Berezin S.E. Slurry pond cleanout technology with the application of submersible pumps. *Russian Mining Industry*. 2013;1(107):58. (In Russ.)
15. Овчинников Н.П. Влияние ило-шламовой пульпы на эффективность горных машин. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022;(2):348–356. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-2-1-348-356>
Ovchinnikov N.P. Influence of silt-slurry pulp on the efficiency of mining machines. *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2022;(2):348–356. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-2-1-348-356>
16. Овчинников Н.П., Зырянов И.В. Комплексная оценка последствий влияния загрязненных шахтных вод на эффективность системы водоотведения из рудника «Удачный». *Горный журнал*. 2022;(7):95–99. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.16>
Ovchinnikov N.P., Zyryanov I.V. Integrated assessment of mine water pollution influence on water removal efficiency in Udachny Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(7):95–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.16>
17. Рыльникова М.В., Олизаренко В.В., Мингажев М.М. Совершенствование технологии водоотведения и водоотлива при подземной разработке месторождений медно-колчеданных руд с твердеющей закладкой. *Маркшейдерский вестник*. 2012;2(88):16–20.
Ryl'nikova M.V., Olizarenko V.V., Mingazhev M.M. Improving the technology of drainage and in the underground development of deposits of copper-pyrite ores with filling hardening mixture. *Geological Survey Bulletin*. 2012;2(88):16–20. (In Russ.)
18. Семакин М.С. Шахтные скипы высокой эксплуатационной надежности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(12):145–147.
Semakin M.S. Skips of high operational reliability. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2013;(12):145–147. (In Russ.)
19. Овчинников Н.П. Разработка и обоснование комплекса для сбора просыпанной горной массы. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2023;(4):457–464.
Ovchinnikov N.P. Development and justification of a complex for collecting spilled rock mass. *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2023;(4):457–464. (In Russ.)
20. Бибиков П.Я. Очистка конвейерной ленты, взгляд на проблему. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2004;(3):300–302.
Bibikov P.Ya. Cleaning the conveyor belt, a look at the problem. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2004;(3):300–302. (In Russ.)
21. Афонина Н.Б., Отроков А.В., Хазанович Г.Ш. К вопросу назначения отдельных параметров нагребующих звезд погрузочных органов проходческих комбайнов. *Горная промышленность*. 2021;(5):90–93. <https://doi.org/10.30686/16099192-2021-5-90-93>
Afonina N.B., Otrokov A.V., Khazanovich G. Sh. On the question of the appointment of separate parameters of the roadheaders gathering-stars loading organs. *Russian Mining Industry*. 2021;(5):90–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/16099192-2021-5-90-93>
22. Otrokov A.V., Khazanovich G.S., Afonina N.B. Impact of design parameters on the efficiency of loading organs with gathering stars of the roadheaders. In: *Proceedings of the 4th international conference on industrial engineering ICIE*: Springer; 2018. Pp. 401–410. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_44



Информация об авторе

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

Information about the author

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

Поступила в редакцию	10.07.2024	Received	10.07.2024
Поступила после рецензирования	25.11.2024	Revised	25.11.2024
Принята к публикации	05.12.2024	Accepted	05.12.2024



ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-09-255>

УДК 330.131

**Инструменты экономического стимулирования освоения техногенных месторождений**В. В. Юрак^{1,2,3}   , М. Н. Игнатьева^{2,3}  , О. Г. Комарова² ¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация² Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация³ Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация vera_yurak@mail.ru**Аннотация**

Россия обладает значительным, но недостаточно используемым техногенным минеральным потенциалом, освоение которого способно расширить сырьевую базу и снизить экологическую нагрузку. Цель исследования – разработка эффективных экономических механизмов (включая решения для малого бизнеса), стимулирующих инвестиции в освоение техногенных месторождений. В работе проанализированы существующие инструменты стимулирования переработки техногенных минеральных образований, разработаны методический подход к отбору оптимальных инструментов и комплексная экономическая модель. Особое внимание уделено системе ранжирования инвестиционных проектов по трем ключевым критериям: бюджетной эффективности, коммерческой выгоде и экологическому эффекту. Для разных категорий проектов (зеленые, желтые, красные) определены наиболее эффективные инструменты поддержки, включая налоговые льготы, государственные гарантии и кредитные механизмы. Разработанная модель экономического механизма основана на шести принципах: ясности, транспарентности, командной работе, модульности, контролируемости и эффективности. Реализация предложенных мер позволит активизировать развитие малого бизнеса в сфере освоения техногенных месторождений.

Ключевые слова

малый бизнес, экономический механизм, инструментарий, ранжирование, модель, техногенные месторождения, ГЧП, стимулирование, техногенные минеральные образования

Для цитирования

Yurak V.V., Ignatyeva M.N., Komarova O.G. Economic incentive instruments for the development of technogenic deposits. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):180–200. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-09-255>

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Research paper

Economic incentive instruments for the development of technogenic depositsV. V. Yurak^{1,2,3}   , M. N. Ignatyeva^{2,3}  , O. G. Komarova² ¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation² Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation³ Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation vera_yurak@mail.ru**Abstract**

Russia possesses a significant but underutilized technogenic mineral potential, the development of which could expand the country's mineral resource base and reduce environmental pressure. The aim of this study is to develop an effective economic mechanism – including instruments suitable for small businesses – to stimulate investment in the development of technogenic deposits. The study analyzes existing economic instruments for incentivizing the processing of technogenic mineral accumulations (TMA), proposes a methodological approach for selecting the optimal set of instruments, and presents an integrated economic model. Special attention is given to a project prioritization system based on three key criteria: budgetary efficiency, economic efficiency, and environmental efficiency. For different project categories (green, yellow, red), the most effective instruments were identified, including tax incentives, state guarantees, and credit mechanisms. The proposed model of the economic mechanism is built on six fundamental principles: clarity, transparency, teamwork, modularity, controllability, and efficiency. The implementation of the proposed measures is expected to stimulate small business involvement in the development of technogenic deposits.

Keywords

small business, economic mechanism, instruments, project ranking, model, technogenic deposits, public-private partnership (PPP), incentives, technogenic mineral accumulations

For citation

Yurak V.V., Ignatyeva M.N., Komarova O.G. Economic incentive instruments for the development of technogenic deposits. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(2):180–200. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-09-255>

Введение

Малый и средний бизнес согласно экономической теории является двигателем развития экономики любой страны [1, 2]. Тем не менее критерии для отнесения предприятия к малому или среднему в разных странах разнятся, что подтверждается исследованиями Д.А. Плетнева, В.И. Бархатова и К.А. Наумовой¹. Для России такими критериями являются: объем ежегодного дохода и среднесписочная численность – для подразделения предприятий на микро-, малый и средний бизнес (далее в совокупности будем называть «малые предприятия» (МП)). Доказано, что МП являются базой для формирования среднего класса и являются ключевым фактором стабилизации и минимизации социальной напряженности, так как предоставляют рабочие места местному населению [3]. Горный бизнес тоже не является исключением [4, 5], а в последнее время расцвета концепта циркулярной экономики, усложнения геологических условий для разработки новых месторождений полезных ископаемых и источника минерально-сырьевой базы страны в части отработки техногенных минеральных образований, в том числе небольших россыпных месторождений (в данном случае речь идет об отрасли обращения с отходами производства и потребления), наблюдается тенденция к росту [6, 7]. Основными направлениями деятельности таких малых предприятий-недропользователей являются доизвлечение

полезных ископаемых из отходов производства и потребления и совершенствование или создание новых технологий переработки таких отходов [8]. Подобный тренд присущ не только российским условиям, но и западным странам, однако, если за рубежом доля малых предприятий-недропользователей от общего количества МП варьируется в пределах 15–30 %, то для России этот показатель равен 0,3–1,6 % [9] за период 2010–2021 гг. (рис. 1).

Рис. 1 демонстрирует относительное постоянство количества малых и средних предприятий в горно-металлургическом комплексе за десятилетний период. Тем не менее интересной кажется тенденция незначительного роста именно малого бизнеса среди организаций, занятых в сфере добычи полезных ископаемых, с 0,3 до 0,5 %. Более детальный анализ данных цифр показал, что этот прирост произошел главным образом за счет предприятий, задействованных в нефтяной промышленности, в противовес рудной [10, 11], не говоря уже об инновационных стартапах по переработке отходов. Но даже среди этих нефтяных предприятий большая часть, к сожалению, является убыточной² [12]. Все эти доводы свидетельствуют о наличии спектра проблем в развитии малого и среднего бизнеса в сфере добычи полезных ископаемых и переработки промышленных и коммунальных отходов, при этом одним из базовых с точки зрения экономики природопользования является несовершенство существующего экономического механизма, регулирующего данную сферу деятельности.

¹ Pletnev D., Barkhatov V., Naumova K. SME's Criteria in National Economies and Its Scale: A Comparative Study. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/355331587_SME's_Criteria_in_National_Economies_and_Its_Scale_A_Comparative_Study

² Малое и среднее предпринимательство в России 2013 г.: Стат. сб. Росстат. М.; 2013. 127 с.

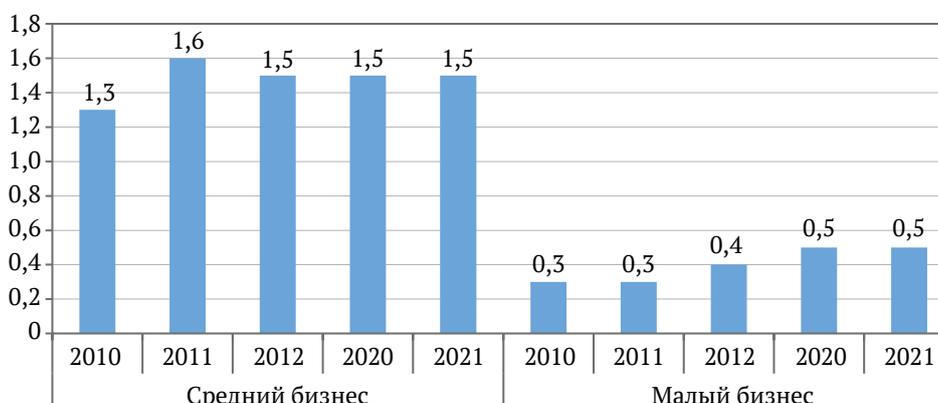


Рис. 1. Доля недропользователей в МП в РФ, %

Источник: составлено авторами по: Надымов Д. С. Разработка организационно-экономического механизма освоения техногенных месторождений с привлечением потенциала государственных инструментов развития. [Дис. ... канд. экон. наук] СПб; 2015. 157 с.; Малое и среднее предпринимательство в России. Стат. сб. Росстат. М.; 2022. 101 с.



Обзор нормативно-правовых актов в сфере обращения с ТМО: российский и зарубежный опыт

Игнорирование проблемы стимулирования деятельности по обращению с отходами производства и потребления находит свое отражение в наличии достаточно фрагментарных рекомендаций в государственных программных документах: «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года» (утв. Президентом РФ 30.04.2012) и «Экологическая доктрина Российской Федерации». В данных документах стимулирование деятельности по переработке ТМО ограничивается вторичной переработкой промышленных отходов, охватывая сбор, сортировку и последующее применение отходов в качестве вторичного сырья и источников энергии. Следовательно, в приоритете оказывается ресурсосбережение, в то время как экологические последствия остаются за пределами внимания. Этот подход соответствует концепции циркулярной экономики, ориентированной на повторное использование ресурсов, но игнорирует важные аспекты экологической устойчивости, такие как снижение загрязнения и сохранение биоразнообразия³. Таким образом, существующая система стимулов сосредоточена исключительно на экономической эффективности переработки отходов, упуская из виду более широкие экологические императивы, признанные в международных соглашениях и национальных стратегиях.

