

Mining Science and Technology

Горные науки
и технологии

Vol. **10** №4
Том **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 проектами в горной промышленности, развитие территорий, правовые аспекты использования природных ресурсов и другие, которые способствуют прогрессу в горном деле и реализуются исследователями и практиками.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Петров Вадим Леонидович, проф., д.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Казанин Олег Иванович, проф., д.т.н., Санкт-Петербургский горный университет 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

Индрупский Илья Михайлович, проф., д.т.н., Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

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 «Инфомай»», 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., Университет науки и технологий 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

Плещанский 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.



Журнал открытого доступа.

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ



МИСИС Университет науки и технологий
МИСИС

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ

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

КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ

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

телефон: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.



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

Faramarz Doulati Ardejani, Prof., Ph.D., Collodge 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

Ilya M. Indrupskiy, Prof., Dr. Sci. (Eng.), Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (OGRI RAS), Moscow, Russian Federation

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. Rakishhev, 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

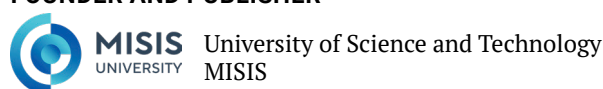
REGISTRATION

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



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 перспективности отработки газоносных участков
Карагандинского угольного бассейна 321

Р.А. Мусин, Н.А. Немова, Д.Р. Ахматнуров, Н.М. Замалиев, Э.Д. Решетняков, А.В. Резник

Обоснование рациональной области и технологии применения
гидравлических экскаваторов на открытых горных работах 338

В.А. Хакулов, В.А. Шаповалов, В.Н. Игнатов, Ж.В. Карпова, М.В. Игнатов, И.А. Ногеров

Локализация остаточных запасов нефти на поздней стадии разработки
Гильбертского месторождения по данным комплекса геофизических исследований 346

И.И. Босиков, Р.В. Ключев, И.В. Силаев

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Комплексное исследование анизотропии микроструктурных и фильтрационных свойств
коллектора газоконденсатного месторождения на базе цифрового анализа керна 357

В.В. Химуля

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Влияние добычи оловорудного сырья на речной сток малых рек
горнопромышленных районов 369

Н.К. Растанина, Д.А. Голубев, Н.А. Каюмов, П.Л. Растанин, И.А. Попадъёв

ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Регулирование олеофильности поверхности алмазов и минералов кимберлита
добавками реагентов-регуляторов различных классов 379

В.А. Чантурия, В.В. Морозов, Е.Л. Чантурия, А.Л. Самусев

ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Интеграция цифровых технологий в процесс проектирования систем электроснабжения
горнопромышленных предприятий 393

В.Л. Петров, Е.К. Бурматова, А.В. Пичуев



CONTENTS

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Justification of the prospects for developing gas-bearing sites in the Karaganda coal basin 321
R. A. Mussin, N. A. Nemova, D. R. Akhmatnurov, N. M. Zamaliyev, E. D. Reshetnyakov, A. V. Reznik

Justification of the rational scope and technology for the use of hydraulic excavators
in surface mining..... 338
V. A. Khakulov, V. A. Shapovalov, V. N. Ignatov, Zh. V. Karpova, M. V. Ignatov, I. A. Nogerov

Identification of remaining oil reserves at the late stage of development
of the Gilbert field using integrated geophysical data 346
I. I. Bosikov, R. V. Klyuev, I. V. Silaev

DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Comprehensive study of the anisotropy of microstructural and filtration properties
of a gas condensate field reservoir based on digital core analysis 357
V. V. Khimulia

ENVIRONMENTAL PROTECTION

Impact of tin ore mining on the streamflow of small rivers in mining regions 369
N. K. Rastanina, D. A. Golubev, N. A. Kayumov, P. L. Rastanin, I. A. Popadyev

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Regulation of the oil receptivity of the surface of diamonds and kimberlite minerals
using various classes of regulating agents..... 379
V. A. Chanturiya, V. V. Morozov, E. L. Chanturiya, A. L. Samusev

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Integration of digital technologies into the design process of power supply systems
for mining enterprises 393
V. L. Petrov, E. K. Burmatova, A. V. Pichuev



РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обзорная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-425>

УДК 622.271

**Обоснование перспективности отработки газоносных участков
Карагандинского угольного бассейна**

Р.А. Мусин¹ , Н.А. Немова² , Д.Р. Ахматнуров¹ , Н.М. Замалиев¹ ,
Э.Д. Решетняков¹ , А.В. Резник²

¹ Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан

² Институт горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

fpvgn@misd.ru

Аннотация

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что в настоящее время есть необходимость восполнения потребностей энергоресурсов. Одним из перспективных вариантов стоит рассматривать добычу газа метана из нетрадиционных источников, запасы которых значительно превышают запасы традиционных месторождений. Цель: провести оценку газоносных участков и обосновать принципы рейтингования их перспективности на основе анализа геолого-технологических факторов, влияющих на процесс газовыделения из угольных пластов. Для достижения указанной цели в исследовании рассмотрен Карагандинский угольный бассейн как перспективный по добыче газа метана, разделенный на 5 участков: Тентекский, Саранский, Промышленный, Шерубайнуринский, Талдыкудукский. Исследованы наиболее газоносные пласты, имеющие глубину залегания от 420 до 635 м. В результате исследования были определены зоны угольных пластов первого и второго уровня для добычи метана из угольных пластов. Обоснованными параметрами выделения этих зон являются: глубина залегания, проницаемость и десорбция угля в пласте. На глубине 250–300 м была зафиксирована газопроницаемость пластов в пределах 10–15 мД, при этом установлено, что с увеличением глубины происходит уменьшение газопроницаемости и на уровне 600–700 м она составляет сотые и тысячные доли миллидарси. Для определения газоносности угольных пластов были отобраны представительные пробы, характеризующие газоносность углей пластов от K_{20} до K_1 на всей площади исследуемого участка горного отвода. Не рассматривались участки в зоне геологических нарушений. Они отнесены к непредставительным из-за большей, чем 30 %, потери газа. Было установлено, что увеличение газоносности (метаноносности) в Карагандинском бассейне происходит по восходящей ветви S-образной кривой и описывается уравнением Ленгмюра. Определены ресурсы метана во всех вмещающих породах по минимальной метаноносности, равной 1 м³/т, а в аргиллитах и алевролитах с включениями рассеянного угольного вещества – со значением метаноносности 4–5 м³/т породы. При этом установлено, что для примерной оценки ресурсов необходимо иметь данные по общей и эффективной пористости, обводненности песчаников, а также другим факторам. Впервые для Карагандинского угольного бассейна реализована система интегральной оценки перспективности участков по добыче метана, включающая более 10 факторов. В отличие от предыдущих исследований, где оценка проводилась по отдельным признакам (глубина, газоносность, проницаемость), в настоящей работе предложена обобщенная балльная методика, позволяющая количественно сравнивать участки и прогнозировать эффективность метанодобычи. Также новыми являются установленные в исследовании зависимости коэффициентов Ленгмюра от содержания фюзинита и температуры, что ранее не применялось для местных углей. В ходе исследования: определены зоны первого и второго порядка по перспективности разработки метана, установлены количественные зависимости газоносности от глубины, стадии метаморфизма, петрографического состава, выявлены участки с наибольшим потенциалом промысловой добычи, разработана методика критериальной оценки участков.

Ключевые слова

угольное месторождение, угольные пласты, газ, метан, запасы, метаноносность, газоносность, дегазация, проницаемость, десорбция, сорбция, испытания, пробы, эксперимент, моделирование, уравнение Ленгмюра, Казахстан, Карагандинский угольный бассейн

Финансирование

Исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по реализации научной, научно-технической программы ИРН № BR24993009.

Для цитирования

Mussin R.A., Nemova N.A., Akhmatnurov D.R., Zamaliyev N.M., Reshetnyakov E.D., Reznik A.V. Justification of the Prospects for developing gas-bearing sites in the Karaganda coal basin *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):321–337. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-425>



MINERAL RESOURCES EXPLOITATION


Review paper

Justification of the prospects for developing gas-bearing sites in the Karaganda coal basin

R. A. Mussin¹  , N. A. Nemova²   , D. R. Akhmatnurov¹  , N. M. Zamaliyev¹ ,
E. D. Reshetnyakov¹ , A. V. Reznik² 

¹ Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

² N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

 fpvgn@misd.ru

Abstract

The relevance of this study is due to the current need to meet energy resources demand. A promising option worth considering is the production of methane gas from unconventional sources, whose reserves significantly exceed those of conventional deposits. Objective: to evaluate gas-bearing sites and justify the principles for rating their prospects based on an analysis of geological and technological factors affecting the process of gas release from coal seams. To achieve this goal, the study examined the Karaganda coal basin as a promising district for methane gas extraction, divided into five sites: Tenteksky, Saransky, Promyshlenny, Sherubainurinsky, Taldykuduksky. The most gas-bearing seams (reservoirs), with depth of occurrence ranging from 420 to 635 m, were studied. As a result of the study, first- and second-level coal seam zones were identified for methane extraction from coal seams. The parameters used to identify these zones were: depth of occurrence, permeability, and desorption of coal in a seam. At a depth of 250–300 m, gas permeability of the seams was recorded within the range of 10–15 millidarcy (mD). It was established that gas permeability decreases with increasing depth, and at a depth of 600–700 m, it amounts to hundredths and thousandths of a millidarcy. To determine the gas content of coal seams, representative samples were taken to characterize the gas content of coal seams from K_{20} to K_1 across the entire area of the mining allotment under investigation. Sites in fault zones were not considered. They are classified as unrepresentative due to gas losses exceeding 30%. It has been established that the increase in gas content (methane content) in the Karaganda basin follows the ascending branch of a S-shaped curve and is described by the Langmuir equation. Methane resources in all host rocks have been determined based on a minimum methane content of 1 m³/t, and in claystones and siltstones with disseminated coal inclusions, based on a methane content of 4–5 m³/t of rock. At the same time, it has been established that in order to make a rough estimate of the resources, it is necessary to have data on total and effective porosity, water saturation of sandstones, and other factors. For the first time in the Karaganda coal basin, an integrated system for assessment of sites in terms of the potential of methane extraction has been implemented, incorporating more than 10 factors. Unlike previous studies, where assessments were made based on individual characteristics (depth, gas content, permeability), this paper proposes a generalized scoring method that allows for quantitative comparison of sites and prediction of methane production performance. Besides, the study novelty comprises the dependencies of Langmuir coefficients on fusinite content and temperature established in the study, which had not previously been applied to local coals. During the study, first- and second-order zones were identified in terms of methane production prospects; quantitative dependencies of gas content on depth, coal rank (stage of maturation), and petrographic composition were established; sites with the greatest commercial production potential were identified, and a methodology for the criterion-based assessment of sites was developed.

Keywords

coal deposit, coal seams, gas, methane, reserves, methane content, gas content, degassing, permeability, desorption, sorption, testing, samples, experiment, simulation, Langmuir equation, Kazakhstan, Karaganda coal basin

Financing

The research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan as part of targeted funding for the implementation of scientific and technical program IRN No. BR24993009.