В программных документах, законодательстве и рекомендациях конференций, посвященных вопросам утилизации техногенных минеральных образований, подчеркивается необходимость разработки и внедрения механизмов экономического стимулирования их переработки⁴. В частности, в стратегиях устойчивого развития регионов неоднократно указывается на важность создания экономических стимулов для предприятий, занимающихся переработкой отходов горнодобывающей и металлургической промышленности. Законодательные акты, регулирующие обращение с отходами производства и потребления, также предусматривают возможность предоставления налоговых льгот и субсидий организациям, вовлеченным в переработку техногенных минеральных ресурсов⁵. Результаты научных конференций и экспертных обсуждений подтверждают, что эффективная система экономического стимулирования является ключевым фактором для повышения рентабельности и масштабирования процессов переработки техногенных минеральных образований, что, в свою очередь, спо-

собствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и рациональному использованию природных ресурсов. Так, в рекомендациях Всероссийской конференции 2013 г. федеральным органам законодательной и исполнительной власти предложено:

- реализовать перечень мер экономического стимулирования рационального использования отходов;
- включить в перечень возможных объектов соглашений ГЧП объекты размещения отходов горно-промышленных и связанных с ним перерабатывающих производств [13].

В рамках реализации Стратегии⁶ законодатель настаивает на том, что целесообразно предусмотреть в перечне основополагающих принципов: применение экономических и административных рычагов воздействия на процессы управления отходами, а также активное вовлечение механизмов государственно-частного партнерства на этапе образования отходов⁷. В качестве ключевых направлений, способствующих привлечению инвестиций в освоение техногенных месторождений, выделяются: разработка мер экономического регулирования, направленных на развитие отрасли, и установление стимулов для участников и предприятий, осуществляющих переработку отходов, в форме льгот и преференций. Данные меры призваны создать благоприятные условия для развития перерабатывающей инфраструктуры и повышения инвестиционной привлекательности проектов в сфере обращения с отходами.

В советскую эпоху вопросы экономического стимулирования утилизации побочных продуктов и отходов производства также находились в центре внимания. Главной задачей стимулирующих мер являлось повышение мотивации предприятий к реализации деятельности, ориентированной на снижение ресурсозатратности и повышение экологической безопасности производственных процессов⁸, а именно:

- рациональное использование полезных ископаемых;
- более полное извлечение и использование сопутствующих полезных ископаемых, вскрышных и вмещающих пород, отходов первичной переработки;
- предотвращение загрязнения окружающей среды;
- ограничение отчуждения земель для хранения попутных продуктов и отходов⁹.

⁶ Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. Распоряжение от 25.01.2018. № 84-р. М.; 2018.

⁷ Федеральный закон №89-ФЗ «Об отходах производства и потребления».

⁸ Постановление Совета Министров СССР от 25.01.1980 № 65 «О мерах по дальнейшему улучшению использования вторичного сырья в народном хозяйстве»; Постановление Совета Министров РСФСР от 7 мая 1980 г. № 237 «О мерах по дальнейшему улучшению использования вторичного сырья в народном хозяйстве РСФСР».

⁹ Методические рекомендации по экономическому стимулированию комплексного использования попутно добываемого сырья и отходов обогащения. Донецк: ИЭП АН УССР; 1986. С. 5.

³ UNEP (2011). *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*. United Nations Environment Programme.

⁴ Областная целевая программа «Переработка техногенных образований Свердловской области». 1996; Республиканская целевая программа «Экология и природные ресурсы Республики Башкортостан (на 2004–2010 годы и период до 2015 года)». Уфа; 2004; Целевая федеральная программа «Отходы». М.; 1996.

⁵ Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 N 89-ФЗ.



Для мотивации утилизационных мероприятий применялись разнообразные механизмы, включая установление цен, разработку стратегий вовлечения вторичного сырья в экономический цикл, а также создание и распределение фонда материального стимулирования для сотрудников, задействованных в процессах переработки отходов. Преимущественно использовались директивные методы управления процессом утилизации, характерные для плановой экономики.

Считается, что первой попыткой внедрения экономических методов управления охраной окружающей среды является постановление ЦК КПСС и Правительства СССР от 07.01.88 г. «О коренной перестройке дела в охране природы в стране». В данном документе акцент был сделан на приоритете использования именно экономических методов в регулировании и управлении природопользованием и охраной окружающей среды. Впервые нормативное установление экономических инструментов регулирования экологической сферы в части регулирования деятельности с отходами было осуществлено в разделе III Закона РСФСР «Об охране окружающей природной среды». Указанный раздел регламентировал использование платежей за негативное воздействие на окружающую среду, включая плату за размещение отходов производства и потребления, а также определял порядок финансирования целевых экологических программ, реализуемых на разных уровнях государственного управления – от регионального до федерального¹⁰. Данные меры были направлены на стимулирование природоохранной деятельности и снижение антропогенной нагрузки на экосистемы. Однако, по общему мнению специалистов, они не были развиты и не сыграли той роли, которая на них возлагалась. С переходом к рыночным отношениям акцент смещается к таким экономическим рычагам, как: налогообложение, денежно-кредитные отношения и т.д.¹¹ [14]. В целом ситуация осталась прежней. Изменения в ФЗ «Об отходах производства и потребления» и ФЗ «Об охране окружающей среды» специалистами признаются неэффективными по причине того, что данные поправки не являются нормами прямого действия, а значит необходима последующая разработка дополнительных подзаконных актов¹² [15].

Существующий экономический механизм в области утилизации отходов характеризуется как неэффективный [16, 17]. В действующем законодательстве элементы экономического стимулирования представлены бессистемно, что проявляется в преобладании декларативных положений, не получивших дальнейшей ре-

¹⁰ Закон РСФСР от 19.12.1991 № 2060-1 «Об охране окружающей природной среды».

¹¹ Белик И. С. Экономический механизм стимулирования использования отходов производства. [Автореф. дис. ... канд. экон. наук] Екатеринбург; 1993. 24 с.

¹² Ястребкова О. А. Организационно-правовые проблемы охраны окружающей среды от загрязнения отходами горнодобывающего и связанных с ним перерабатывающих производств. [Дис. ... канд. юрид. наук]. Екатеринбург; 2000. 189 с.

ализации¹³ [18]. Ответственные органы, такие как Комитет Государственной Думы по природным ресурсам и Министерство природных ресурсов и экологии РФ, не реализовали свои функции по совершенствованию законодательной базы в части экономического стимулирования деятельности по управлению отходами производства и потребления, а также устранению экологического вреда, возникшего в прошлом [19]. В результате соответствующие федеральные законы в данной области до настоящего времени не были приняты [20]. Это обстоятельство препятствует формированию эффективной системы обращения с отходами и созданию стимулов для развития соответствующей отрасли.

Сожаление вызывает и тот факт, что Федеральный закон №209-ФЗ «О развитии малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации», утверждённый 24.07.2007, исключает МП, связанное с недропользованием, в том числе с освоением техногенных месторождений, из числа субъектов, которые могут получать льготы и преференции от государства. Более того, в соответствии с положениями Федерального закона № 224-ФЗ от 13.07.2015 «О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», малые предприятия (МП) исключены из перечня субъектов, правомочных заключать соглашения о государственно-частном партнерстве (ГЧП). Данное законодательное ограничение лишает МП возможности участвовать в реализации проектов ГЧП и препятствует доступу к финансовой поддержке со стороны институтов развития, созданных для стимулирования экономического роста и инноваций. Это, в свою очередь, может ограничивать конкуренцию в сфере ГЧП и снижать вовлечение малого бизнеса в проекты, имеющие важное социально-экономическое значение.

Вполне естественным в этих условиях является обращение к мировому опыту использования экономических рыночных рычагов, стимулирующих переработку ТМО. При этом речь должна идти о разумном восприятии положительного опыта промышленно развитых зарубежных стран, а не о слепом заимствовании.

Об эффективности используемых в этих странах экономических механизмов, стимулирующих переработку отходов, можно судить исходя из статистики: так, при помощи новых технологических решений в зарубежных государствах было извлечено более 40 % годового объема меди, 35 % золота и других стратегически важных металлов. По свидетельству исследователей, эта доля постоянно увеличивается, в отдельных случаях она превышает добычу из первичного сырья. При этом затраты на извлечение металлов снижаются в 1,5–3,0 раза [21, 22]. В материальных балансах Соединенных Штатов Америки и Японии вторичное сырье обеспечивает до 26 % входящих ресурсов. В большинстве развитых экономик вклад переработанных материалов варьируется от 16 до 20 %. Данные показатели

¹³ Селезнев С. Г. Отвалы Аллареченского месторождения сульфидных медно-никелевых руд – специфика и проблемы освоения. [Дис. ... канд. геол.-минер. наук] Екатеринбург; 2013. 141 с.



отражают растущую значимость вторичной переработки в обеспечении производственных нужд и сокращении зависимости от первичных источников сырья [23]. По данным В.В. Чайникова, переработка золошлаковых отвалов составляет: в Великобритании – 53 %, во Франции – 65 %, Германии – 75 %, США – 25 %; переработка доменных шлаков – в Германии, США, Великобритании – до 100 %, Франции – до 90 % [24]; переработка сталеплавильных шлаков составляет в Японии – 55 %, в США – до 35 % [25]. Заслуживает несомненного одобрения опыт государственной поддержки предпринимательской деятельности, позволившей получить существенные результаты в области глубокой переработки и захоронения отходов производства и потребления. Например, уже упомянутая Германия предлагает широкий набор инструментов экономического стимулирования, также в стране предоставляется свободный доступ к информации об отходах и технологиях их переработки, действуют специализированные биржи и аукционы [26]. В американской практике – в наличии использование субсидий, налоговых льгот, займов, инвестиционных налоговых кредитов и т.д. [27].

Некоторые государства используют непосредственно прямые государственные инвестиции в сферу обращения с отходами производства и потребления. Так, при условии применения новых прогрессивных технологий предприниматели из Швеции могут получить прямые субсидии (50 % от сметы) на строительство или реновацию их предприятий по переработке отходов. Немецкий подход, аналогично шведскому, предполагает внедрение безотходных технологических процессов [28]. В Японии реализуется государственное финансирование централизованных исследовательских проектов, направленных на разработку методов утилизации отходов. Также предприниматели из Японии, занимающиеся переработкой отходов, применяют специальную систему амортизации для списания природоохранного оборудования и пользуются местными налоговыми льготами; также подобные предприятия могут пользоваться заемными средствами у специализированных банков и фондов на льготных условиях и по сниженным процентным ставкам. Аналогичные механизмы реализованы в Германии: немецкий компенсационный банк выдает целевые кредиты предприятиям на проекты по утилизации и переработке отходов производства и потребления. Если же проекты затрагивают переработку отходов разных отраслей промышленности, то предприниматели в таком случае могут обратиться в специализированные региональные фонды. Все эти инструменты экономического механизма по регулированию сферы обращения с отходами производства и потребления направлены на создание условий, при которых предпринимателям выгоднее перерабатывать отходы, нежели платить отчисления и штрафы на их складирование, захоронение и ликвидацию. Но за рубежом получил развитие не только экономический инструментарий, стимулирующий переработку отходов, но и правовой: еще в прошлом XX веке в Австрии и Германии были приняты отдельные законодательные акты: «О циркулярной экономике и отходах»

(Германия) и декрет «Об упаковке» (Австрия). Нормативно-правовые акты преследуют цель возложения на производителя всеобъемлющей ответственности за продукцию на всех этапах ее жизненного цикла. Внедрение указанных законодательных норм способствовало сокращению объема отходов и переработанной тары. В частности, в Австрии применение данного подхода привело к существенным результатам: за десятилетний период зафиксировано трехкратное уменьшение общего количества отходов и упаковки, а для отдельных категорий отходов снижение достигло 30–40 раз [28]. Это свидетельствует об эффективности концепции расширенной ответственности производителя в решении проблем, связанных с утилизацией отходов и охраной окружающей среды.

Организационный механизм также был скорректирован с целью интенсификации деятельности по переработке отходов: были созданы отдельные организации в разных странах. Например, в Японии ответственность за управление отходами возложена на Министерство экономики, торговли и промышленности (МЭТП). Ключевым элементом системы является центр Clean Japan Center, находящийся в подчинении МЭТП. Этот центр осуществляет координацию деятельности предпринимателей, некоммерческих организаций и государственных учреждений в области сбора и вторичной переработки промышленных и бытовых отходов. Он также проводит экспертизу разрабатываемых технологий и оказывает поддержку местным органам власти в создании систем утилизации отходов. Кроме того, центр ведет специализированную базу данных по технологиям утилизации отходов, применяемым в Японии и за рубежом¹⁴. В Соединенных Штатах Америки в структуре Министерства внутренних дел функционирует специальное подразделение, занимающееся переработкой отходов и контролем за соблюдением Закона о контроле за добычей угля и утилизацией отходов¹⁵. Во Франции вопросы вторичного использования отходов решаются совместно национальными и региональными органами по рекуперации и утилизации отходов¹⁶ (Agence de la transition écologique, 2024) [29]. В Российской Федерации несмотря на остроту проблемы отходов данная сфера не находится под централизованным государственным регулированием [30, 31].

Таким образом, учитывая особенности экономического механизма регулирования недропользования в части ТМО, встает **вопрос о необходимости разработки более эффективного инструментария данного механизма (в том числе и для малых предприятий), стимулирующего привлечение инвестиций в освоение техногенных месторождений**. Цель обусловила постановку следующих исследовательских задач: провести обзор инструментов экономического

¹⁴ Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan, 2025. URL: <https://www.meti.go.jp/english/>

¹⁵ Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, 2025. URL: <https://www.osmre.gov/>

¹⁶ Agence de la transition écologique, 2024. URL: <https://www.ademe.fr/>

механизма, стимулирующих переработку ТМО, и разработать как авторский методический подход к обоснованию оптимального перечня инструментов для освоения ТМ, так и модель экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО.

Методы

Методологические вопросы анализа социально-экономических систем, включая экономический анализ, в последние годы находятся в центре научной дискуссии, о чем свидетельствует значительное количество публикаций по данной тематике Новой экономической ассоциации, ключевые из которых отражены на сайте общества «ученых-экономистов различных научных школ и направлений на всем пространстве Российской Федерации»¹⁷, которые утверждают, что общественные науки сегодня претерпевают методологический кризис. Исследование социально-экономических или гуманистических систем, таких как система регулирования сферы обращения с отходами, система управления недропользованием и другие смежные направления, являющиеся исследовательским объектом в текущей работе, требуют использовать широкий арсенал инструментов. Данный арсенал не только учитывает методы математической статистики и теории игр, но и включает в себя другие специфические

методы описания гуманистических сложных систем – форсайт-методы (в переводе с английского – взгляд вперед, предвосхищение будущего). В методологии родоначальника Р. Поппера¹⁸ [32, 33] форсайт-методы исследований по своей сути представляют собой некую иерархическую структуру конечных методов (рис. 2), используемых при проведении научного исследования; все форсайт-методы возможно традиционно подразделить на качественные (методы, способствующие субъективному пониманию и оценке объектов исследования), количественные (методы, при которых возможно объективное измерение исследуемых явлений с последующим применением математических и статистических видов анализа) и смешанные (данные методы способствуют использованию количественных измерений качественных оценок, мнений, суждений анкетированных и экспертов).

Достоинством методологии форсайта следует признать множественную вариативность в применении различных методов исходя из поставленных учеными цели и задач для верификации результатов исследования. В текущей работе был использован следующий перечень форсайт-методов исследования для разработки наиболее эффективного инструментария экономического механизма (в том числе и для малого бизнеса), стимулирующего привлечение инвестиций

¹⁷ Новая экономическая ассоциация. URL: <https://econorus.org/sub.phtml?id=182>

¹⁸ Rafael Popper. URL: <https://scholar.google.co.uk/citations?user=Z5gep-0AAAAJ&hl=es>



Рис. 2. Иерархическая структура форсайт-методов исследования
Источник: составлено авторами по исследованиям Р. Поппера [32, 33].



в освоение техногенных месторождений: 1) для исследования инструментов экономического механизма, стимулирующих переработку техногенных минеральных образований, были применены качественные методы: литературный обзор и участие в конференциях и семинарах по проблематике; 2) с целью разработки как авторского методического подхода к обоснованию оптимального перечня инструментов для освоения техногенных месторождений, так и модели экономического механизма, стимулирующего переработку техногенных минеральных образований, использовались все виды форсайт-методов исследования: и мозговой штурм, семинары (качественные методы), и метод Дельфи (смешанный), а также метод построения моделей/условных примеров (количественный). Стоит отметить, что модель экономического механизма, стимулирующая переработку ТМО (в том числе и для малых предприятий), была построена по результатам исследований всех обозначенных выше методов, так как учитывала результаты в том числе литературного обзора и семинаров/конференций.

Результаты и обсуждение

При помощи поиска и использования метода контент-анализа названий и аннотаций по ключевым словам: «экономический инструментарий», «ТМО», «отходы недропользования», «малый бизнес», «малые предприятия», «налоговое стимулирование», «ГЧП» и др., было отобрано порядка 50 научных работ. Информационной базой исследования стали научные труды как отечественных, так и зарубежных ученых по проблематике, представленные в библиотеках и наукометрических базах Scopus, WoS (на базе ResearchGate), а также на портале eLibrary. Это позволило реализовать научный поиск в логике исследования по разработке наиболее эффективного инструментария экономического механизма (в том числе и для малого бизнеса), стимулирующего привлечение инвестиций в освоение техногенных месторождений.

1. Обзор инструментов экономического механизма, стимулирующих переработку ТМО

Базовый экономический инструментарий, стимулирующий переработку ТМО в целом, в том числе и для малого бизнеса, сводится к следующему списку: 1) налог на прибыль; 2) НДС; 3) НДС; 4) разовый платеж; 5) списание затрат; 6) субсидии; 7) ссуды; 8) налог на имущество; 9) аренда за пользование имуществом муниципалитета; 10) кредиты; 11) ГЧП. Следует отметить, что общий перечень инструментов экономического механизма и логика его конструирования не зависят от размера компании: будь то малый, средний или крупный бизнес, тем не менее их эффективность для разных размеров компаний будет варьироваться. Как уже было отмечено выше, единственное различие по списку инструментов в части малых предприятий – это невозможность использования механизма ГЧП. Данный инструмент требует корректировки существующей нормативно-правовой базы страны. В остальном весь перечень экономического инструментария идентичен. В Российской

Федерации ввиду недостаточной эффективности существующих экономических стимулов для вторичной переработки отходов наблюдается активизация научно-исследовательской деятельности, направленной на модернизацию соответствующих механизмов, что, в свою очередь, генерирует значительное количество предложений по внесению изменений в нормативно-правовую базу. Преобладающая часть предложений касается оптимизации налоговой политики и финансово-кредитной системы (табл. 1). Анализ представленных данных свидетельствует о приоритетном внимании к налогу на прибыль и налогу на добычу полезных ископаемых (НДПИ). В частности, предлагается освобождение от налога на прибыль, получаемую от реализации продукции, произведенной из техногенного сырья. В ряде случаев эксперты рекомендуют установление данной льготы на период от 1,5 до 2 лет при создании малых предприятий. Относительно НДС существуют различные точки зрения: от полной отмены до снижения налоговых ставок или введения понижающих коэффициентов. Негативное отношение к НДС неоднократно выражалось в рекомендациях по совершенствованию порядка исчисления данного налога, направленных в органы государственной власти. Несмотря на это ни одно из предложенных изменений не было одобрено. Существующий фискальный характер НДС препятствует стимулированию переработки отходов. Необходима либо полная отмена налога, либо пересмотр методики его исчисления. Представляют интерес предложения об отмене разового платежа и привлечении государственных институтов развития для финансирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в данной сфере.

В большинстве научных работ акцент делается на изучении отдельных элементов экономического механизма. К примеру, в работе¹⁹ автор посвящает свои исследования оптимизации системы платежей за негативное воздействие на окружающую среду. В другом исследовании²⁰ детально изучается взаимодействие государственных органов и нефтегазовых компаний в контексте государственно-частного партнерства. Еще одна работа²¹ анализирует методологию формирования цен на побочные продукты производственной деятельности. В исследовании [34] автор оценивает результативность программ, финансируемых из целевых источников. В научной работе [35] анализируется возможность использования ГЧП в качестве инструмента экономического механизма регулирования деятельности в сфере недропользования, в том числе субъектами малого предпринимательства.

¹⁹ Умеров Р.З. Механизмы экономического совершенствования управления промышленными отходами в регионах. [Автореф. дис. ... канд. экон. наук] М.; 2000. 25 с.

²⁰ Ледовских В.А. Экономический механизм государственного регулирования нефтеперерабатывающего комплекса России. [Автореф. дис. ... канд. экон. наук] СПб.; 2010. 20 с.

²¹ Белик И.С. Экономический механизм стимулирования использования отходов производства. [Автореф. дис. ... канд. экон. наук] Екатеринбург; 1993. 24 с.



Ограниченность доступных финансовых ресурсов обуславливает необходимость определения приоритетности предприятий при распределении государственной поддержки. В качестве одного из подходов можно рассмотреть методику, предложенную в исследовании²², в которой предлагается классифицировать потенциальных получателей финансовой помощи, демонстрирующих положительные финансовые по-

²² Пахальчак Г.Ю. Совершенствование экономического механизма переработки отходов горнодобывающего и перерабатывающего производств. [Автореф. дис.... канд. экон. наук] Екатеринбург; 1998. 19 с.

казатели, основываясь на объеме предотвращаемого экономического ущерба, и выделять финансирование пропорционально этой величине. Таким образом, вероятность получения государственной поддержки прямо пропорциональна потенциальному предотвращенному ущербу. При оценке предотвращаемого ущерба учитывается ряд факторов, включая потери, связанные с отчуждением земельных участков, негативные последствия загрязнения атмосферного воздуха, водных объектов и почвенного покрова, а также риски увеличения заболеваемости и смертности населения, связанные с ухудшением экологической обстановки.