For citation

Mussin R. A., Nemova N. A., Akhmatnurov D. R., Zamaliyev N. M., Reshetnyakov E. D., Reznik A. V. Justification of the Prospects for developing gas-bearing sites in the Karaganda coal basin *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):321–337. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-425>

Введение

В настоящее время в топливно-энергетической отрасли Казахстана наблюдается проблема истощения запасов таких углеводородов, как природный газ и нефть, кроме того, помимо постоянно ухудшающихся условий добычи, изменяется и сама структура име-

ющихся запасов, т.е. растет доля трудноизвлекаемых запасов. Например, мировые ресурсы природного газа уже сегодня не могут удовлетворить потребности населения, так как наиболее доступные (легкоизвлекаемые) месторождения в значительной степени истощены. При этом лидерами по объему производ-

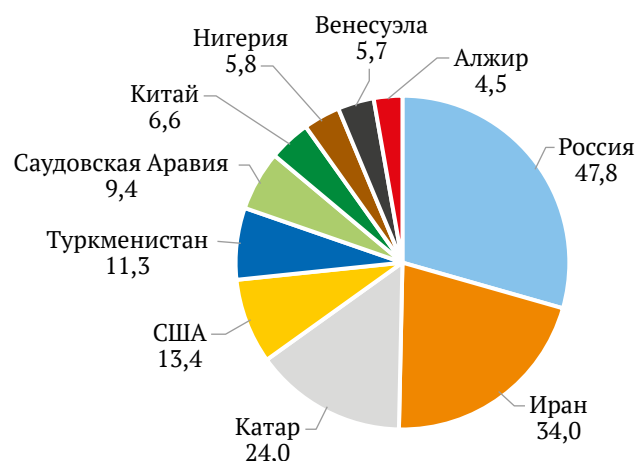
ства первичных энергоресурсов являются Китай, США и Россия (по данным сайта Enerdata, 2024). Основную долю в структуре извлекаемых природных ресурсов составляют природный газ, сырая нефть, уран и уголь. Между тем наибольший объем приходится на уголь – 15,9 млрд т н.э. и уран – 10,3 млрд т н.э., а наименьший на нефть – 5,2 млрд т н.э. и природный газ – 3,5 млрд т н.э.

На рис. 1 показаны мировые запасы (а) и объемы добычи (б) природного газа на начало 2023 г., по данным ОПЕК они оценивались в 207,9 трлн м³. В то же время мировые запасы нефти по данным Федерального агентства энергетической информации США (Energy Information Administration) по состоянию на 2023 г. составляли 1,7 трлн баррелей. Однако восполнить потребности энергоресурсов возможно за счет добычи газа метана из нетрадиционных источников, запасы которых значительно превышают запасы традиционных месторождений. Мировые объемы добычи угля на 2033 г. по данным Международного энергетического

агентства составят 8,7 млрд т, при запасах каменного – 9,5 трлн т и бурого – 4,9 трлн т. Наличие существенных запасов свидетельствует о содержании большого объема метана в недрах, значит, и проекты по его оценке и последующей добыче могут оказаться перспективными (рис. 1, в, г). При этом согласно данным Международного энергетического агентства по состоянию на 2023 г. мировая добыча метана из угольных пластов может достичь уже 200 млрд м³ к 2035 г. Из статистических отчетов¹ также следует, что общемировые прогнозные ресурсы газа из нетрадиционных источников превышают в 2,2 раза его наличие в традиционных месторождениях, при этом лидирующие позиции по ресурсам занимают Канада, Россия и США, а по добыче – США².

¹ International Energy Agency, World Energy Outlook. 2023.

² Метан угольных пластов: Перспективы разработки нетрадиционных углеводородов на территории СНГ. 2011. URL: <https://gaap.ru/articles/Metan-ugolnyh-plastov/>



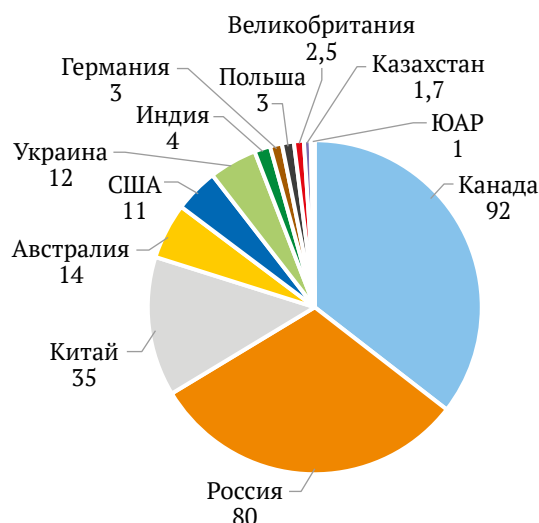
а



б



в



г

Рис. 1. Мировые запасы по состоянию на 2023 г.: а – природного газа, трлн м³; б – объемы добычи природного газа, млрд м³; в – угля, млрд т; г – угольного метана, трлн м³



Таблица 1
Структура мировых ресурсов газа [1]

Виды газовых ресурсов	Объём ресурсов газа, трлн м ³	Доля видов газовых ресурсов, %
1 Традиционные ресурсы газа	405	30,54
2 Нетрадиционные ресурсы газа	921	69,46
2.1 Газ плотных песчаников	209	15,76
2.2 Метан угольных пластов	256	19,31
2.3 Сланцевый газ	456	34,39
Всего ресурсов газа	1326	100,00

Залежи газа нетрадиционных источников значительно превышают запасы традиционных месторождений и составляют согласно данным Международного энергетического агентства³ 921 трлн м³. Между тем объём метана угольных пластов по всему миру оценивается в 256 трлн м³, что составляет более 19 % от общих ресурсных объёмов газа (табл. 1).

Отдельными странами достаточно успешно применяются различные технологии добычи метана из угольных пластов [2, 3]. Практически во всём мире направление добычи газа из угольных пластов приобрело стратегическое значение как в контексте предварительной (заблаговременной) дегазации метанонасыщенных пластов с целью повышения безопасности горных работ, так и в качестве самостоятельного направления недропользования – добычи нетрадиционного углеводорода – метана угольных пластов.

Постановка проблемы

Длительное время содержащийся в угольных пластах метан рассматривался как вредный фактор, снижающий эффективность добычи угля. Значительная часть расходов, связанных с организацией угледобычи, направляется на создание безопасных условий труда. Это включает в себя затраты на мероприятия по контролю за газовой обстановкой в шахте, проветривание горных выработок, приобретение оборудования для подавления пыли и обеспечения взрывобезопасности, системы мониторинга и оповещения о чрезвычайных ситуациях, средства для поиска и спасения персонала, коммуникационное оборудование и сигнализацию, а также на дегазацию угленосного массива. Не менее важны затраты на функционирование систем водоотлива, электро-, водо- и теплоснабжения, приобретение специализированного транспорта, инструментов и материалов для безопасного проведения взрывных работ и другие меры. Следует отметить, что дегазация угольных пластов открывает возможность использования метана в качестве сопутствующего полезного ископаемого⁴.

³ International Energy Agency, World Energy Outlook. 2023.

⁴ Jaireth S., Huleatt M.B. Australian in situ coal resources. Geoscience Australia, Canberra; 2012. URL: <http://pid.geoscience.gov.au/dataset/ga/74097>

К настоящему времени с целью улучшения экологической ситуации и уменьшения выбросов метана в окружающую среду (ОС) необходимо извлекать метан из угольных пластов путем их заблаговременной дегазации. Следует также отметить, что поступление метана в ОС приводит к разрушению озонового слоя, а ежегодное накопление его в атмосфере составляет 1–2 %, что превосходит интенсивность накопления других газов, при этом метан является хорошим нетрадиционным энергоносителем и рассматривать его можно в качестве компонента топливно-энергетической сырьевой базы страны. Учитывая, что общемировые прогнозные ресурсы газа метана из угольных пластов составляют более 19 % от общих запасов газовых месторождений и превышают в 2,2 раза его наличие в традиционных залежах, необходимо провести ресурсную оценку газонасыщенных участков Карагандинского угольного бассейна и обосновать рейтинг перспективности участков на основе анализа геолого-технологических факторов, влияющих на процесс газовой выделенности из угольной толщи, что и является целью настоящего исследования.

В связи с этим были поставлены следующие задачи: провести анализ современного состояния и мирового опыта в области добычи метана из угольных пластов; исследовать метанонасыщенность угольных пластов Карагандинского бассейна с учётом глубины залегания, геологического строения и стадии метаморфизма углей; установить зависимости между геолого-петрографическими характеристиками углей и параметрами метанонасыщенности на основе изотерм сорбции; по результатам опытно-промышленных испытаний определить влияние ряда геолого-технологических факторов, характеризующих перспективность участков, на извлекаемость метана; обосновать рейтинг перспективности участков на основе сформированных критериев и системы балльной оценки ключевых параметров; определить участки первого и второго порядка по перспективности метанодобычи с учётом интегральных показателей.

Методика и объекты исследования

1. Методика исследования

В настоящем исследовании использован комплекс методов, апробированных в международной и отечественной практике при изучении газонасыщенности угольных пластов, включающий: прямой десорбционный анализ (canister test) для оценки реальной газонасыщенности, построение изотерм сорбции по модели Ленгмюра, петрографический анализ углей с выделением витринита и фюзинита.

В отличие от существующих подходов, в которых перспективность участков определяется на основе отдельных параметров (глубина, газонасыщенность, проницаемость), в данной работе использована разработанная ранее авторами интегральная методика, объединяющая 10 ключевых факторов, оказывающих влияние на метанонасыщенность и промышленную извлекаемость метана.

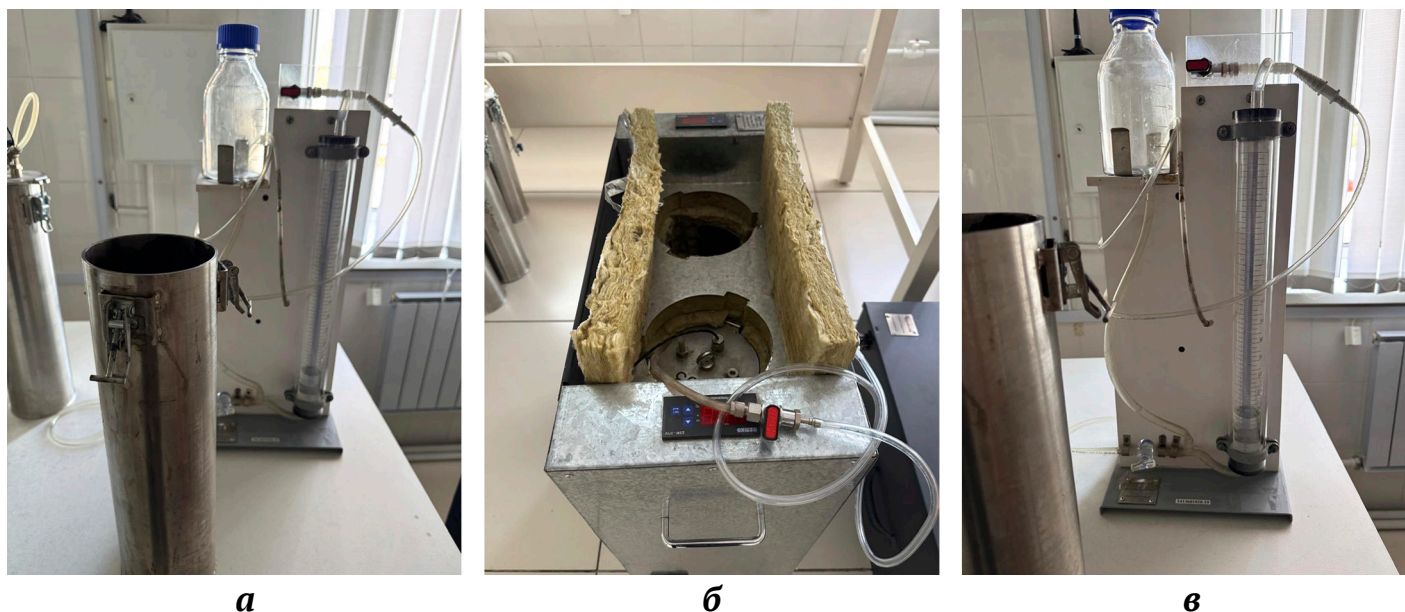


Рис. 2. Десорбционная установка Geokrak (Польша): *а* – контейнер для сбора образцов K01; *б* – установка для создания пластовой температуры; *в* – прибор фиксации выхода газа

Методика исследования включает комплексную оценку газоносности угольных пластов, основанную на прямом десорбционном анализе (canister test), определение сорбционно-кинетических параметров сорбции по уравнению Ленгмюра, а также петрографический анализ углей. Все методы апробированы в международной и отечественной практике [4–6] и применены на стадии опытно-промышленных испытаний на пяти участках Карагандинского бассейна. Новизна подхода заключается в интегральной критериальной оценке участков с учётом комбинации факторов: проницаемости, влажности, сорбционных характеристик, выхода летучих веществ и давления газа. Эти параметры впервые совместно использованы для ранжирования участков для условий данного бассейна.