Таблица 1

Инструменты экономического механизма, стимулирующие переработку ТМО

Авторы	Экономические инструменты, стимулирующие переработку ТМО
Надымов Д. С. ²³	Вычет из суммы НДС затрат на геологическое изучение недр; Отмена разового платежа
Чернявский А. Г. [12]	Освобождение от НДС
Кубарев М. С., Игнатъева М. Н. [16]	Освобождение товарной продукции от налога на прибыль, полученной за счет ТМО; Снижение ставок налогов или полное освобождение на 1,5–2 года при внедрении новых технологий, полное освобождение при внедрении экологически чистых технологий (инвестиционный налоговый кредит); Субсидия для покрытия расходов на разработку экологически чистых технологий и на выплату процентов по заемным средствам; Ссуды на установку оборудования экологически чистых технологий; Снижение ставок налога на имущество или полное освобождение; Снижение ставок аренды за пользование муниципальным имуществом или полное освобождение; Льготные кредиты (создание залогового фонда, гарантом которого выступает правительство области)
Киперман Ю. А., Комаров М. А. [30]	Освобождение от налога на прибыль и НДС
Селезнев С. Г., Болтыров В. Б. [39]	Отмена налога на прибыль
Мирзаханов Г. С. [40]	Снижение налогооблагаемой базы на прибыль при приобретении нового технологического оборудования; Отмена НДС; Списание затрат на изучение техногенных объектов в текущем году
Боярко Г. Ю. [41]	Снижение в 2 раза налоговой ставки НДС
Клемезь Т. Н. [42]	Учет коэффициентов экологичности при определенном размере НДС
Селезнев С. Г. [43]	Освобождение от налога на прибыль и НДС
Сухорученков А. И., Корнилов Н. П., Евсин В. Г. [44]	Освобождение от налога на прибыль той части дохода, которая направлена на создание прогрессивных технологий; Снижение ставок НДС
Ochilov S., Kadirov V., Umirzoqov A., Karamanov A., Xudayberganov S., Sobirov I. [45]	Списание затрат на изучение техногенных объектов (из налогов)
Machado C. [46]	Отмена налога на прибыль; Льготные кредиты
Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Dushin A. V., Strovsky V. E. [35]	Применение инструмента ГЧП
Potravný I., Novoselov A., Novoselova I., Gassiy V., Nyamdorj D. [47]	Снижение затрат на изучение ТМО
Butkevich G. R. [48]	Субсидия для покрытия расходов на разработку экологически чистых технологий; Ссуды на установку оборудования экологически чистых технологий; Льготные кредиты и госгарантии
Goldyrev V., Naumov V., Kovyrzina U. [49]	Снижение затрат на изучение ТМО

²³ Надымов Д.С. Разработка организационно-экономического механизма освоения техногенных месторождений с привлечением потенциала государственных инструментов развития. [Дис. ... канд. экон. наук] СПб.; 2015. 157 с.



Рис. 3. Категории эффективности проектов по переработке отходов

Источник: составлено авторами по [38].

Финансовое выражение стоимости земли, выведенной из продуктивного использования, служит мерой экономического ущерба от ее изъятия. Ключевые методологические положения оценки такого ущерба основываются на следующих принципах: во-первых, приоритет отдается результативности эффективного применения земельных активов; во-вторых, учитываются только потери, связанные с утратой функциональных возможностей земельного участка; в-третьих, необходимо учитывать временной аспект, принимая во внимание изменение стоимости земли с течением времени; в-четвертых, допускается использование различных методов оценки, соответствующих действующему законодательству и нормативным актам.

Реквизиция может затрагивать территории, используемые в сельском хозяйстве, лесоводстве, охотничьем хозяйстве, а также земли, расположенные в границах населенных пунктов. Методологии оценки экономического ущерба дифференцируются в зависимости от категории земельного участка. При определении финансового бремени, обусловленного загрязнением природных ресурсов (атмосферного воздуха, водных объектов и почвенного покрова), целесообразно использование агрегированных показателей. В процессе исчисления экономического ущерба, вызванного ростом заболеваемости среди населения, возможно применение методик, описанных в работе [36]. Применение принципа предотвращаемого экономического ущерба как критерия обусловлено необходимостью улучшения экологической обстановки в регионах с развитой промышленностью, характеризующихся значительным накопленным экономическим ущербом и неблагоприятной экологической ситуацией [37]. Представленные рекомендации были успешно апробированы в Свердловской области в рамках реализации целевой программы «Переработка техногенных образований Свердловской области» (1996). Однако данная методология не учитывает экономического эффекта и рентабельности осуществляемых инвестиций.

В работе [38] авторы подчеркивают важность переработки отходов с точки зрения экономики, экологии, социума и положительных экстерналий (рис. 3).

В целях стимулирования вторичной переработки отходов предлагается формирование региональных фондов поддержки, финансируемых за счет целевых отчислений от прибыльных коммерческих инициатив. Приоритетное финансирование следует направлять на проекты с экономическим и экологическим эффектом. Проекты с экономическим, экологическим и социальным эффектом целесообразно поддерживать из средств целевого фонда и фондов содействия занятости населения. Финансирование проектов с кумулятивным эффектом и положительными экстерналиями оправдано при наличии значительного положительного влияния на смежные отрасли экономики. Помимо эффектов критерии ранжирования проектов все-таки должны учитывать и региональные особенности, и контекст их реализации. Так, в регионах с неблагоприятной экологической обстановкой в соответствии с принципами устойчивого развития, предложенными ООН, необходимо учитывать как экономическую эффективность, так и экологическое воздействие. Но если в регионе наблюдается риск социальной напряженности, то в этом случае стоит ориентироваться в первую очередь на получение социальных выгод и эффектов от освоения техногенных месторождений, однако данный вид эффекта достаточно тяжело поддается стоимостной оценке. Оценка же положительных экстерналий – эффекта в смежных отраслях экономики представляет собой еще более сложную и трудоемкую задачу. Отсюда базовыми критериями принято считать экономический и экологический эффекты. Эта же точка зрения представлена в работе²⁴, правда к основным критериям для предоставления ресурсов потенциальным недропользователям, которых дифференцируют на государственных и частных инвесторов, в целях отработки техногенных месторождений предлагается добавить еще два – это технологическую и организационную основы проекта (рис. 4). При этом автор никак не обосновывает предлагаемые инструменты, акцентируя свое исследование на алгоритме доступа к инвестициям.

²⁴ Мудрецов А.В. Экономическое обоснование приоритетности инвестиционных проектов по переработке и утилизации отходов горного производства. [Дис. ... канд. экон. наук] М.; 2003. 138 с.

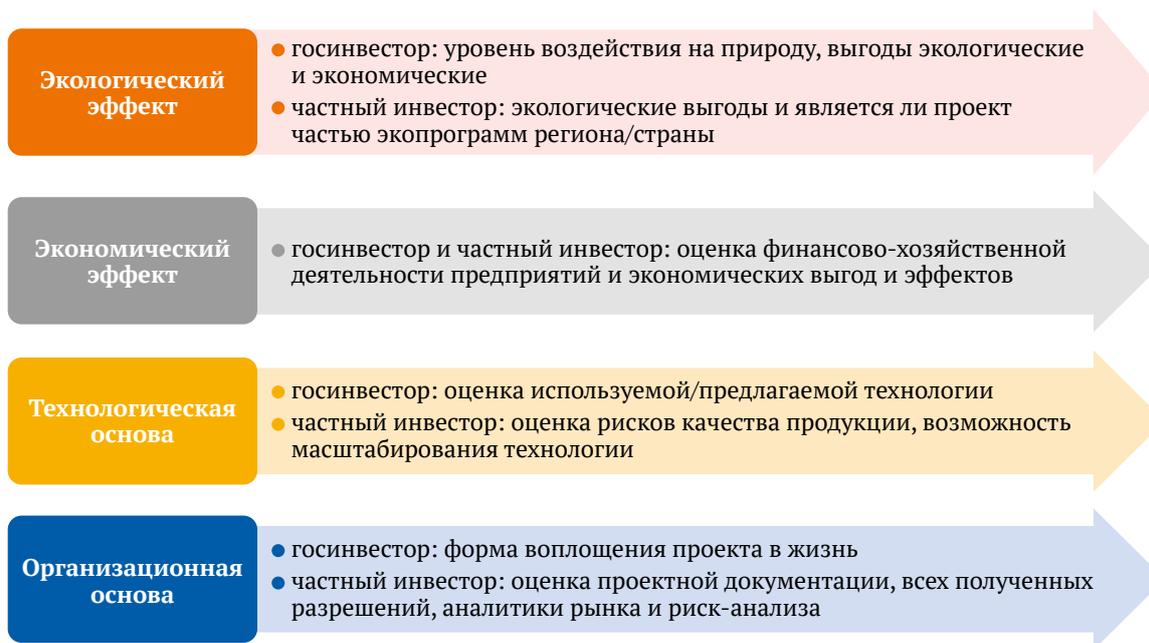


Рис. 4. Критерии оценки проектов по отработке техногенных месторождений для доступа к инвестициям
 Источник: составлено авторами по работе Мудрецова А. В. Экономическое обоснование приоритетности инвестиционных проектов по переработке и утилизации отходов горного производства. [Дис. ... канд. экон. наук] М.; 2003. 138 с.

Тематика формирования эффективного пула инструментов экономического механизма отработки техногенных месторождений получила развитие и в более поздних работах²⁵. В первой работе предлагается ряд эффективных инструментов исходя из критериев экономической и экологической эффективности обрабатываемых отходов. Так, к высокорентабельным отходам предлагается применять следующие стимулы: разного рода кредиты, в том числе налоговые, и задействовать фонд поддержки экопредпринимательства. Для среднерентабельных отходов – льготы при налогообложении, кредитовании (гарантии), ускоренную амортизацию и вновь фонд поддержки экопредпринимательства. Для низкорентабельных отходов – опять же фонд поддержки, субсидии, дотации и налоговые льготы. Обоснования рекомендуемых стимулирующих инструментов в исследовании не наблюдается, чего нельзя сказать о второй работе, где предлагаемый стимулирующий инструментарий увязан со стадиями НИОКР, при этом итоговый выбор конкретного набора инструментов автор рекомендует осуществлять на базе оценки коммерческой и бюджетной эффективности, а именно максимизировать коммерческую в условиях положительной или в крайнем случае нулевой бюджетной эффективности.

²⁵ Богатырева Е.Ю. Инструментарий развития экологического предпринимательства в сфере управления отходами. [Автореф. дис. ... канд. экон. наук] Екатеринбург; 2015. 28 с.; Надымов Д.С. Разработка организационно-экономического механизма освоения техногенных месторождений с привлечением потенциала государственных инструментов развития. [Дис. ... канд. экон. наук] СПб.; 2015. 157 с.

В работе Ч.Ф. Катерине Йешиа²⁶ ранжирование инвестиционных проектов для определения приоритета в последующем финансировании предлагается осуществлять на основе одиннадцати критериев, оцениваемых в баллах (табл. 2).

Таблица 2

Оценочные критерии выбора инвестиционных проектов

Критерий	Оценка (балл)
Чистый дисконтированный доход (ЧДД)	10
Привлечение местного населения, новые рабочие места	10
Экологический эффект	9
Оценка применяемой в проекте технологии	9
Эколого-экономическая эффективность (отношение экологического эффекта к капитальным вложениям)	8
Степень подготовки проектной документации	7
Индекс доходности	6
Положительное отношение органов власти и местного социума к проекту	6
Период окупаемости инвестиций	5
Внутренняя норма доходности	5
Масштаб экологических последствий проекта	4

²⁶ Чавез Феррейра Катерине Йешиа. Формирование экономического механизма привлечения инвестиций в проекты комплексного освоения техногенных месторождений. [Дис. ... канд. экон. наук] М.; 2020. 156 с.

Авторы рассматривают восемь источников финансирования и обосновывают оптимальную структуру финансирования для рассматриваемых инвестиционных проектов с использованием долевого финансирования. В качестве источников финансов авторы выделяют:

- федеральный бюджет;
- региональные бюджеты;
- деньги недропользователей;
- средства инвесторов;
- кредиты, займы;
- зеленые облигации;
- средства ГЧП;
- компенсационные фонды (возмещение вреда КМНС);
- репатриация активов из офшоров.

Для достижения намеченной цели авторы считают целесообразным применение трехступенчатого алгоритма. На первом этапе осуществляется идентификация приоритетных проектных инициатив на основе потребностей и ожиданий ключевых стейкхолдеров. Затем производится ранжирование проектов согласно установленным критериям. Заключительным этапом является отбор проектов для реализации с учетом возможности привлечения долевого финансирования, что позволяет оптимизировать распределение ресурсов и снизить финансовую нагрузку²⁷.