Для определения газоносности использовался десорбционный метод исследования – канистр-тест, применяемый как в зарубежной практике, так и в России [7]. Его выбор обусловлен возможностью количественного определения объёма десорбируемого и остаточного газа при различных термобарических режимах, что особенно важно для углей Карагандинского бассейна с разной степенью метаморфизма. Данный метод включает отбор проб угольного керна из угольного пласта с помощью съёмных керногазонаборников КГ-55 в разведочных скважинах с использованием в качестве контрольного расчетного метода – прогноз метаноносности угольных пластов по данным петрографического состава. Далее отбирают газ из газосборника, керноприемник с пробой угольного керна отделяют от керногазонаборника и герметизируют заглушками. После чего пробы угольного керна устанавливают в термостат, настроенный на температуру, равную температуре пласта, из которого были отобраны пробы. Объём десорбированного газа определяется с помощью измерительного цилиндра и остаточного газа в угле при трех режимах дегаза-

ции до полного извлечения газа: при температуре 60–90 °С, при термовакуумировании с нагревом до 60–90 °С, после дробления пробы в шаровой мельнице при 60–90 °С и вакуумировании. При этом общий уровень газоносности определяют как сумму объёмов потерянного, десорбированного и остаточного газа. Этапы рабочего процесса по определению объёма десорбированного газа продемонстрированы на рис. 2.

Для анализа сорбционной ёмкости углей использованы изотермы Ленгмюра, традиционно применяемые в исследованиях СВМ-месторождений⁵. Вклад авторов заключается в уточнении коэффициентов уравнения Ленгмюра угольных пластов Карагандинского бассейна на основе лабораторных данных с учётом температурных условий и петрографического состава (в частности, содержания фюзинита и витринита). Предложенный подход впервые интегрирует параметры десорбции, проницаемости, влажности, метаморфизма и петрографии в единую балльную систему для комплексной оценки перспективности участков, что является развитием подходов, ранее описанных в работах [8, 9].

2. Отбор проб

Отбор проб производился на исследуемых участках с наиболее газоносными пластами, которые стали считать характерными представителями участка. На различных глубинах и по несколько раз для точности проводимых исследований для определения влияния глубины залегания пласта на его проницаемость

⁵ Pashin J.C. Geologic heterogeneity and coalbed methane production – experience from the Black Warrior Basin. In: Selected Presentations on Coalbed Gas in the Eastern United States. U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1273. Pp. 61–92; Jaireth S., Huleatt M.B. Australian in situ coal resources. Geoscience Australia, Canberra; 2012. URL: <http://pid.geoscience.gov.au/dataset/ga/74097>



отбирались пробы на следующих участках: Тентекский с глубиной отбора проб 450, 470, 500 м, Саранский – 600, 620, 635 м, Промышленный – 460, 480, 500 м, Шерубайнуринский – 420, 435, 440 м, Талдыкудукский – 460, 475, 500 м.

Все аналитические исследования проводились в Карагандинском техническом университете имени Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан).

3. Лабораторные исследования

Вся обработка проб – определение компонентного состава газа, технический анализ пробы (A_d , W , V_{daf}), расчет метаноносности (CH_4 + тяжелые углеводороды) – происходила в лабораторных условиях. Всего было отобрано 107 представительных проб из 59 пластопересечений. Наибольшее количество проб приходится на наиболее мощные пласты – K18, K12, K10, D6. Результаты лабораторных исследований приведены в табл. 2 и демонстрируют количество десорбированного метана в отобранных пробах. Наибольшее значение зафиксировано в пробах Долинской свиты, что связано со стадией метаморфизма.

Подробное описание этих методов в статье не приводится, поскольку они являются признанными в профессиональной среде. Вместо этого акцент сделан на уточнении параметров уравнения Ленгмюра и адаптации методик к условиям Карагандинского бассейна.

Таблица 2

Результаты десорбции метана из угольных пластов

Номер пробы	Пласт	Начальное давление, МПа	Объем десорбированного метана, см ³ /г	Температура, °С	Время до пика десорбции, ч
K ₁₈₋₁	K ₁₈	1,98	5,22	18,8	8,0
K ₁₈₋₂	K ₁₈	1,46	7,62	22,7	9,2
K ₁₈₋₃	K ₁₈	1,94	5,99	18,1	14,1
K ₁₈₋₄	K ₁₈	1,61	6,79	21,1	6,5
K ₁₈₋₅	K ₁₈	2,3	8,29	20,2	8,9
K ₁₂₋₁	K ₁₂	1,4	7,05	18,8	14,8
K ₁₂₋₂	K ₁₂	2,48	6,04	22,5	13,1
K ₁₂₋₃	K ₁₂	2,02	6,91	20,2	12,2
K ₁₂₋₄	K ₁₂	2,03	7,65	20,2	12,2
K ₁₂₋₅	K ₁₂	1,53	7,09	20,8	11,7
K ₁₀₋₁	K ₁₀	1,38	6,01	21,1	12,4
K ₁₀₋₂	K ₁₀	1,66	5,52	20,0	6,0
K ₁₀₋₃	K ₁₀	2,42	5,72	18,5	13,6
K ₁₀₋₄	K ₁₀	2,34	8,37	22,6	9,5
K ₁₀₋₅	K ₁₀	1,98	5,82	22,8	11,7
D ₆₋₁	D ₆	1,75	5,08	21,9	12,7
D ₆₋₂	D ₆	2,1	5,05	20,5	10,4
D ₆₋₃	D ₆	2,04	7,65	20,9	14,6
D ₆₋₄	D ₆	2,18	8,45	21,6	10,6
D ₆₋₅	D ₆	1,36	6,18	22,8	11,8

Анализ способов определения перспективных участков в странах мира, ведущих добычу метана

С целью определения перспективных участков для добычи метана предлагается множество различных подходов, один из таких – компьютерное моделирование месторождения. Для этих целей месторождение делят на небольшие участки и сравнивают их между собой по ряду характеристик. Более подробно такой метод рассмотрен в работе [10]. Его сущность заключается в многоэтапном анализе перспективности территорий для добычи угольного метана. Метод включает следующие основные этапы: *разбиение* месторождения на участки – проводится геолого-структурное и ресурсное зонирование территории с выделением блоков, обладающих различными геолого-геофизическими характеристиками; *определение* параметров участков – осуществляется оценка газоносности, проницаемости, мощности угольных пластов, глубины залегания, степени трещиноватости, а также других критериев, влияющих на извлекаемость метана; *выбор* участков, пригодных для промышленной разработки, проводится по совокупности технических, технологических и экономических параметров; *ранжирование* по уровню перспективности – участки классифицируются по степени приоритетности бурения на основании интегрального показателя перспективности; *принятие* решений по бурению – на основе полученных оценок формируется регламент бурения метанодобывающих скважин и определяются их ключевые характеристики (глубина, конструкция, дебит и т.д.); *оценка* интегральной метанодобываемости – рассчитываются потенциальные объемы извлечения метана по шахтным полям; *анализ* экономической эффективности – производится оценка экономических эффектов от планируемой добычи угольного метана с учётом капитальных и эксплуатационных затрат. Такой подход позволяет обеспечить обоснованное планирование мероприятий по дегазации, повысить эффективность промышленной метанодобычи и минимизировать геолого-экономические риски.

В работе [11] предложена методика выделения перспективных участков («газовых куполов»), которая включает геодинамическое районирование рассматриваемой территории, проведение геофизических работ для заверки результатов геодинамических исследований, бурение поисковых скважин с целью подтверждения наличия газовых куполов, их оконтуривание скважинами и бурение направленных наклонно-горизонтальных скважин с целью заблаговременной дегазации шахтного поля с возможностью использования полученного метана. Использование данной методики позволяет подтвердить границы выделенных с поверхности в процессе геодинамического районирования газовых куполов и определить предварительный объем ресурса газа метана.

Ещё один метод – критериальная оценка участков по основным факторам, влияющим на добычу метана. Например, учитывают глубину залегания, нарушенность, проницаемость и метаноносность угольных пластов. Каждому оцениваемому участку присваива-



ют цифры от 10 до –10, где 10 наилучший показатель, показателю, который влияет негативно, присваивается отрицательное значение. Также для определения перспектив добычи метана из угольных пластов используют показатели газонасыщенности и критического давления десорбции газа. Такой метод описан в статье [12].

В зарубежных странах, например в США, для определения перспективных участков добычи метана используют комплексный метод выявления «сладких точек»: геолого-технологические, геофизические и петрофизические исследования, помогающие определить фильтрационно-ёмкостные, физико-механические свойства, элементный и вещественный состав углей и углевмещающих пород; оценка угольных пластов, которая проводится на основе анализа диаграмм геофизических исследований скважин, керн и шлама, геолого-технологических исследований, гидродинамических исследований и сейсмических работ, в ходе которой устанавливают петрофизические связи, выявляют зоны трещиноватости, региональные нарушения, осуществляют привязку данных к угольным горизонтам; отбирают керн для определения количества газа и проницаемости угля на данном участке⁶ [1]. Для повышения эффективности извлечения метана из угольных пластов (до 80%) была разработана и внедрена технология, основанная на применении пневмо- и гидродинамических воздействий на угольный массив, способствующих интенсификации десорбции и повышению газоотдачи [13]. Аналогичные технологические подходы успешно применяются в Австралии⁷ [1] и Китае [14], где они доказали свою эффективность в условиях низкопроницаемых и сложнопостроенных угольных пластов.

В работах [7, 10] представлены разные методы, использующиеся в России, которые позволяют определить перспективность участков для добычи метана на различных этапах освоения газоугольных месторождений, например, на региональном этапе получают геологические сведения после проведения разведочных работ на уголь и на их основе выбирают

наиболее перспективные для поисковых работ участки. На поисково-оценочном этапе производят бурение структурных скважин и проведение сейсморазведочных работ с целью уточнения структурно-тектонического строения месторождения, изучения геологического разреза угленосной толщи и исследования фильтрационно-ёмкостных свойств угольных пластов. Представленные сведения являются ключевыми для идентификации наиболее продуктивных групп угольных пластов и обоснованного выбора мест заложения поисково-оценочных и разведочных скважин. Кроме того, для оценки потенциала метаносности шахтных полей применяется ретроспективный метод прогнозирования ресурсов метана, основанный на анализе исторических данных по угледобыче и метановыделению. Метод учитывает: фактические объёмы добычи угля и метановыделений как в целом по шахтам, так и по отдельным выемочным участкам; эффективность ранее применяемых технологий дегазации и извлечения метана; динамику изменения газообильности при различных горно-геологических и технологических условиях. Такой подход позволяет повысить достоверность прогноза ресурсов метана, выявить закономерности пространственного распределения метаносных угольных пластов⁸ [4].

Анализ угольных пластов

Карагандинского угольного бассейна

Карагандинский бассейн является одним из крупнейших в Казахстане, подразделяется на 7 свит, балансовые запасы которых оцениваются в 9,5 млрд т, в том числе бурых углей – 0,6 млрд т, каменных – 8,9 млрд т, из них коксующихся – 5,5 млрд т. Промышленная угленосность Карагандинского бассейна имеет около 80 пластов и пропластков со средней суммарной их мощностью 110 м, при этом рабочую мощность (более 0,6 м) имеют лишь 65 пластов. Суммарная мощность всех угольных пластов в среднем 110 м. Характер угленосности отдельных свит приводится в табл. 3.

⁶ Метан угольных пластов: Перспективы разработки нетрадиционных углеводородов на территории СНГ. 2011. URL: <https://gaap.ru/articles/Metan-ugolnyh-plastov/>

⁷ Там же.

⁸ Шевцов А. Г. Геомеханическое обоснование применения многозабойных горизонтальных скважин при добыче метана угольных пластов. [Автореф. дис. ... канд. техн. наук] Кемерово; 2021. 123 с.

Таблица 3

Характеристика свит Карагандинского угольного бассейна

№ пп	Наименование свит (снизу вверх)	Мощность, м	Индексы пластов*	Количество пластов*	Суммарная мощность угольных пластов, м	Угленосность
1	Угольная нижнесредняя Ашля-рикская	585–600	$\frac{A_{1-20}}{A_{5, A_{12}}}$	$\frac{20-22}{2}$	14–20	2,4–3,7
2	Верхневизейская серпуховская и продуктивная Карагандинская	695–755	$\frac{K_{1-20}}{K_7, K_{10}, K_{12}, K_{13}, K_{16-17}}$	$\frac{24-26}{6}$	26–42	3,5–6,0
3	Среднекарагандинская продуктивная Долинская	450–550	$\frac{D_{1-11}}{D_6, D_{10}}$	$\frac{10-11}{2}$	14–15	2,9–4,2
4	Угольная Тентекская	520–560	$\frac{T_{1-17}}{T_3, T_{5, T_{12}}}$	$\frac{16-18}{3}$	17–18	3,0–3,5

* В знаменателе представлены продуктивные угольные пласты со средней мощностью рабочего пласта более 1,5 м.



Следует отметить, что немаловажными факторами, определяющими качество углей, также являются его газоносность и метаноносность. Средняя газоносность углей Карагандинского бассейна составляет 20–25 м³/т горючей массы, которая зависит от вещественного состава, степени метаморфизма углей, структурного положения и тектонического строения. Основным газом в недрах бассейна является метан. Исследованиями доказано, что с увеличением степени метаморфизма газоносность повышается от 15–20 м³/т горючей массы для газовых и жирных классов углей до 20–27 м³/т горючей массы для коксовых и отоженных спекающихся. В табл. 4 приведена характеристика диапазонов газоносности углей по участкам основных свит Карагандинского бассейна. Наибольшие значения зафиксированы в Караджаро-Шаханском и Тентекском районах, что связано с глубиной залегания пластов и высоким содержанием витринита.

По предварительным оценкам, в Карагандинском бассейне до глубины 1800 м образовалось 24,3 трлн м³ метана, часть которого (порядка 8 %) осталась в угле и рассеянном веществе, часть (18 %) мигрировала во вмещающие породы, а основная часть газов (более 18 трлн м³) мигрировала в атмосферу в связи с отсутствием надежных коллекторов и глинистых геологических покрышек. Раскрытость практически всех положительных геологических структур исключила

возможность образования в бассейне самостоятельных крупных скоплений природных газов.

Для примера рассмотрим характеристику качества углей пластов Долинской и Карагандинской свит по газоносности и метаноносности.

– *Долинская свита:*

По пластам Д₃, Д₄ – глубина зоны газового выветривания (Н₀) составляет 252 м. Глубже градиент роста газоносности составляет 1,5 м³/т горючей массы на 100 м глубины. Таким образом, в границах поля газоносности пластов Д₆, Д₅, Д₄ не превышает 13,6 м³/т горючей массы. По пластам Д₂, Д₁₋₂, Д₁ – глубина зоны газового выветривания (Н₀) составляет 249 м. На более интенсивное нарастание газоносности происходит от поверхности до глубины 400 м и достигает 11 м³/т горючей массы. В пределах 400–650 м газоносность растет на 1,0–0,5 м³/т горючей массы на каждые 100 м глубины и величина газоносности стабилизируется равной 13,9 м³/т горючей массы.

– *Карагандинская свита*

Степень метаморфизма возрастает по вертикали, а в плане – в северо-западном направлении соответственно мощности карагандинской свиты. Средняя метаноносность пластов от верхней границы участка (700 м) к нижней (1400 м) увеличивается на 0,5–2,3 м³/т горючей массы и не превышает 30 м³/т горючей массы. Глубина верхней границы метановой зоны колеблется от 61 до 165 м. По данным иссле-

Таблица 4

Газоносность углей Карагандинского бассейна

Участок Карагандинского угольного бассейна, месторождение, бассейн	Глубина зоны газового выветривания <i>H</i> ₀	Газоносность на глубине 400 м, м ³ /т горючей массы	Стадия метаморфизма	Сумма плавких компонентов (ПК), %	
				необогатненный уголь	концентрат действительной плотности менее 1,4 г/см ³
Ашлярикская свита					
Промышленный	90	20	К ₁	35–54	50–60
Карагандинская свита					
Промышленный (восток)	140	13	Ж ₁	41–66	50–72
Саранский	120	20	К ₁ , К ₂	35–60	45–60
Центральный	100	23	К ₂	38–79	50–87
Южный	125	24	К ₃ , ОС	40–80	50–88
Манжинский	125	22	К ₁ , К ₂	45–80	55–86
Долинская свита					
Дубовский	–	16	Г ₃ , Ж ₁	61–70	69–78
Долинский	180	20	Ж ₃ , К ₁	57–80	7–88
Караджаро-Шаханский	200	19	Ж ₂	55–80	66–87
Тентекский (юго-восток)	180	24	Ж ₃ , К ₁	57–80	65–85
Тентекский (северо-запад)	300	17	Г ₃ , Ж ₁	57–81	70–85
Самарское месторождение	150	10	Г ₂	65–70	80–85
Завьяловское месторождение	200	16	Ж	60–75	75–85
Тентекская свита					
Тентекский (северо-запад)	350	15	Г ₃	41–71	65–84
Тентекский (восток)	170	21	Ж	40–70	64–84



дования все пласты являются опасными по выбросам угля. На нижних горизонтах (в интервале глубин 700–1400 м) по сравнению с верхними горизонтами содержание метана снижается от 91 до 82 %, что компенсируется ростом процентного содержания тяжелых углеводородов от 1–2,8 до 9–12 %, реже до 17 %, которые представлены преимущественно этаном, пропаном, бутаном и изобутаном в соотношении 155:28:1:3. Влияние метаморфизма проявляется в том, что метаноносность пластов увеличивается с глубиной, возрастая от верхнего пласта к нижнему. Наименьшей метаноносностью характеризуются угли пластов верхней группы (K_{20} – K_{15}), наибольшей – нижней подсвиты карагандинской свиты (K_5^3 – K_1). Изменение метаноносности по падению угольных пластов в пределах глубоких горизонтов приводится в табл. 5. Наибольшие средние значения метаноносности зафиксированы в пластах K_5^3 – K_1 , при этом наименьшие значения – в пластах K_{20} – K_{15} , это связано с тем, что при углублении возрастает газовое давление и снижается сорбционная ёмкость угля с увеличением температуры пород. Однако среднее значение метаноносности в пластах Карагандинской свиты находится в пределах от 21,6–25,6 м³/т с.б.м.

Газоносность вмещающих пород

Факторами, определяющими газоносность пластов глубоких горизонтов, являются глубина залегания, степень метаморфизма, состав углей и газовое давление. Среди них наиболее действенным является глубина залегания пластов, за счет которой метаноносность в интервале глубин 700–1400 м повышается на 0,8–3,4 м³/т с.б.м. Угли участка на этой глубине относятся к марке К и в меньшей степени ОС. В связи с тем что угольные пласты на участке залегают глубже 700 м, такие факторы, как покровные отложения, углы падения пластов, нарушенность пластов, утрачивают свою значимость для перераспределения метана, так как он на этих глубинах находится в уравновешенном, почти стабильном состоянии, которое может быть нарушено горными работами или дегазацией угольных пластов и пород.

В породах угленосной толщи содержание газа в сорбированном состоянии крайне ничтожно и зависит в основном от присутствия в них органической массы. Подавляющий же объем свободного газа заполняет поровое пространство в песчаниках и алевролитах. Поэтому количественное содержание газа в породах находится в прямой зависимости от их пористости, а также от давления газа. В табл. 6 показана

Таблица 5

Изменение метаноносности по падению угольных пластов в пределах глубоких горизонтов Карагандинской свиты

Индекс пласта	Метаноносность, м ³ /т с.б.м, на глубинах, м								Среднее значение
	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	
K_{20} – K_{15}	22,4	23,1	23,6	24,0	24,3	24,6	–	–	23,7
	21,6	21,6	–	–	–	–	–	–	21,6
K_{14} – K_{13}	23,0	23,7	24,2	24,6	25,0	25,3	25,5	–	24,5
	23,0	23,8	24,3	–	–	–	–	–	23,7
K_{12}	21,4	21,8	–	–	–	–	–	–	23,7
	23,5	24,2	25,3	25,7	26,0	26,3	–	–	25,1
	24,0	24,4	24,7	24,9	–	–	–	–	24,5
K_{11} – K_9	23,0	23,9	24,7	25,2	25,6	26,0	26,4	26,7	25,2
	22,8	23,2	23,4	23,7	23,9	–	–	–	23,4
K_{7-8}	21,2	–	–	–	–	–	–	–	–
	23,1	23,8	24,3	24,7	25,1	25,4	25,6	25,8	24,8
	22,2	23,5	24,6	25,5	26,5	26,9	–	–	24,9
K_5^3 – K_1	21,6	–	–	–	–	–	–	–	–
	25,6	25,8	26,0	26,1	26,2	26,3	26,4	–	25,6
	23,8	24,4	24,9	25,3	25,6	25,9	26,1	–	25,1

Таблица 6

Газоносность вмещающих пород

Порода	Газоносность, м ³ /т, в интервале глубин, м						Среднее значение
	700–800	800–900	900–1000	1000–1100	1100–1200	1200–1400	
Аргиллиты	2,8	4,2	1,2	2,7	–	–	1,2–4,2
Песчаники	0,03	0,03	0,9	0,08	0,11	0,1	0,03–0,11



газоносность вмещающих пород в интервале глубин от 700 до 1400 м. Наибольшие значения зафиксированы для аргиллита на глубине 800–900 м, а для песчаника – на глубине 900–1000 м.

Определение газоносности вмещающих пород проводилось по пробам, отобранным керногазонаборниками. Результаты исследования проб показали, что породы дегазированы до глубины 250–300 м. Метаноносность их до глубины 800 м не превышает 4 м³/т. Средняя газоносность вмещающих пород составляет 1,3 м³/т. Но даже если принять ее равной 1 м³/т, то содержание метана в песчаниках глубже 300 м составит около 7,4 млрд м³.

В Карагандинском бассейне размеры зон газового выветривания (ЗГВ), достигающие 400 м от поверхности, отличаются крайней невыдержанностью. Средняя метаноносность углей в бассейне составляет 12–15 м³/т, а вмещающих пород – менее 1 м³/т, при максимальной метаноносности соответственно 25–40 и 4 м³/т.

Исследуя вопросы опыта добычи метана, можно прийти к выводу, что Карагандинский угольный бассейн по существу является углегазовым месторождением⁹ [15–17], только здесь сосредоточено от 1 до 4 трлн м³ газа на глубине до 1800 м. Необходимо подчеркнуть, что примерно 500 млн м³ газа ежегодно извлекается из-под земли средствами дегазации, при этом для промышленно-производственных нужд используется лишь 15 % от этого объема, остальное пополняет показатели эмиссии в окружающую среду. Отсутствие единой и надежной методики оценки ресурсов метана не позволяет точно указать их количество, поскольку сказываются разная степень геологической изученности месторождений и разные подходы к самой оценке таких запасов. Между тем признание этого газа как альтернативного источника энергии подтверждается уровнем капиталовложений в проекты по добыче угольного метана по всему миру¹⁰ [5, 18].