2. Авторский методический подход к обоснованию оптимального перечня инструментов для освоения ТМ. Модель экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО

Обзор академических источников по тематике совершенствования экономического инструментария, стимулирующего разработку техногенных месторождений как малым, средним, так и крупным бизнесом, продемонстрировал достаточно фрагментарное решение данной проблемы, при этом набор предлагаемых инструментов часто не обоснован и не классифицирован, тогда как исследователи больше сосредоточены на научном усовершенствовании алгоритма доступа к финансовым ресурсам для реализации проектов по вовлечению техногенных месторождений в хозяйственный оборот. Тем не менее все авторы сходятся во мнении, что в условиях рыночной экономики базовыми критериями при оценке проектов и последующего определения набора инструментов являются экономическая эффективность и экологический эффект. Авторским коллективом данного исследования уже была произведена попытка разработки простого и удобного в применении методического подхода к обоснованию оптимального перечня инструментов для освоения техногенных месторождений²⁸, но в нем не была учтена бюджетная эффективность в каче-

стве критерия для ранжирования проектов. Тем не менее в условиях исполнения федерального бюджета в 2024 г. с дефицитом в 1,7% ВВП и последующего принятия в 2025 г. государственного бюджета опять же с дефицитом в размере 3,225 трлн руб. (1,5% ВВП) и текущих расходов на СВО критерий бюджетной эффективности становится первостепенным, за ним следуют коммерческий или экономический по причине санкций и возросшей роли сырьевых ресурсов, а уже далее – экологический. Это подтверждают результаты мозгового штурма 32 экспертов, 12 из которых являются представителями публично-правовых образований, занимающихся вопросами управления деятельностью по обращению с отходами производства и потребления, а также вопросами регулирования природопользования, в том числе недропользования. Так, на первом этапе мозгового штурма была определена важность критериев оценки инвестиционных проектов в горнодобывающей сфере в части отработки техногенных месторождений. Итоговая структура результатов выглядит следующим образом (рис. 5).

Таким образом, матрица ранжирования проектов для получения ресурсной поддержки приобретает модифицированный вид (рис. 6).

На данном рисунке экологический эффект приведен в условных границах ($-\infty$; $+\infty$). Более того, на практике может иметь место и отрицательный экологический эффект ($-\infty$), так как возможны случаи, при которых недобросовестными недропользователями при отработке ТМ наносится такой экологический ущерб, который может перекрывать предотвращаемый. Средние и верхние границы коммерческой (экономической) и бюджетной эффективности приняты на уровне 10, 30 и 100 % исходя из практики инвестиционного анализа и ранжирования проектов. Бюджетная эффективность математически варьируется в пределах (-100 %; 100 %). На рисунке зеленым цветом обозначены проекты высокорейтинговые, рекомендуемые для финансирования в первую очередь при сравнении разных критериев (бюджетная эффективность, коммерческая (экономическая) эффективность и экологический эффект) друг с другом. Желтым обозначены проекты второго порядка с точки зрения приоритетности в доступе к финансовым ресурсам и, соответственно, красным обозначены третьи в очереди группы проектов.

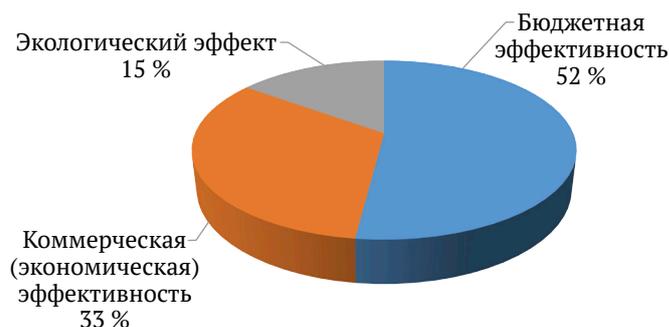


Рис. 5. Результаты мозгового штурма

Источник: составлено авторами.

²⁷ Ross S., Westerfield R., Jordan B. Fundamental of Corporate Finance. 12th Edition. 2019. GCTU Repository. URL: <https://repository.gctu.edu.gh/items/show/720>

²⁸ Комарова О.Г. Инструментарий организационно-экономического механизма освоения техногенных месторождений. [Дис. ... канд. экон. наук] Екатеринбург; 2025. 224 с.

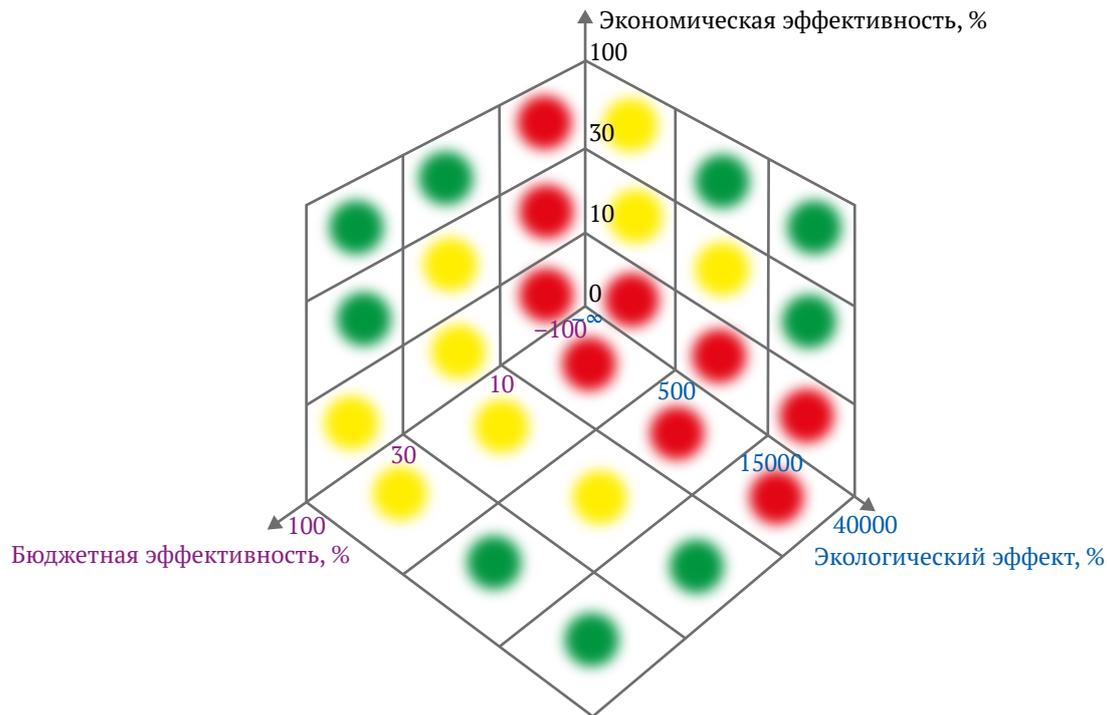


Рис. 6. Ранжирование проектов в целях получения ресурсной поддержки: зеленая группа – приоритетные проекты; желтая группа – последующие проекты; красные – замыкающие проекты
 Источник: составлено авторами.

Если присвоить переменные коммерческой (экономической) эффективности – *Д* с индексом *а*, экологическому эффекту – *Э* с индексом *в*, а коммерческой эффективности – *Б* с индексом *с*, то квадраты плоскости, указанные на графике, можно описать следующим образом: для коммерческой (экономической) эффективности (*ДВа*, *ДСа*, *ДНа*), экологического эффекта (*ЭВв*, *ЭСв*, *ЭНв*) и бюджетной эффективности (*БВс*, *БСс*, *БНс*) соответственно, где вторые буквы В, С, Н обозначают высокий, средний и низкий уровни.

Таким образом, в зеленую зону попадают проекты с координатами оцененных критериев: [*БВс*; *ДВа*]; [*БВс*; *ДСа*]; [*БСс*; *ДВа*]; [*БВс*; *ЭВв*]; [*БВс*; *ЭСв*]; [*БСс*; *ЭВв*]; [*ДВа*; *ЭВв*]; [*ДВа*; *ЭСв*]; [*ДСа*; *ЭВв*]. В желтую зону – [*БСс*; *ДСа*]; [*БВс*; *ДНа*]; [*БСс*; *ДНа*]; [*БВс*; *ЭНв*]; [*БСс*; *ЭНв*]; [*БСс*; *ЭСв*]; [*ДВа*; *ЭНв*]; [*ДСа*; *ЭНв*]; [*ДСа*; *ЭСв*]. В красную – [*БНс*; *ДВа*]; [*БНс*; *ДСа*]; [*БНс*; *ДНа*]; [*БНс*; *ЭНв*]; [*БНс*; *ЭСв*]; [*БНс*; *ЭВв*]; [*ДНа*; *ЭНв*]; [*ДНа*; *ЭСв*]; [*ДНа*; *ЭВв*].

Вторым этапом мозгового штурма явилось обоснование использования конкретных стимулирующих инструментов экономического механизма, регулирующего деятельность по вовлечению техногенных месторождений в хозяйственный оборот. Опрос проводился методом Дельфи (в упрощенной авторской форме Д. Пескова) уже обозначенных выше экспертов. Эксперимент насчитывал пять сессий согласования по каждой из групп проектов, выбору подлежали только те инструменты стимулирования, которые набрали 53 % (больше половины экспертов) и более голосов от общего числа экспертов – т.е. 17 и более человек. Результаты отображены в табл. 3.

Таблица 3

Инструменты стимулирования

Группа проектов (см. рис. 3)	Инструменты стимулирования	Частота выбора экспертами, %
Зеленая группа – приоритетные проекты	Льготные кредиты	97
	Снижение затрат на изучение ТМО	56
	Инвестиционный налоговый кредит	100
	Льготное налогообложение (налог на прибыль, НДС, разовый платеж)	91
Желтая группа – последующие проекты	Льготное налогообложение (налог на прибыль, НДС, разовый платеж)	94
	Списание затрат на изучение ТМО	78
	Государственные гарантии	100
Красная группа – замыкающие проекты	Ссуды	84
	Дотации	91
	Льготное налогообложение (налог на прибыль, НДС, разовый платеж, налог на имущество; земельный налог)	97
	Снижение арендной платы	72
	Списание затрат на изучение ТМО	66

Таблица 4

Сценарии освоения Аллареченского ТМ при использовании различных инструментов господдержки

Результирующий показатель, тыс. руб.	Сценарии						
	0	1	2	3	4	5	6
ЧДД недропользователя	-5072,5	548,4	5370,9	6033,9	12670,1	15557,2	19142,1
ЧДД государства	6135	0	18809,6	18146,6	13839,6	10944,7	5046,2
Суммарный ЧДД	1062,5	548,4	24180,5	24180,5	26509,7	26501,9	24188,3
Инструменты стимулирования	Без поддержки	Нулевой разовый платеж	Нулевой разовый платеж	Нулевой разовый платеж	Нулевой разовый платеж	Нулевой разовый платеж	Нулевой разовый платеж
					Вычет затрат на ГРР из НДС	Вычет затрат на ГРР из налога на прибыль	Нулевая ставка НДС
			Вычет затрат на ГРР из НДС	Вычет затрат на ГРР из налога на прибыль	Льготный займ на НИОКР	Нулевая ставка НДС	Вычет затрат на ГРР из налога на прибыль
							Льготный займ на НИОКР

Источник: составлено по материалам: Надымов Д. С. Разработка организационно-экономического механизма освоения техногенных месторождений с привлечением потенциала государственных инструментов развития. [Дис. ... канд. экон. наук] СПб.; 2015. С. 122.