Влияние геолого-технологических факторов на перспективность участков

Объем ресурсов метана определяется следующими величинами: общей и промышленной угленосностью месторождения в бассейне, величинами давления газа, природной метаноносностью, температурой пластов, зависящими от глубины (от поверхности и от верхней границы метановых газов), степени метаморфизма угля и в меньшей степени от петрографического состава угля [19].

⁹ Coal Washing & power generation from washery rejects. Coal bed methane 2nd Indo-US Coal Working Group meeting. Washington; 2005; Pashin J. C. Geologic heterogeneity and coal-bed methane production – experience from the Black Warrior Basin. In: Selected Presentations on Coalbed Gas in the Eastern United States. U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1273. Pp. 61–92.

¹⁰ Турабаева Ж. Метановая перспектива Казахстана. Горно-металлургическая промышленность. Алматы; 2019. С. 43. URL: <https://metallmininginfo.kz/archives/6134>

В основных пластах Карагандинской свиты на глубине 400 м количество газа составляет 22–25 м³/т. Увеличение его содержания до 25–27 м³/т происходит в Шерубайнуринском и Тентекском районах. Зона газового выветривания в этих районах находится в пределах глубин 120–175 и 130–160 м соответственно. При этом глубина залегания угольных пластов оказывает существенное влияние на их газоносность. Большинство исследователей пришло к выводу, что газоносность нарастает с глубиной по гиперболическому закону и может быть описана с помощью уравнения Ленгмюра:

$$X = \frac{c(H - H_0)}{1 + b(H - H_0)}, \quad (1)$$

где H – глубина залегания пласта, м; H_0 – глубина поверхности метановой зоны, м; c , b – постоянные для данного пласта коэффициенты.

Давление газа в угольных пластах изучалось ИГД АН КазССР и бывшим КО ВостНИИ [18]. Результаты этих исследований показали, что давление метана возрастает с глубиной по зависимости [19], которая для интервала глубин до 800 м может быть аппроксимирована прямой вида

$$P = 0,1H_y, \text{ кгс/см}^2, \quad (2)$$

где H_y – глубина залегания от условного горизонта, м.

Для различных пластов Карагандинского угольного бассейна величина H_y изменяется в пределах от 200 до 800 м. В работе [19] показано, что газовое давление плавно нарастает с увеличением глубины залегания пласта. Это объясняется тем, что на распределение газа в угленосной толще влияет ряд факторов, среди которых – газовое давление и газопроницаемость.

Геотермический градиент в среднем в Карагандинском угольном бассейне составляет 1,6 °C на 100 м. Это почти в 2 раза меньше, чем среднее значение этого показателя для верхних частей земной коры, но близко по значению этого показателя для карбоновых бассейнов мира. Пористость угля в таких случаях обычно составляет порядка 3–5 %.

Способность угольного массива удерживать значительные объемы газа даже при пониженном пластовом давлении определяется его высокой сорбционной способностью. Этот процесс обусловлен действием слабых межмолекулярных сил, преимущественно сил Ван-дер-Ваальса, которые обеспечивают адсорбцию молекул метана на внутренней поверхности порового пространства угля. Значительные объемы газа могут быть сосредоточены в угле за счет большой внутренней поверхности микропористости [6, 20, 21]. При контроле термобарических условий путем лабораторных исследований построены изотермы сорбции угля. Характерные зависимости давления и сорбционной способности угля, полученные в результате исследований, представлены на рис. 3.

Анализ данных показывает, что наибольшее количество газа может содержать Шерубайнуринский участок, поскольку с ростом давления интенсивней возрастает объем сорбции угля, а наименьшее – Караджаро-Шаханский.

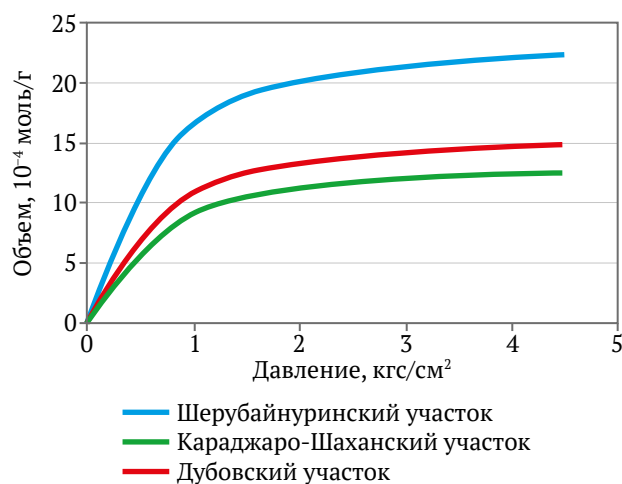


Рис. 3. Изотермы сорбции метана при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

По результатам изучения сорбционной метаноспособности угольных пластов бассейна определены зависимости сорбции углей от давления газа, температуры, петрографического состава углей и влажности. В результате проведенных исследований были получены данные, свидетельствующие о том, что для углей Карагандинского бассейна характерны незначительные изменения степени метаморфизма. Установленный уровень углефикации соответствует III–IV стадии метаморфизма согласно принятым классификациям [22]. Анализ петрографического состава углей Карагандинского бассейна показал, что микрокомпоненты групп витринита V_t и фюзинита F являются основными группами в углях бассейна, их количественные содержания довольно тесно коррелируются ($r = 0,84$). Зависимость между основными группами микрокомпонентов петрографического состава описывается следующим уравнением:

$$F = 76,7 - 0,849V_t, \% \quad (3)$$

где F , V_t – соответственно содержание фюзинита и витринита.

Поэтому петрографический состав оценивается одним из основных ингредиентов – содержанием фюзинита F , который рассчитывается на органическую массу угля, так как сорбируемость минеральной части угля мала.

Все изотермы обрабатывались по уравнению Ленгмюра:

$$X_p = \frac{abP}{1 + bP}, \text{ см}^3/\text{т г. м.} \quad (4)$$

где a и b – коэффициенты уравнения Ленгмюра, соответственно $\text{см}^3/\text{т}$ и $\text{см}^2/\text{кг}$; P – давление, $\text{кгс}/\text{см}^2$.

Определение коэффициентов a и b предусматривало использование метода наименьших квадратов для нормализованного уравнения:

$$\frac{P}{X_p} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a}P. \quad (5)$$

Далее критериальным методом осуществлялся поиск частных зависимостей для значений коэффи-

циентов Ленгмюра a и b от температуры и содержания фюзинита, которые имеют вид:

$$a_t = 33,48 - 0,28t, \text{ м}^3/\text{т г. м.}; \quad (6)$$

$$b_t = 0,1287e^{-1,4715 \cdot 10^{-4}t}, \text{ см}^2/\text{кг}; \quad (7)$$

$$a_F = 12,355 + 0,350 \cdot F, \text{ м}^3/\text{т г. м.}; \quad (8)$$

$$b_F = 0,0956 + 0,000284F, \text{ см}^2/\text{кг}. \quad (9)$$

Согласно методу проф. М.М. Протоdjяконова формула многофакторной зависимости представляет собой произведение частных эмпирических зависимостей, деленное на генеральную среднюю всей совокупности данных, возведенную в степень на единицу меньше числа первичных факторов. Таким образом, $a = f(t, F)$ будет выглядеть следующим образом:

$$a_{F,t} = a_{F \frac{a_F}{a}}, \text{ см}^2/\text{кг}; \quad (10)$$

аналогично $b = f(t, F)$

$$b_{P,t} = b_{t \frac{b_F}{b}}, \text{ см}^2/\text{кг}, \quad (11)$$

где \bar{a} и \bar{b} – соответствующие генеральные средние.

При изучении вещественного состава выяснилось, что газоносность вмещающих пород, к примеру аргиллитов, лишь в единичных случаях превосходит $5\text{ м}^3/\text{т}$, в подавляющем же большинстве она меньше $2\text{ м}^3/\text{т}$. Характерно, что стабилизация газоносности совпадает со стабилизацией их пористости. Так, в зоне выветривания аргиллитов карагандинской свиты, которая распространяется до глубины 300 м, газоносность этих пород имеет минимальные значения.

Газоносность алевролитов и песчаников, определенная по единичным пробам, составляет $4\text{--}5\text{ м}^3/\text{т}$. Эти породы характеризуются хорошей газоотдачей и почти не требуют термовакuumной дегазации. Аргиллиты же освобождаются от газа только в процессе нагревания до температуры $70\text{--}80^{\circ}$ и при глубоком вакуумировании. Последнее обстоятельство разрешает свести к ничтожной величине поступление метана из вмещающих пород в скважины.

Изучение газоносности (метана) на шахтах Промышленного и Саранского участков¹¹ [23] показало, что с увеличением метаморфизма углей в западном направлении (т.е. в сторону Шерубайнуринского угленосного района) увеличивается и газоносность [24]. Установлено также увеличение газообильности с глубиной, что наглядно демонстрирует график на рис. 4. Суммарное количество метана, образованного в процессе метаморфизма угля, имеет примерно следующие значения по стадиям метаморфизма¹²: Г – $212\text{ м}^3/\text{т}$; Ж – $229\text{ м}^3/\text{т}$; К – $270\text{ м}^3/\text{т}$; ОС – $300\text{ м}^3/\text{т}$; Т – 330 м^3 , что не противоречит исследованиям. Таким

¹¹ Натура В.Г., Сиротский Р.Г., Ожогина Т.В. Патент РФ 2601205 Способ определения газоносности угольных пластов. Заявл. 07.08.2015. Оpubл. 27.10.2016.

¹² Ахматнуров Д.Р. Исследование методов интенсификации газоотдачи из неразгруженных угольных пластов. [Дис. ... PhD]. Караганда: Карагандинский государственный технический университет; 2018. С. 142–149. URL: <https://www.kstu.kz/o-zashhite-doktorskoj-dissertatsii-ahmatnurova-denisa-ramilevicha/?lang=ru> (Дата обращения: 08.09.2025).



образом, потенциальные ресурсы газа в угленосной толще Шерубайнуринской синклинали оцениваются как значительные. При этом современный уровень метаноносности в первую очередь определяется не столько генерацией метана, сколько геолого-структурными и фильтрационно-емкостными условиями его миграции и аккумуляции. Для пласта K_7 газоносность увеличивается постепенным образом с глубиной. На первых этапах рост газоносности происходит слабыми темпами из-за значительных трещин, образовавшихся в результате деформации массива пород (блочное расчленение). Для пласта K_{10} газоносность также увеличивается с глубиной, но более резко. Это связано с тем, что газоносность угольных пластов зависит от глубины залегания, степени метаморфизма угля и газового давления.

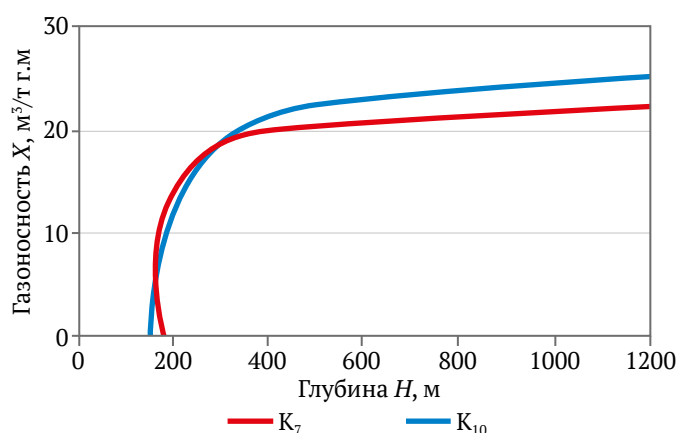


Рис. 4. График изменения газоносности угольных пластов K_7 и K_{10} с увеличением глубины

Данные по угленосности и газоносности карагандинской свиты в пределах шахтных полей 35/36 и 37/38 приведены в геологическом отчете¹³, где они отнесены к объектам, не охваченным газовым опробованием. Ресурсы газа подсчитаны по аналогии с полем шахты «Степная» и сведены в сравнительную табл. 7, которая демонстрирует, что несмотря на одинаковое значение расчетной газоносности по балансовым запасам, всего ресурсов метана по ш.п. 35/36 значительно меньше и составляют менее 0,75 млрд m^3 , по сравнению с ш.п. 37/38, где более 1 млрд m^3 .

По имеющимся данным по Северному участку¹⁴, расположенному к юго-востоку от проектируемого, пласты дегазированы до 140–150 м, что объясняется их довольно крутым залеганием. Установлено, что интенсивный рост газоносности происходит в первые 100 м от поверхности метановой зоны, т.е. до глубины 250 м от дневной поверхности. За этот короткий интервал, что свойственно крутозалегающим толщам, газоносность пластов увеличивается от 2 до 20 $m^3/т г.м$. Глубже градиент ее роста не превышает 1 $m^3/т г.м$ на каждые 100 м погружения и на глубине 1000 м газоносность составляет 24 $m^3/т г.м$. Описанное изменение газоносности характерно для всех пластов, начиная от K_{10} и ниже.

¹³ Ермеков М.А. Газоносность угленосных отложений и газообильность шахт Карагандинского бассейна. [Автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук]. Алма-Ата: Каз. политехн. ин-т; 1963. 63 с.

¹⁴ Ахматнуров Д. Р. Исследование методов интенсификации газоотдачи из неразгруженных угольных пластов. [Дис. ... PhD]. Караганда: Карагандинский государственный технический университет; 2018. С. 142–149. URL: <https://www.kstu.kz/o-zashhite-doktorskoj-dissertatsii-ahmatnurova-denisa-ramilevicha/?lang=ru> (Дата обращения: 08.09.2025).

Таблица 7

Газоносность угольных пластов и углистых пород Карагандинской свиты шахтных полей 35/36 и 37/38 (по данным геологического отчета за 1989 г.)

Показатель		Шахтное поле 35/36	Шахтное поле 37/38
		550	570
Средняя газоносность, $m^3/т$		14,53	14,69
Глубина уровня 10 $m^3/т$, м		318	318
По балансовым запасам	суммарная мощность, м	3,7	3,7
	категория запасов	A+B+C	A+B+C
	запасы углей, тыс. т	28 427	39 508
	расчетная газоносность, $m^3/т$	12,27	12,35
	категория ресурсов газа	P_1	P_1
По забалансовым запасам	запасы углей, тыс. т	348 799	487 924
	запасы углей, тыс. т	10 423	13 886
	категория ресурсов газа	P_2	P_2
	ресурсы газа, тыс. m^3	127 890	171 492
По нерабочим угольным пластам	суммарная мощность, м	2,24	2,24
	категория ресурсов газа	P_3	P_3
	ресурсы газа, тыс. m^3	211 165	295392
По углистым породам	суммарная мощность, м	1,4	1,4
	категория ресурсов газа	P_3	P_3
	ресурсы газа, тыс. m^3	65 989	92310
Всего запасов угля, тыс. т		38 850	53 394
Всего ресурсов метана, тыс. m^3		753 843 (0,75 млрд m^3)	1 047 118 (1,0 млрд m^3)

Суммарные запасы ресурсов метана в отложениях Карагандинской свиты на шахтных полях 35/36 и 37/38 составляют 1,75 млрд м³. Газоносность угольных пластов Ашлярикской свиты на глубине 135–140 м составляет 15–20 м³/т с.б.м. С этой глубины шахта Кировская отнесена к сверхкатегорным по газу, а с глубины 180–200 м пласты А₅, А₇ подвергаются предварительной дегазации. Внезапных выбросов угля и газа не происходило. В пределах проектируемой площади газоносность углей Ашлярикской свиты, как и Карагандинской, не исследовалась.

Определение перспективности участка основано на разработке геологических критериев оценки, заключающихся на анализе глубины залегания, нарушенности, проницаемости и метаноносности угольных пластов для выявления наиболее газонасыщенных участков, которые можно считать перспективными для получения метана из угольной толщи [10]. Критериальный рейтинг перспективности участков заключался в оценке угольных пластов по 10 основным факторам и учитывал влияние влажности, выхода летучих веществ, десорбции метана и проницаемость пласта на различных глубинах. На рис. 5 представлена угленосность свит с учетом общего и рабочего количества пластов, а также их суммарной мощности.

В работе [10] показаны результаты определения проницаемости на исследуемых участках наиболее газонасыщенных пластов в зависимости от глубины. При небольшой разнице в глубинах наблюдается изменение проницаемости пласта в меньшую сторону. Результаты обработки полученных данных проницаемости от глубины залегания представлены на рис. 6.

Анализ данных рис. 6 показывает устойчивую отрицательную корреляцию между глубиной залегания и проницаемостью пластов ($r \approx -0,85$), что объясняется увеличением горного давления и уплотнением породы. Это, в свою очередь, влияет на фильтрационные свойства и десорбционную способность угля. Также выявлена зависимость между газоносностью и степенью метаморфизма: с увеличением содержания фюзинита метаноносность растёт, что подтверждается уравнением регрессии (см. формулу (3)). Данные указывают на приоритетную роль петрографического состава в формировании ресурса метана.

Методика составления оценки исследуемых участков заключается в следующем: для комплексной сравнительной характеристики газонасыщенных угольных участков применён метод факторно-балльной оценки, при котором каждому участку присваиваются баллы по ряду ключевых параметров, отражающих его перспективность в плане метаноносности и дегазации. Каждый параметр оценивается по шкале от 10 до –10 баллов, где 10 соответствует наиболее благоприятному значению, а –10 – наименее благоприятному. Показателю, который влияет негативно, присваивается отрицательное значение. В качестве оцениваемых параметров были приняты проницаемость (газопроницаемость), которая характеризует способность угольного массива пропускать газ. Чем выше проницаемость, тем выше эффективность де-

газации; десорбционная способность, отражающая интенсивность выделения адсорбированного метана из угля; плотность ресурсов, которая оценивает потенциальный объём газа, содержащегося в угольном массиве, в расчёте на единицу площади или объёма; метаноносность, показывающая фактическое содержание метана в угольном массиве, установленное на основе прямых измерений; выход летучих веществ, отражающий содержание органических компонентов в угле и косвенно указывающий на потенциал метанообразования; влажность, характеризующая содержание влаги в угле и породах. Поскольку повышенная влажность затрудняет десорбцию газа, этот фактор рассматривается как негативный и его значение учитывается в расчётах со знаком минус.

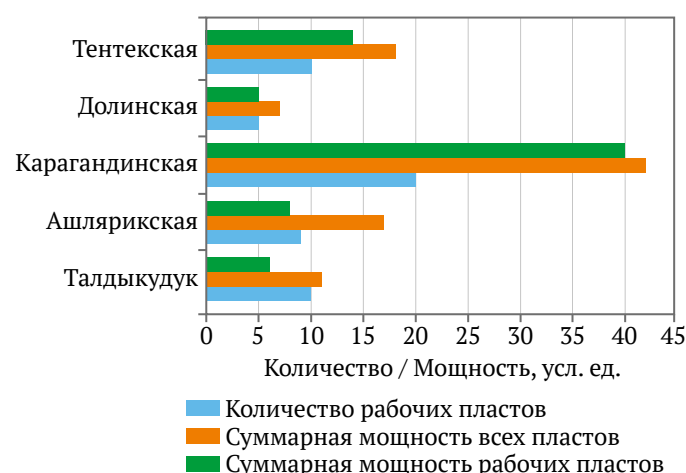


Рис. 5. Угленосность свит угольных пластов Карагандинского бассейна

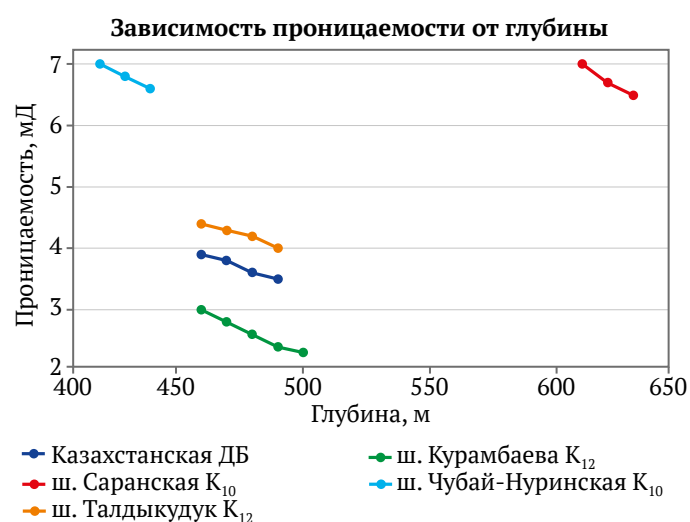


Рис. 6. Влияние глубины залегания угольного пласта на его проницаемость

Источник: Гуревич Ю. С. Извлечение кондиционного метана при подземной разработке угольных месторождений и технологические решения по его использованию. [Дисс. ... докт. техн. наук] М.: МГИ; 1990. 531 с.



Таблица 8

Факторно-балльная оценка исследуемых участков

Исследуемые участки	Присвоенные баллы по различным факторам						Сводные показатели баллов
	Проницаемость	Десорбция	Плотность ресурсов	Метаноносность	Выход летучих	Влажность	
Шерубайнуринский	9	7,5	10	9	9	–6,5	38
Саранский	8	5	10	9	9	–7	34
Талдыкудукский	5	7	10	10	10	–10	32
Промышленный	5	6	10	9,5	9,4	–8	31,9
Тентекский	5	7	6	10	10	–9	29

Итоговая оценка (сводный показатель) для каждого участка определяется арифметическим сложением всех присвоенных баллов с учётом знака для влажности.

Интерпретация результатов: чем выше итоговое значение, тем более перспективен участок с точки зрения потенциальной газоотдачи, технологичности дегазации и условий для эффективной добычи метана. Например, Шерубайнуринский участок имеет наивысшую интегральную оценку (38 баллов), что делает его приоритетным объектом для проведения дегазационных мероприятий и опытно-промышленных работ.

Составленный критериальный рейтинг каждого участка с учетом основополагающих геолого-технологических факторов на основе результатов проведенных исследований (табл. 8) показал, что Шерубайнуринский участок характеризуется хорошей плотностью ресурсов, показателями метаноносности и выхода летучих, однако проигрывает остальным участкам по данным десорбции и влажности. Наиболее перспективными оказались Шерубайнуринский, Саранский и Талдыкудукский участки, наиболее низкие показатели у Тентекского участка.

В отличие от существующих в литературе подходов, основанных на ограниченном наборе геологических параметров (глубина, газоносность, проницаемость), разработанная в настоящем исследовании методика использует расширенный перечень факторов – 10 ключевых признаков, включая петрографические и термодинамические характеристики углей. Это позволяет обеспечить более полную и объективную оценку перспективности участков.

Таким образом, отличительной особенностью настоящего исследования является комбинация методов десорбционного анализа, петрографической оценки и параметрической фильтрации, объединённая в унифицированный алгоритм оценки, пригодный для внедрения в практику проектирования дегазации.