Проверка полученных результатов методами мозгового штурма и методом Дельфи для желтой группы проектов была проведена путем сравнения с использованным в исследовании Д. С. Надымова²⁹ методом построения моделей (условных примеров). В своей работе Д. С. Надымов решает задачу разработки оптимального выбора инструментов господдержки по стимулированию отработки ТМ на ограниченном множестве допустимых решений при дискретной оптимизации в условиях неопределенности. Для апробации предлагаемых решений он выбрал проект освоения Аллареченского ТМ, отнесенного к желтой группе проектов (см. рис. 3) согласно авторской классификации. Исходя из расчетов максимального показателя ЧДД возможно достичь при 4-м сценарии развития (табл. 4).

По сути с крайне детальными расчетами Д. С. Надымова обоснованные и предлагаемые им инструменты стимулирования отработки ТМ пересекаются с результатами, полученными методами мозгового штурма и методом Дельфи для желтой группы проектов. Отличие состоит в разных показателях уменьшаемого (в текущем исследовании – из прибыли предприятия; в работе Д. С. Надымова – вычет затрат из НДС) при учете затрат на изучение ТМ и реализацию ГРР, а также во включении экспертами в список инструментов государственных гарантий, не учтенных в исследовании Д. С. Надымова. В остальном инструментарий совпадает.

²⁹ Надымов Д. С. Разработка организационно-экономического механизма освоения техногенных месторождений с привлечением потенциала государственных инструментов развития. [Дис. ... канд. экон. наук] СПб.; 2015. 157 с.

Также Д. С. Надымов сравнивает Аллареченское ТМ с двумя условными более крупными месторождениями по запасам: в 1,5 и 1,25 раза соответственно (зеленая группа проектов), и делает вывод, что чистый дисконтированный доход (ЧДД) недропользователя и ЧДД государства в абсолютных значениях может существенно измениться, а значит, вероятно, необходим иной перечень экономических инструментов к применению для роста обоих значений ЧДД, что подтверждается в текущем исследовании, так как для проектов зеленой группы наиболее результативными признаются: банковские кредиты; списание затрат на изучение ТМО и инвестиционный налоговый кредит.

Результатом проведенного опроса ведущих экспертов в области переработки ТМО явился последующий анализ данных табл. 1 для построения общей модели экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО. Первоначально были сгруппированы инструменты по ключевым элементам механизма (табл. 5), что позволило выделить следующие составляющие: прямые инструменты (субсидии, ссуды и др.), косвенные (льготное налогообложение), финансово-кредитные инструменты, программы и ГЧП.

В процессе ранжирования инструментария для переработки ТМО в рамках реализации мозгового штурма было установлено, что эффективность каждого из инструментов зависит от условий реализации. Это обусловило актуальность разработки системы фундаментальных принципов построения экономического механизма, стимулирующего деятельность по освоению ТМ. Так, с точки зрения теории менеджмента предлагается распределение принципов в разрезе функций: планирования, организации, мотивации и контроля.



Отсюда в основе будут лежать принципы: ясности (четкости и понятности сущности и работы каждого из инструментов), транспарентности (прозрачности в управлении инструментами в организационном и правовом аспектах). При условии четкого понимания регулятором и недропользователем сущности и правил применения инструментов, а также ясного распределения ролей и ответственности достигается эффективное функционирование уровней планирования и организации экономического механизма регулирования освоения техногенных месторождений. На уровнях мотивации и контроля предлагается использовать следующие принципы: принцип командной работы, подразумевающий участие как недропользователей, так и публично-правовых образований в организации деятельности по отработке техногенных месторождений, включая стремление государственных структур максимально содействовать недропользователям;

принцип модульности, обеспечивающий возможность простой замены инструментов, их пополнения и исключения; принцип контролируемости, который, будучи связанным с транспарентностью, отличается тем, что транспарентность обеспечивает прозрачность процессов, а контролируемость – управление процессами и их ключевыми параметрами. Завершающим принципом авторской системы выступает принцип эффективности, означающий способность экономического механизма обеспечивать максимальный результат при минимальных затратах для всех заинтересованных сторон: недропользователей, регуляторов, природной среды и общества в целом. Таким образом, принципы выстраиваются в своеобразную пирамиду А. Маслоу (рис. 7), где, соответственно, если нижний уровень принципов не будет выполнен, то и последующие не могут быть реализованы, а значит итоговый принцип (эффективность) не будет достигнут.

Таблица 5

Инструменты, стимулирующие переработку ТМО, в разрезе элементов экономического механизма

Авторы	Экономические инструменты, стимулирующие переработку ТМО	Элементы экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО
Надымов Д. С. ³⁰	Вычет из суммы НДС затрат на геологическое изучение недр	Налоговые льготы
	Отмена разового платежа	Налоговые льготы
Чернявский А. Г. [12]	Освобождение от НДС	Налоговые льготы
Кубарев М. С., Игнатъева М. Н. [16]	Освобождение товарной продукции от налога на прибыль, полученной за счет ТМО	Налоговые льготы
	Снижение ставок налогов или полное освобождение на 1,5–2 года при внедрении новых технологий, полное освобождение при внедрении экологически чистых технологий (инвестиционный налоговый кредит)	Налоговые льготы
	Субсидия для покрытия расходов на разработку экологически чистых технологий и на выплату процентов по заемным средствам	Прямой метод госрегулирования / Госпрограммы
	Ссуды на установку оборудования экологически чистых технологий	Прямой метод госрегулирования / Госпрограммы
	Снижение ставок налога на имущество или полное освобождение	Налоговые льготы
	Снижение ставок аренды за пользование муниципальным имуществом или полное освобождение	Госпрограммы
	Льготные кредиты (создание залогового фонда, гарантом которого выступает правительство области)	Финансово-кредитная политика
Киперман Ю. А., Комаров М. А. [30]	Освобождение от налога на прибыль и НДС	Налоговые льготы
Селезнев С. Г., Болтыров В. Б. [39]	Отмена налога на прибыль	Налоговые льготы
Мирзаханов Г. С. [40]	Снижение налогооблагаемой базы на прибыль при приобретении нового технологического оборудования	Налоговые льготы
	Отмена НДС	Налоговые льготы
	Списание затрат на изучение техногенных объектов в текущем году	Налоговые льготы
Боярко Г. Ю. [41]	Снижение в 2 раза налоговой ставки НДС	Налоговые льготы
Клемезь Т. Н. [42]	Учет коэффициентов экологичности при определенном размере НДС	Налоговые льготы

³⁰ Надымов Д. С. Разработка организационно-экономического механизма освоения техногенных месторождений с привлечением потенциала государственных инструментов развития. [Дис. ... канд. экон. наук] СПб.; 2015. 157 с.

Окончание табл. 5

Авторы	Экономические инструменты, стимулирующие переработку ТМО	Элементы экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО
Селезнев С. Г. [43]	Освобождение от налога на прибыль и НДС	Налоговые льготы
Сухорученков А. И., Корнилов Н. П., Евсин В. Г. [44]	Освобождение от налога на прибыль той части дохода, которая направлена на создание прогрессивных технологий	Налоговые льготы
	Снижение ставок НДС	Налоговые льготы
Ochilov S., Kadirov V., Umirzoqov A., Karamanov A., Xudayberganov S., Sobirov I. [45]	Списание затрат на изучение техногенных объектов (из налогов)	Налоговые льготы
Machado C. [46]	Отмена налога на прибыль	Налоговые льготы
	Льготные кредиты	Финансово-кредитная политика
Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Dushin A. V., Strovsky V. E. [35]	Применение инструмента ГЧП	ГЧП
Potravny I., Novoselov A., Novoselova I., Gassiy V., Nyamdorj D. [47]	Снижение затрат на изучение ТМО	Налоговые льготы / Госпрограммы
Butkevich G. R. [48]	Субсидия для покрытия расходов на разработку экологически чистых технологий	Прямой метод госрегулирования / Госпрограммы
	Ссуды на установку оборудования экологически чистых технологий	Прямой метод госрегулирования / Госпрограммы
	Льготные кредиты и госгарантии	Финансово-кредитная политика
Goldyrev V., Naumov V., Kovyrzina U. [49]	Снижение затрат на изучение ТМО	Налоговые льготы / Госпрограммы


Рис. 7. основополагающие принципы экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО

Источник: составлено авторами.


Рис. 8. Модель экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО

Источник: составлено авторами.



Таким образом, по результатам исследований всех обозначенных выше методов, в том числе экспертного опроса по методу Дельфи, и сформулированных авторских принципов экономической механизм, стимулирующий переработку ТМО, согласно авторской интерпретации примет вид следующей модели (рис. 8).

В части косвенных методов (налоговые льготы) интерес среди экспертов вызвали следующие: полное или частичное освобождение налога на прибыль, полное или частичное освобождение от НДС, отмена разового платежа, отмена налога на имущество и отмена или снижение ставок земельного налога. Определенная неоднозначность касается программирования в сфере обращения с отходами на различных уровнях: федеральные целевые программы, региональные и отраслевые, а также программы местного уровня. Ранее разработка целевых программ рассматривалась в числе инструментов экономического механизма. Однако согласно ФЗ от 22.10.2004 № 122-ФЗ «О внесении изменений в законодательные акты РФ и признании утратившими силу некоторых законодательных актов» целевые программы были удалены из числа экономических инструментов. Возможно это было связано с введением ФЗ «О государственном прогнозировании и программах социально-экономического развития РФ» от 20.07.1995 г., в котором регламентируются требования к прогнозированию и программированию социально-экономического развития, в которое также входит аспект обращения с отходами производства и потребления. Следует поддержать мнение исследователей, которые считают необоснованным исключение программирования, касающегося обращения с отходами, из числа инструментов экономического механизма.

Подающим надежды инструментом экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО, многими исследователями признается государственно-частное партнерство (ГЧП) [50, 51], которое предполагает объединение ресурсов и распределение рисков между государством и бизнесом³¹, что в конечном итоге приводит к получению обоюдной выгоды [52–54].

В числе перспективных форм и методов государственно-частного партнерства могут присутствовать такие, как:

- вложение государственных средств в уставный фонд (капитал) предприятия;
- кредитование со стороны государства реализации инновационных проектов;
- налоговые льготы;
- государственные гарантии;
- дотирование процентной ставки по кредиту³² [55].

³¹ Надымов Д.С. Разработка организационно-экономического механизма освоения техногенных месторождений с привлечением потенциала государственных инструментов развития. [Дис. ... канд. экон. наук] СПб.; 2015. 157 с.

³² Иванов В.С. Государственно-частное партнерство как фактор государственной поддержки инновационного развития региона и предприятий. [Автореф. дис. ... канд. экон. наук] СПб.; 2009. 18 с.

Заключение

Таким образом, цель исследования, заключающаяся в разработке более эффективного инструментария экономического механизма (в том числе для малого бизнеса), стимулирующего привлечение инвестиций в освоение техногенных месторождений, достигнута путем решения следующих задач: проведен анализ инструментов экономического механизма, стимулирующих переработку ТМО; разработаны авторский методический подход к обоснованию оптимального перечня инструментов для освоения ТМ и модель экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО. В исследовании авторский методический подход был усовершенствован за счет учета трех критериев, приоритетность которых в современных геополитических условиях для РФ убывает в следующей последовательности: 1) бюджетная эффективность, 2) коммерческая (экономическая) эффективность, 3) экологический эффект.