Анализ существующих решений [8, 9] показывает, что большинство из них не учитывают:

- сорбционно-структурных свойств углей (изотермы Ленгмюра),
- влияния микрокомпонентного состава (фюзинит, витринит),
- десорбционных характеристик и влажности пород.

Преимуществом предложенного подхода являются многофакторность оценки, универсальность применения, высокая практическая применимость, повышение точности прогноза – за счёт уточнения уравнений Ленгмюра и внедрения корреляций с содержанием фюзинита и температурой.

Таким образом, научная новизна исследования выражается в разработке и экспериментальном подтверждении интегральной методики оценки участков угольных пластов, позволяющей заменить экспертные, слабоформализованные подходы количественной научно обоснованной методической системой с проверяемыми параметрами.

Выводы

Проведенный анализ современного состояния и мирового опыта в области добычи метана из угольных пластов показал, что отдельными странами достаточно успешно применяются различные технологии добычи метана из угольных пластов.

Карагандинский угольный бассейн по перспективности добычи газа метана условно разделяется на 5 участков. На каждом из них были проведены исследования наиболее газоносных пластов. Установлено, что газоносность углей Карагандинского бассейна закономерно возрастает с глубиной по восходящей ветви S-образной кривой, причём значения метаноносности достигают 25–27 м³/т при глубинах свыше 600 м. В результате исследований определены зоны первого и второго порядка для оценки перспективности добычи метана из угольных пластов. Основными параметрами для классификации этих зон являются: глубина залегания, характеристики проницаемости и десорбции. Газопроницаемость до 10–15 мД можно зафиксировать на глубине 250–300 м.

На основе анализа сорбционной способности угольных пластов Карагандинского бассейна по отношению к метану были установлены параметры корреляционных моделей между сорбцией углей и такими факторами, как давление газа, температурный режим, петрографический состав и уровень влажности. Полученные в ходе исследований результаты указывают на то, что для углей Карагандинского бассейна характерны незначительные изменения степени метаморфизма. Лабораторными исследованиями установлено, что метаноносность возрастает от 21,6 до 26,4 м³/т



при углублении пластов. Впервые для Карагандинского бассейна получены количественные зависимости коэффициентов уравнения Ленгмюра от содержания фюзинита и температуры, позволяющие уточнить параметры изотерм сорбции и повысить точность оценки газоёмкости углей.

По результатам опытно-промышленных испытаний и экспериментальных исследований были научно обоснованы геолого-технологические факторы, характеризующие перспективность участков на извлекаемость метана, такие как: глубина залегания угольных пластов, нарушенность, проницаемость и метаносность. При этом рейтинг перспективности заключался в оценке угольных пластов по 10 основным факторам и учитывал влияние влажности, выхода летучих веществ, десорбции метана и проницаемость пласта на различных глубинах. Итоговая оценка (сводный показатель) для каждого участка была определена арифметическим сложением всех

присвоенных баллов с учётом знака для влажности. Интерпретация результатов показала, что чем выше итоговое значение, тем более перспективен участок с точки зрения потенциальной газоотдачи, технологичности дегазации и условий для эффективной добычи метана. Применение критериального подхода позволило на основе научного подхода и количественных оценок ранжировать участки. Наиболее перспективными признаны Шерубайнуринский (38 баллов), Саранский (34 балла) и Талдыкудукский (32 балла) участки.

Достигнута поставленная цель исследования – сформирована система, позволяющая не только оценить текущую перспективность участков горного отвода, но и прогнозировать эффективность метанодобычи на ранней стадии планирования. Полученные результаты исследования имеют практическое значение как в практике проектирования новых угольных шахт, так и для действующих шахт.

Список литературы / References

1. Пармузин П.Н. *Зарубежный и отечественный опыт освоения ресурсов метана угольных пластов: монография*. Ухта: УГТУ; 2017. 109 с.
Parmuzin P.N. *Foreign and domestic experience in the development of coalbed methane resources: A Monograph*. Ukhta: USTU; 2017. 109 p. (In Russ.)
2. Голицын М.В., Голицын А.М., Пронина Н.В. и др. *Газоугольные бассейны России и мира*. Под ред. В.Ф. Череповского. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, Рос. акад. естеств. наук; 2002. 249 с.
Golitsyn M.V., Golitsyn A.M., Pronina N.V. et al. *Gas-coal basins of Russia and the world*. Ed. by V.F. Cherepovskiy. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Russian Academy of Natural Sciences; 2002. 249 p. (In Russ.)
3. Qin Y., Ye J. A review on development of CBM industry in China. In: *AAPG Asia Pacific Region, Geoscience Technology Workshop. Opportunities and Advancements in Coal Bed Methane in the Asia Pacific*. February 12–13, 2015, Brisbane, Australia. Tulsa: AAPG; 2015.
4. Drizhd N.A., Kamarov R.K., Akhmaturov D.R. et al. Coal bed methane Karaganda basin in the gas balance Republic of Kazakhstan: status and prospects. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017;(1):12–20.
5. Киряева Т.А. Оценка ресурсов метана в Кузбассе с учетом новых представлений о его состоянии в угольном пласте. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012;(5):67–75.
Kiryaeva T.A. Evaluation of methane resources in Kuzbass in the context of new ideas on methane occurrence in coal bed. 2012;(5):67–75. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. (In Russ.)
6. Киринов Б.Ф., Журавлев В.П., Рыжих Л.И. *Борьба с пылевыведением в шахтах*. М.: Недра; 1983. 213 с.
Kirin B.F., Zhuravlev V.P., Ryzhikh L.I. *Dust control in Mines*. Moscow: Nedra; 1983. 213 p. (In Russ.)
7. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Карчевский А.Л. Метод интерпретации данных «Canister test» для определения диффузионно-емкостных параметров угольных пластов на основе решения обратной задачи. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(3):56–68.
Nazarova L.A., Nazarov L.A., Karchevsky A.L. Method of “canister test” data interpretation for determination of coal bed diffusion and capacity parameters based on inverse problem solution. *Mining International and Analytical Bulletin*. 2014;(3):56–68. (In Russ.)
8. Велесевич С.В., Шек В.М. Анализ перспективности участков углегазового месторождения для добычи метана (на примере Воркутинского месторождения). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005;(5):132–137.
Velesovich S.V., Shek V.M. Analysis of the prospects of coal-gas field areas for methane production (case study of the Vorkuta field). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2005;(5):132–137. (In Russ.)
9. Коряга М.Г., Сычев И.И. Методика поисков скоплений метана и выделение площадей, перспективных для его промышленной добычи, в Южном Кузбассе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(3):380–385.
Koryaga M.G., Sychev I.I. A seArch technique for detection of methane accumulation and identification of potential sites for industrial methane mining in southern Kuzbass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(3):380–385. (In Russ.)



10. Мусин Р.А., Асанова Ж.М., Халикова Э.Р. и др. Разработка технологических критериев оценки для выбора перспективных участков добычи угольного метана. *Уголь*. 2024;(4):102–108. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-4-102-108>
Musin R.A., Asanova Zh.M., Khalikova E.R. et al. Development of technological evaluation criteria for the selection of promising coal methane production sites. *Ugol'*. 2024;(4):102–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-4-102-108>
11. Гресов А.И., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б. *Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока России и перспективы ее промышленного освоения. Т. I. Углеметановые бассейны Приморья, Сахалина и Хабаровского края*. Владивосток: Дальнаука; 2009. 247 с.
Gresov A.I., Obzhirov A.I., Shakirov R.B. *Methane resource base of the coal basins of the Russian Far East and prospects for its industrial development. Vol. I. Coal-methane basins of Primorye, Sakhalin and Khabarovsk Krai*. Vladivostok: Dalnauka; 2009. 247 p. (In Russ.)
12. Лу Я. Методика геологического выбора угольного месторождения для добычи метана из угольных пластов в Китае. В: *Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов–2018»*. 10–11 апреля 2018, Москва, Россия, 2018.
Lu Ya. Methodology for geological selection of coal deposits for methane extraction from coal seams in China. In: *International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists “Lomonosov – 2018”*. April 10–11, 2018, Moscow, Russia, 2018. (In Russ.)
13. Ян И., Чэнь Х., Ван Х. и др. Влияние тектонических структур на добычу метана при разработке участка QD угольного бассейна Циньшуй (Китай). *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021;(3):85–95. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210309>
Yan I., Chen H., Wang H. et al. Influence of tectonic structure on methane recovery in QD site in the Qinshui coal basin in China. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2021;(3):85–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210309>
14. Рубан А.Д., Забурдяев В.С. Опыт извлечения и использования шахтного метана в России и ФРГ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2004;(9):153–158.
Ruban A.D., Zaburyaev V.S. Experience in the extraction and utilization of mine methane in Russia and the Federal Republic of Germany. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2004;(9):153–158. (In Russ.)
15. Забурдяев В.С. Метан угольных месторождений: ресурсы, объемы выделения, извлечения и использования. *Горный вестник*. 1994;(1):34–39.
Zaburyaev V.S. Coalbed methane: resources, emission volumes, extraction and utilization. *Gornyy Vestnik*. 1994;(1):34–39. (In Russ.)
16. Золотых С.С., Арнаутков В.С., Сурин Е.В. *Из недр кузбасских кладовых – горючий газ метан. Газпром Добыча Кузнецк*. Кемерово: Кузбассвуиздат; 2015. 247 с.
Zolotых S.S., Arnautov V.S., Surin E.V. *From the depths of Kuzbass storerooms – combustible gas methane. Gazprom Dobycha Kuznetsk*. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat; 2015. 247 p. (In Russ.)
17. Леготин Ф.Я., Ахметова А.Б. Анализ состояния и тенденций развития угледобывающей промышленности Карагандинской области. *Известия УрГЭУ*. 2012;(4):50–53.
Legotin F. Ya., Akhmetova A. B. The analysis of state and trends of development of the coal mining industry in the Karaganda oblast. *Journal of the Ural State University of Economics*. 2012;(4):50–53. (In Russ.)
18. Вольпова Л.С., Токарева С.Г. Об ошибке определения природной газоносности кернагазонаборником КА–61. *Известия вузов. Геология и разведка*. 1973;(5):92–94.
Volpova L. S., Tokareva S. G. On the error in determining natural gas content by the core gas sampler KA-61. *Izvestiya Vuzov. Geologiya i Razvedka*. 1973;(5):92–94. (In Russ.)
19. *Газоносность угольных бассейнов и месторождений СССР. Т. 2. Угольные бассейны и месторождения Сибири, Казахстана и Дальнего Востока*. Под ред. А.И. Кравцова. М.: Недра; 1979. 454 с.
Gas content of coal basins and deposits of the USSR. Vol. 2. Coal Basins and Deposits of Siberia, Kazakhstan and the Far East. Ed. by A.I. Kravtsov. Moscow: Nedra; 1979. 454 p. (In Russ.)
20. Дрижд Н.А., Мусин Р.А., Александров А.Ю., Рабатулы М. Опыт бурения наклонно-направленной скважины для добычи метана угольных пластов. *Горный журнал Казахстана*. 2019;(12):19–23.
Drizhd N.A., Musin R.A., Aleksandrov A. Yu., Rabatuly M. Experience in drilling a directional well for coalbed methane production. *Gornyy Zhurnal Kazakhstana*. 2019;(12):19–23. (In Russ.)
21. Пашенков П.Н. Способ определения параметров изотермы сорбции Ленгмюра и газопрооницаемости дисперсных фракций угля. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(3):120–128.
Pashchenkov P.N. Method to determine parameters of Langmuir isotherm and gas permeability of dispersed coal particles. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(3):120–128. (In Russ.)
22. Сластунов С.В. Проблемы добычи угольного метана и перспективные технологические решения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1997;(6):25–31.
Slastunov S.V. Problems of coal methane production and promising technological solutions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 1997;(6):25–31. (In Russ.)