Предложенная гипотеза о том, что эффективный инструментарий экономического механизма (в том числе для малого бизнеса) будет стимулировать привлечение инвестиций в освоение техногенных месторождений, доказана зарубежной практикой и результатами проведенного мозгового штурма 32 экспертов, 12 из которых являются представителями публично-правовых образований, занимающихся вопросами управления деятельностью по обращению с отходами производства и потребления, а также вопросами регулирования природопользования, в том числе недропользования, остальные – представители академического и бизнес-сообщества.

Результаты опроса экспертов по методу Дельфи (в упрощенной авторской форме Д. Пескова) продемонстрировали следующий рейтинг эффективных инструментов, в том числе и для малого бизнеса, для трех групп проектов по отработке ТМО:

– для зеленой группы проектов наиболее эффективными и предпочтительными признаны инвестиционный налоговый кредит (100%), за ним следует банковский кредит (97%), далее льготное налогообложение (налог на прибыль, НДС, разовый платеж) (91%) и замыкает рейтинг – списание затрат на изучение ТМ (56%);

– для желтой группы проектов максимально предпочтительным оказался инструмент государственных гарантий (100%), на втором месте – льготное налогообложение (налог на прибыль, НДС, разовый платеж) (94%) и на третьем – списание затрат на изучение ТМ (78%);

– для последней красной группы проектов инструменты экономического механизма расположились в следующем порядке с позиции убывания эффективности и предпочтительности их использования: льготное налогообложение (налог на прибыль, НДС, разовый платеж, налог на имущество, земельный налог) (97%), дотации (91%), ссуды (84%), снижение арендной платы (72%), списание затрат на изучение ТМ (66%).

Полученные авторами результаты исследования для желтой группы проектов сходны с крайне деталь-



ными расчетами и обоснованиями, предлагаемыми в исследовании Д.С. Надымова, у которого максимальный суммарный ЧДД (26509,7 тыс. руб. для отработки Аллареченского ТМ) был получен при использовании в 4-м сценарии таких инструментов экономического механизма, как нулевой платеж, вычет затрат на ГРП из НДС и льготный займ на НИОКР. Также в работе Д.С. Надымов сравнивает полученные данные с двумя условными более крупными месторождениями по запасам: в 1,5 и 1,25 раза соответственно (зеленая группа проектов), и делает вывод, что чистый дисконтированный доход (ЧДД) недропользователя и ЧДД государства в абсолютных значениях может существенно измениться, следовательно, необходим иной перечень экономических инструментов к применению для роста обоих ЧДД, что подтверждается в текущем авторском исследовании, так как для проектов зеленой группы наиболее результативными признаются другие инструменты. Это доказывает объективность авторских результатов, полученных методами мозгового штурма и методом Дельфи.

В исследовании были предложены авторские принципы при построении общей модели экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО, а также сама модель. Принципы сводятся к следующему перечню: ясность – четкость и понятность сущности и работы каждого из инструментов; прозрачность – прозрачность в управлении инструментами в организационном и правовом аспектах; командной работы – участие как недропользователя, так и публично-правовых образований в организации деятельности по отработке техногенных месторождений, стремление публично-правовых образований максимально помочь недропользователям; модульность –

простота замены инструментов, а также их пополнения и исключения; контролируемость – возможность управлять и осуществлять мониторинг ключевых параметров управления; эффективность – способность экономического механизма при минимальных затратах способствовать получению максимальных выгод и для недропользователя, и для регулятора, и для природы, а также социума. В результате базовый экономический инструментарий, стимулирующий переработку ТМО в целом, в том числе и для малого бизнеса, сводится к следующему блоку: льготное налогообложение, финансово-кредитная политика и политика программирования, а также ГЧП. Следует отметить, что сам перечень инструментов экономического механизма не зависит от размера компании: будь то малый, средний или крупный бизнес, тем не менее их эффективность для разных размеров компаний будет варьироваться. Единственное различие в части списка инструментов для малых предприятий – это невозможность использования механизма ГЧП. Данный инструмент требует корректировки существующей нормативно-правовой базы страны. Все прочие экономические инструменты поддержки малого бизнеса имеют аналогичный характер.

Таким образом, реализация рекомендаций по постановке ранжирования инвестиционных проектов позволяет: во-первых, распределить их по группам, для каждой из которых был сформирован пакет инструментов, стимулирующих вклад инвестиций в освоение ТМ, а во-вторых, сформировать общую модель экономического механизма, стимулирующего переработку ТМО. Совершенствование инструментария экономического механизма несомненно активизирует деятельность по обращению с ТМО.

Список литературы / References

1. Soelton M., Permana D., Ramli Ya. et al. Business plan counseling in creating micro- entrepreneurship at Kemanggis-an-Jakarta. In: *International Conference on Community Development (ICCD) 2023*. 2023;5(1):266–271. <https://doi.org/10.33068/iccd.v5i1.589>
2. Kuznetsova S., Kozlova E., Kuznetsova A. Innovative entrepreneurship. *Moscow Economic Journal*. 2024;9(2):156–166. https://doi.org/10.55186/2413046X_2023_9_2_75
3. Keim J., Mueller S., Dey P. Whatever the problem, entrepreneurship is the solution! Confronting the panacea myth of entrepreneurship with structural injustice. *Journal of Business Venturing Insights*. 2024;21:e00440. <https://doi.org/10.1016/j.jbvi.2023.e00440>
4. Соколовский А.В., Гончар Н.В. Оценка направлений использования техногенных ресурсов при отработке различных видов минерального сырья. *Горная промышленность*. 2023;(5):102–107. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-102-107>
Sokolovsky A.V., Gonchar N.V. Assessment of directions to use man-made resources in the development of various types of mineral raw materials. *Russian Mining Industry*. 2023;(5):102–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-102-107>
5. Petlovanyi M., Kuzmenko O., Lozynskyi V. et al. Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*. 2019;13:24–38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>
6. Краденых И.А., Литвинцев В.С. Перспективы развития среднего и малого бизнеса в золотодобывающей отрасли. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2016;(7):34–41.
Kradenykh I.A., Litvintsev V.S. Gold industry medium and small-sized business future development. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016;(7):34–41. (In Russ.)
7. Umirzoqov A., Jurayev S., Karamanov A. Economic and mathematical modeling of rational development of small-scale and man-made gold deposits. *International Journal of Academic and Applied Research*. 2020;4(4):75–77.



8. Панфилов Е.И. Об основах малого горного предпринимательства. *Горная промышленность*. 2015;(5):26–29.
Panfilov E.I. On the fundamentals of small-scale mining entrepreneurship. *Russian Mining Industry*. 2015;(5):26–29. (In Russ.)
9. Гафиятов И.З. Мировой опыт использования малых предприятий в сфере недропользования. *Проблемы современной экономики*. 2007;(2):150–153.
Gafiyatov I.Z. World experience of using small enterprises in the subsoil use sector. *Problems of Modern Economics*. 2007;(2):150–153. (In Russ.)
10. Морозов В.А. Золотая россыпь больших дивидендов. Малый бизнес в сфере добычи полезных ископаемых. *Российское предпринимательство*. 2002;(12):9–14.
Morozov V.A. Gold mine of big dividends: small business in the mineral mining sector. *Russian Journal of Entrepreneurship*. 2002;(12):9–14. (In Russ.)
11. Орлов В.П. Проблемы малого горного бизнеса. *Минеральные ресурсы России*. 2008;(5):24–28.
Orlov V.P. Challenges of small mining business. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2008;(5):24–28. (In Russ.)
12. Чернявский А.Г. О проблеме освоения техногенных ресурсов. *Минеральные ресурсы России*. 2020;(3):58–64.
Chernyavsky A.G. Regarding the issue of technogenic resources development. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2020;(3):58–64. (In Russ.)
13. Всероссийская конференция «Проблемы рационального использования отходов горнопромышленного производства. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2013;(4):95–98.
All-Russian Conference “Problems of Rational Use of Mining and Industrial Waste”. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2013;(4):95–98.
14. Nevskaya M., Cherepovitsyn A.E. Justification of an approach to an economic assessment of projects development of technogenic mineral objects. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 302, 4th International Scientific Conference “Arctic: History and Modernity”*. 17–18 April 2019, Saint Petersburg, Russian Federation. 2019;302:012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/302/1/012049>
15. Пахальчак Г.Ю. Государство, требуя от предприятий выполнения природоохранных мероприятий, свои собственные обязанности не торопится выполнять. *Дискуссия*. 2016;(7):6–11.
Pakhchalchak G.Yu. The state, demanding enterprises to keep conservation measures, doesn't hurry to perform their own duties. *Diskussiya*. 2016;(7):6–11. (In Russ.)
16. Кубарев М.С., Игнатьева М.Н. Экономическое стимулирование переработки техногенно-минеральных образований. *Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии*. 2018;(3):143–147.
Kubarev M.S., Ignatieva M.N. Economic stimulation of processing of technogenic mineral education. *Samarskaya Luka: Problemy Regional'noy i Global'noy Ekologii*. 2018;(3):143–147. (In Russ.)
17. Полянская И.Г., Юрак В.В., Стровский В.Е. Повышение уровня сбалансированности недропользования в регионе с помощью учета отходов недропользования. *Экономика региона*. 2019;15(4):1226–1240. <https://doi.org/10.17059/2019-4-20>
Polyanskaya I.G., Yurak V.V., Strovsky V.E. Considering mining wastes as a factor of increasing the balance level of subsoil management in regions. *Economy of Region*. 2019;15(4):1226–1240. (In Russ.) <https://doi.org/10.17059/2019-4-20>
18. Петрова Т.В. *Правовые проблемы экономического механизма охраны окружающей среды*. М.: Изд-во «Зерцало»; 2000. 192 с.
Petrova T.V. *Legal issues of the economic mechanism for environmental protection*. Moscow: Zertsalo Publ.; 2000. 192 p. (In Russ.)
19. Милетенко Н.В. Экологические и горно-геологические аспекты реализации концепции устойчивого развития. *Разведка и охрана недр*. 2012;(7):5–7.
Miletenko N.V. Ecological and mining-geological dimensions of sustainable development concept realization. *Prospect of Mineral Resources*. 2012;(7):5–7. (In Russ.)
20. Mirzekhanov G., Mirzekhanova Z. From placer deposits to technogenic mineral formations: resource and historical perspective (a study of Amur region). In: *E3S Web of Conferences. VIII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources*. 2020;192:01032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201032>
21. Чантурия В.А. Перспективы устойчивого развития горно-перерабатывающей индустрии России. *Научный доклад на заседании АН России*. М.; 2006. 30 с.
Chanturia V.A. *Prospects for Sustainable Development of Russia's Mining and Processing Industry*. Scientific Report at the Meeting of the Russian Academy of Sciences. Moscow; 2006. 30 p. (In Russ.)
22. Шулепина З.М., Анфилатова Н.В., Ковалева Е.Н. и др. *Техногенные ресурсы России. Общие сведения. Справочник*. М.: ЗАО «Геоинформмарк»; 2001. 199 с.
Shulepina Z.M., Anfilatova N.V., Kovaleva E.N. et al. *Technogenic resources of Russia: general information*. Reference Book. Moscow: Geoinformmark Ltd. 199 p. (In Russ.)



23. *Техногенные минерально-сырьевые ресурсы*. Под ред. Б.К. Михайлова. М.: Научный мир; 2012. 236 с. Mikhailov B.K. (Ed.). *Technogenic Mineral Resources*. Moscow: Nauchnyi Mir; 2012. 236 p. (In Russ.)
24. Чайников В.В. Системная оценка техногенных месторождений. В: *Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых: обзорная информация*. Вып. 6–7. М.: ЗАО «Геоинформмарк»; 1999. 75 с. Chaikovnikov V.V. Systematic assessment of technogenic deposits. In: *Geology, exploration methods, and evaluation of solid mineral deposits: review information*. Issue 6–7. Moscow: Geoinformmark; 1999. 75 p. (In Russ.)
25. Душин В.А., Макаров А.Б. *Нетрадиционные типы месторождений полезных ископаемых*. Екатеринбург: УГГУ; 2015. 224 с. Dushin V.A., Makarov A.B. *Nontraditional types of mineral deposits*. Yekaterinburg: UGGU; 2015. 224 p. (In Russ.)
26. Потравный И.М. Экономика ресурсосбережения в ФРГ. *Мировая экономика и международные отношения*. 1990;(1):123–128. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-1990-1-123-128> Potravny I. The economics of resource conservation in the FRG. *World Economy and International Relations*. 1990;(1):123–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.20542/0131-2227-1990-1-123-128>
27. *Экология. Опыт государственного регулирования в США. Научно-аналитический обзор*. М.: Институт научной информации по общественным наукам РАН; 1995. 36 с. *Ecology: experience of state regulation in the USA*. Scientific-analytical review. Moscow: INION RAN; 1995. 36 p. (In Russ.)
28. Ибатуллин У.Г. Выгодно ли вкладывать в отвалы? *Табигат*. 2004;(5):12–14. Ibatullin U.G. Is it profitable to invest in waste dumps?. *Tabigat*. 2004;(5):12–14. (In Russ.)
29. Morand-Deville J. *Droit de l'environnement*. Paris: Editions ESTEM; 1996. (In Fr.)
30. Киперман Ю.А., Комаров М.А. Горно-промышленные отходы в формировании ресурсосберегающей природоохранной политики. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2016;(1–2):68–73. Kiperman Y.A., Komarov M.A. Mining waste in the formation of resource saving environmental policy. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2016;(1–2):68–73. (In Russ.)
31. Ignatyeva M., Yurak V., Dushin A. et al. How far away are world economies from circularity: Assessing the capacity of circular economy policy packages in the operation of raw materials and industrial wastes. *Sustainability*. 2021;13(8):4394. <https://doi.org/10.3390/su13084394>
32. Georghiou L., Cassingena J., Keenan M. et al. *The handbook of technology foresight: concepts and practice*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing; 2008. 428 p.
33. Popper R. How are foresight methods selected? *Foresight*. 2008;10(6):62–89. <https://doi.org/10.1108/14636680810918586>
34. Пахальчак Г.Ю. Проблемы обращения с отходами производства и потребления и пути их решения (на примере Свердловской области). В: *Материалы II Уральского международного экологического конгресса*. 17–20 мая 2011, Екатеринбург, Пермь. С. 93–96. Pakhalchak G.Y. Problems of industrial and consumer waste management and solutions (case study of Sverdlovsk region). In: *Proceedings of the II Ural International Ecological Congress*. May 17–20, 2011, Yekaterinburg, Perm. Pp. 93–96. (In Russ.)
35. Игнатъева М.Н., Юрак В.В., Душин А.В., Стровский В.Е. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89> Ignatyeva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., Strovsky V.E. Technogenic mineral accumulations: problems of transition to circular economy. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>
36. Игнатъева М.Н., Литвинова А.А., Логинов В.Г. *Методический инструментарий экономической оценки последствий воздействия горнопромышленных комплексов на окружающую среду*. Екатеринбург: ИЭ УрО РАН; 2010. 168 с. Ignateva M.N., Litvinova A.A., Loginov V.G. *Methodological tools for economic assessment of the environmental impact of mining complexes*. Yekaterinburg: IE UrO RAN; 2010. 168 p. (In Russ.)
37. Пашкевич М.А., Паршина М.В. Анализ экологической опасности объектов угольной промышленности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;(10):305–312. Pashkevich M.A., Parshina M.V. Analysis of environmental hazards at coal industry facilities. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(10):305–312. (In Russ.)
38. Баев Л.А., Афанасьев Я.В. Экономические основы управления переработкой отходов металлургического производства. *Экология и промышленность России*. 2004;(1):37–40. Baev L.A., Afanasev Ya.V. Economic foundations of waste management in metallurgical production. *Ecology and Industry of Russia*. 2004;(1):37–40. (In Russ.)
39. Селезнев С.Г., Болтыров В.Б. Нормативно-правовая база освоения техногенных объектов минерального сырья применительно к условиям Печенгского района Мурманской области. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2013;(8):73–79.



- Seleznev S.G., Boltyrov V.B. Legal framework of the development of man-made facilities of minerals to conditions of Pechenga district of Murmansk region. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2013;(8):73–79. (In Russ.)
40. Мирзеханов Г.С. Государственная политика в вопросах оптимизации освоения техногенной сырьевой базы россыпных месторождений золота. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2008;(2):33–36.
Mirzekhanov G.S. State policy on optimizing the development of technogenic raw material base of placer gold deposits. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2008;(2):33–36. (In Russ.)
41. Боярко Г.Ю. Налог на добавленную стоимость в сфере производства минерального сырья. *Горный журнал*. 2001;(4):14–17.
Boyarko G. Yu. Value-added tax in mineral raw materials production. *Gornyi Zhurnal*. 2001;(4):14–7. (In Russ.)
42. Клемезь Т.Н. Налоговое стимулирование экологической безопасности в горнорудном производстве. *Горный журнал*. 2013;(7):47–50.
Klemez T.N. Tax stimulation of environmental security in mining industry. *Gornyi Zhurnal*. 2013;(7):47–50. (In Russ.)
43. Селезнев С.Г. О проблеме использования горно-промышленных отходов. *Минеральные ресурсы России*. 2013;(4):40–44.
Seleznyov S.G. On the problem of mining waste management. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2013;(4):40–44. (In Russ.)
44. Сухорученков А.И., Корнилов Н.П., Евсин В.Г. Проблемы и пути совершенствования законодательной базы в сфере недропользования. *Горный журнал*. 2009;(5):8–12.
Sukhoruchenkov A.I., Kornilov N.P., Evsin V.G. Problems and ways of improvement of legislative base in the field of usage of the earth bowels. *Gornyi Zhurnal*. 2009;(5):8–12. (In Russ.)
45. Ochilov S., Kadirov V., Umirzoqov A. et al. Ore stream management on the development of deposits of natural and technogenic origin. In: *The 1st International Conference on Problems and Perspectives of Modern Science: ICP-PMS-2021*. 10–11 June 2021, Tashkent, Uzbekistan. 2022;2432(1):030061. <https://doi.org/10.1063/5.0093311>
46. Machado C. Urban expansion and the formation of technogenic deposits in tropical areas: The case of Araguaína city. *Investigaciones Geográficas*. 2014;47:3–18. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2014.32991>
47. Potravny I., Novoselov A., Novoselova I. et al. The development of technogenic deposits as a factor of overcoming resource limitations and ensuring sustainability (case of Erdenet Mining Corporation SOE in Mongolia). *Sustainability*. 2023;15:15807. <https://doi.org/10.3390/su152215807>
48. Буткевич Г.Р. Комплексное освоение техногенных ресурсов. *Строительные материалы*. 2023;819:70–74. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-70-74>
Butkevich G.R. Integrated development of technogenic resources. *Stroitel'nye Materialy*. 2023;819:70–74. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-70-74>
49. Goldyrev V., Naumov V., Kovyrzina U. Resource potential of technogenic-mineral formations of Santo Tomas II Gold-Copper-Porphyry Deposit (Philippines). In: Isaeva, E., Rocha, Á. (eds) *Science and Global Challenges of the 21st Century – Innovations and Technologies in Interdisciplinary Applications. Perm Forum 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham.; 2023. 622 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28086-3_31
50. Пахальчак Г.Ю. Роль партнерства государства и бизнеса в экономическом регулировании приоритетных экологических проблем. *Дискуссия*. 2014;(8):74–79.
Pakhchalchak G. Yu. The role of state and business partnership in economic regulation of priority ecology problems. *Diskussiya*. 2014;(8):74–79. (In Russ.)
51. Ткаченко И.Н., Евсева М.В. Стейкхолдерская модель корпоративного управления в проектах государственно-частного партнерства. *Управленческие науки*. 2014;(1):26–33.
Tkachenko I.N., Evseeva M.V. The Stakeholder model of corporate governance in the public-private partnership projects. *Management Sciences*. 2014;(1):26–33. (In Russ.)
52. Ястребинский М.А., Гусева Н.М. Финансово-экономический потенциал государственно-частного партнерства и контрактов жизненного цикла (за и против). *Горный журнал*. 2014;(1):43–47.
Yastrebinskiy M.A., Guseva N.M. Financial-economic potential of state and private partnership and live cycle contracts (pro et contra). *Gornyi Zhurnal*. 2014;(1):43–47. (In Russ.)
53. Ignatyeva M.N., Yurak V.V., Dushin A.V., Polyanskaya I.G. Assessing challenges and threats for balanced subsoil use. *Environment, Development and Sustainability*. 2021;23(12):17904–17922. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01420-1>
54. Кушнир М.А. Государственно-частное партнерство при освоении месторождений полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-221-229>
Kushnir M.A. Public-private partnerships in the development of mineral deposits. *Mining Informational and analytical bulletin*. 2019;(2):221–229. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-221-229>
55. Filatova I., Nikolaichuk L., Zakaev D., Ilin I. Public-private partnership as a tool of sustainable development in the oil-refining sector: Russian case. *Sustainability*. 2021;13(9):5153. <https://doi.org/10.3390/su13095153>



Информация об авторах

Вера Васильевна Юрак – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры отраслевой экономики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; заведующая научно-исследовательской лабораторией рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1529-3865](https://orcid.org/0000-0003-1529-3865), Scopus ID [57190411535](https://scopus.com/authorid/57190411535), ResearcherID [J-7228-2017](https://orcid.org/J-7228-2017); e-mail vera_yurak@mail.ru

Маргарита Николаевна Игнатъева – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики и менеджмента, главный научный сотрудник научно-исследовательской лабораторией рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9014-905X](https://orcid.org/0000-0001-9014-905X), Scopus ID [6603156023](https://scopus.com/authorid/6603156023); e-mail rinis@mail.ru

Оксана Геннадьевна Комарова – старший преподаватель кафедры экономики и менеджмента, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID [0009-0006-3761-7874](https://orcid.org/0009-0006-3761-7874); e-mail oxana-komarova@yandex.ru

Information about the authors

Vera V. Yurak – Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Professor of Industrial Economics Department, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; Head of the Research Laboratory for Reclamation of Disturbed Lands and Technogenic Objects, Director of the Research Laboratory Center, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; Leading Researcher, Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1529-3865](https://orcid.org/0000-0003-1529-3865), Scopus ID [57190411535](https://scopus.com/authorid/57190411535), ResearcherID [J-7228-2017](https://orcid.org/J-7228-2017); e-mail vera_yurak@mail.ru

Margarita N. Ignatyeva – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Professor of the Department of Economics and Management, Chief Researcher of the Research Laboratory for Reclamation of Disturbed Lands and Technogenic Objects, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; Leading Researcher, Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9014-905X](https://orcid.org/0000-0001-9014-905X), Scopus ID [6603156023](https://scopus.com/authorid/6603156023); e-mail rinis@mail.ru

Oksana G. Komarova – Senior Lecturer, Department of Economics and Management, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID [0009-0006-3761-7874](https://orcid.org/0009-0006-3761-7874); e-mail oxana-komarova@yandex.ru

Поступила в редакцию	28.09.2024	Received	28.09.2024
Поступила после рецензирования	03.02.2025	Revised	03.02.2025
Принята к публикации	04.02.2025	Accepted	04.02.2025