23. Шубина Е.А., Лукьянов В.Г. Изучение природной газоносности с целью развития добычи метана из угольных пластов в промышленных масштабах. *Вестник КузГТУ*. 2016;(1):3–12.
Shubina E.A., Lukyanov V.G. Study of natural gas content for the development of coal seam methane production on an industrial scale. *Vestnik KuzGTU*. 2016;(1):3–12. (In Russ.)
24. Дрижд Н.А., Рабатулы М., Александров А.Ю. и др. Результаты освоения опытно-промышленных скважин на Шерубайнуринском участке Карагандинского угольного бассейна. *Уголь*. 2020;(6):36–40. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-36-40>
Drizhd N.A., Rabatuly M., Aleksandrov A.Yu. et al. The results of the development of pilot wells in the Sherubainurinsky site of the Karaganda coal basin. *Ugol'*. 2020;(6):36–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-36-40>

Информация об авторах

Равиль Альтавич Мусин – ассоциированный профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан; ORCID [0000-0002-1206-6889](https://orcid.org/0000-0002-1206-6889), Scopus ID [7005446397](https://orcid.org/7005446397); e-mail R.A.Mussin@mail.ru

Наталья Анатольевна Немова – старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, Институт горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5050-611X](https://orcid.org/0000-0002-5050-611X), Scopus ID [56995813200](https://orcid.org/56995813200); e-mail fpvgn@misd.ru

Денис Рамильевич Ахматнуров – руководитель лаборатории, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан; ORCID [0000-0001-9485-3669](https://orcid.org/0000-0001-9485-3669), Scopus ID [57194187849](https://orcid.org/57194187849); e-mail d_akhmatnurov@mail.ru

Наиль Мансурович Замалиев – ассоциированный профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан; ORCID [0000-0003-0628-2654](https://orcid.org/0000-0003-0628-2654); e-mail Nailzamaliyev@mail.ru

Эдвард Дмитриевич Решетняков – инженер кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан; ORCID [0009-0000-1128-2056](https://orcid.org/0009-0000-1128-2056); e-mail vip_red2001@gmail.com

Александр Владиславович Резник – старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ, Институт горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-0077-3404](https://orcid.org/0000-0002-0077-3404); e-mail a-reznik@mail.ru

Information about the authors

Ravil A. Mussin – Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan; ORCID [0000-0002-1206-6889](https://orcid.org/0000-0002-1206-6889), Scopus ID [7005446397](https://orcid.org/7005446397); e-mail R.A.Mussin@mail.ru

Natalia A. Nemova – Senior Researcher of the Open-Pit Mining Laboratory, N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5050-611X](https://orcid.org/0000-0002-5050-611X), Scopus ID [56995813200](https://orcid.org/56995813200); e-mail fpvgn@misd.ru

Denis R. Akhmatnurov – Head of the Laboratory, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan; ORCID [0000-0001-9485-3669](https://orcid.org/0000-0001-9485-3669), Scopus ID [57194187849](https://orcid.org/57194187849); e-mail d_akhmatnurov@mail.ru

Nail M. Zamaliyev – Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan; ORCID [0000-0003-0628-2654](https://orcid.org/0000-0003-0628-2654); e-mail Nailzamaliyev@mail.ru

Edvard D. Reshetnyakov – Engineer of the Department of Mineral Deposits Development, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan; ORCID [0009-0000-1128-2056](https://orcid.org/0009-0000-1128-2056); e-mail vip_red2001@gmail.com

Alexander V. Reznik – Senior Researcher of the Open-Pit Mining Laboratory, N.A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-0077-3404](https://orcid.org/0000-0002-0077-3404); e-mail a-reznik@mail.ru

Поступила в редакцию

26.06.2025

Received

26.06.2025

Поступила после рецензирования

31.07.2025

Revised

31.07.2025

Принята к публикации

01.08.2025

Accepted

01.08.2025



РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-460>

УДК 622.271.4

**Обоснование рациональной области и технологии применения гидравлических экскаваторов на открытых горных работах**

В.А. Хакулов¹ , В.А. Шаповалов¹ , В.Н. Игнатов² , Ж.В. Карпова³ ,
М.В. Игнатов¹ , И.А. Ногеров¹

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Российская Федерация

² Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова,
г. Новочеркасск, Российская Федерация

³ ООО НИПИ «Недра», г. Новочеркасск, Российская Федерация

vkh21@yandex.ru

Аннотация

Стеснённые условия отработки глубоких горизонтов карьера и наличие жёсткой технологической связи между продвижением горных работ на нижних и верхних горизонтах существенно усложняют работу погрузочно-транспортных комплексов и, в частности, не позволяют эффективно использовать мощные канатные карьерные экскаваторы. В то же время мобильные гидравлические экскаваторы из-за ограниченного ресурса и резкого падения надёжности после 7–10 лет службы не выдерживают конкуренции с карьерными механическими лопатами при разработке тяжёлых скальных пород. В результате проведения исследований и промышленных экспериментов были установлены и апробированы комбинированные решения по использованию канатных и гидравлических экскаваторов в своих рациональных областях для эффективного применения на горном производстве. Предлагаемая область приоритетного применения гидравлических экскаваторов определяется в зонах планируемой низкой концентрации буровзрывных работ, где коэффициент использования канатных экскаваторов составляет менее 0,5, а мобильных гидравлических – при условии специального геомеханического обеспечения – не менее 0,7. В то же время гидравлические экскаваторы напрямую не могут конкурировать с мощными карьерными механическими лопатами при отработке тяжёлых скальных пород. Поэтому предлагается специальная технология внутриблоковой дифференциации параметров буровзрывных работ, которая решает задачу геомеханического обеспечения эффективного внедрения гидравлических экскаваторов в горном производстве.

Ключевые слова

коэффициент вскрыши, угол наклона борта карьера, погрузочно-транспортные комплексы, дифференциация параметров буровзрывных работ, мониторинг процесса экскавации, интеллектуальные комплексы мониторинга, ритмичность отгрузки горной массы, канатный экскаватор, гидравлический экскаватор, обратная лопата

Для цитирования

Khakulov V.A., Shapovalov V.A., Ignatov V.N., Karpova Zh.V., Ignatov M.V., Nogerov I.A. Justification of the rational scope and technology for the use of hydraulic excavators in surface mining. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):338–345. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-460>

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research paper

Justification of the rational scope and technology for the use of hydraulic excavators in surface mining

V.A. Khakulov¹ , V.A. Shapovalov¹ , V.N. Ignatov² , Zh.V. Karpova³ ,
M.V. Ignatov¹ , I.A. Nogerov¹

¹ Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russian Federation

² Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

³ NIPi Nedra LLC, Novocherkassk, Russian Federation

vkh21@yandex.ru

Abstract

The constrained conditions of deep-pit mining and the rigid technological interdependence between operations on lower and upper horizons significantly complicate the performance of loading and haulage systems and, in particular, hinder the efficient use of large rope shovels. At the same time, due to a limited service life and a sharp



decline in reliability after 7–10 years of operation, mobile hydraulic excavators cannot compete with mechanical shovels when excavating hard rock formations. Based on research and industrial experiments, combined solutions have been developed and tested for the use of rope and hydraulic excavators within their respective optimal application areas to improve the efficiency of mining operations. The proposed priority application zone for hydraulic excavators is defined in areas with a planned low concentration of drilling-and-blasting operations, where the utilisation factor of rope shovels is below 0.5, while that of mobile hydraulic excavators – with appropriate geomechanical support – is at least 0.7. At the same time, hydraulic excavators cannot directly compete with large mechanical shovels in the development of hard rock. Therefore, a specialised technology for within-block differentiation of drilling and blasting parameters is proposed to ensure the geomechanical conditions necessary for the effective integration of hydraulic excavators into mining operations.

Keywords

stripping ratio, pit slope angle, loading and haulage systems, differentiation of drilling and blasting parameters, excavation process monitoring, intelligent monitoring systems, rock mass loading uniformity, rope shovel, hydraulic excavator, backhoe

For citation

Khakulov V.A., Shapovalov V.A., Ignatov V.N., Karpova Zh.V., Ignatov M.V., Nogerov I.A. Justification of the rational scope and technology for the use of hydraulic excavators in surface mining. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):338–345. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-460>

Введение

С увеличением глубины разработки резко возрастает коэффициент вскрыши, существенно снижающий рентабельность горного производства [1–3]. Наиболее эффективным решением некоторой стабилизации объемов вскрыши с глубиной разработки [4, 5] является поддержание относительно большого угла наклона борта карьера [6, 7]. Данному решению препятствуют два фактора – это ограничения, связанные с устойчивостью борта карьера, и резкое снижение производительности погрузочно-транспортных комплексов в составе мощных карьерных канатных экскаваторов [8, 9]. Для обеспечения на глубоких горизонтах карьеров высокопроизводительной работы оборудования при минимальном текущем коэффициенте вскрыши горные работы ведутся рабочими зонами концентрации, перемещаемыми по высоте борта карьера¹ [10]. Эта технология с относительно широкими рабочими площадками в зонах концентрации обеспечивает большую загрузку производительных горных комплексов отбитой горной массой. В то же время процедура перемещения этих зон по высоте борта карьера связана с трудоемкой консервацией (расконсервацией) участка борта карьера. Дополнительные сложности вызывает наличие жесткой технологической связи, когда продвижение горных работ на нижних горизонтах зависит от продвижения горных работ на верхних горизонтах. Стесненные условия не позволяют эффективно использовать мощные канатные карьерные экскаваторы. Поэтому относительно успешно применяя мобильные гидравлические экскаваторы напрямую не могут конкурировать с мощными карьерными механическими лопатами, особенно при отработке тяжелых скальных пород [11].

Очевидно, что это мобильная, но менее приспособленная техника для тяжелых горнотехнических условий имеет более низкий ресурс с резким снижением

ем надежности после 7–10 лет эксплуатации. В то же время на фоне общих тенденций продвижения горного оборудования большой единичной мощности при отработке глубоких карьеров появляются зоны рационального использования мобильных гидравлических экскаваторов. Поэтому исследования обоснования рациональной области и технологии применения гидравлических экскаваторов на горно-обогатительных предприятиях являются весьма актуальными.

Известен ряд подходов, направленных на повышение эффективности применения гидравлических экскаваторов. В работе П. Булеса² выполнено обоснование оптимальных сроков эксплуатации основных агрегатов и систем карьерных гидравлических экскаваторов для продления их эксплуатации. В то же время это обоснование не затронуло технологические особенности условий эксплуатации гидравлических экскаваторов и их применения. Очевидно, что без технологической адаптации гидравлические экскаваторы остаются менее приспособленной техникой для тяжелых горнотехнических условий.

Другое направление исследований затрагивает совершенствование горной технологии. В частности, в работе Е. В. Логинова³ представлена идея управления эксплуатационным коэффициентом вскрыши при использовании гидравлических экскаваторов типа обратная лопата в углубочных системах разработки. Использование вместо канатных гидравлических экскаваторов типа обратная лопата при отработке глубоких горизонтов карьера обеспечивает минимальную ширину рабочей площадки. В результате формируется более крутой угол борта карьера, которому соответствует более низкое (на 10 %) значение эксплуатационного коэффициента вскрыши.

¹ Исайченков А.Б. Оптимизация сопряженно выполняемых технологических процессов вскрышных работ при применении современных экскаваторно-автомобильных комплексов» (на примере разреза «Тугнуйский»). [Дисс. ... к-та техн. наук]. Москва: ИПКОН РАН; 2016. 231 с.

² Булес П. Обеспечение надежности работы карьерных гидравлических экскаваторов при их эксплуатации на открытых разработках России. [Дисс. ... к-та техн. наук]. М.: НИТУ МИСИС; 2016.

³ Логинов Е.В. Управление эксплуатационным коэффициентом вскрыши при использовании гидравлических экскаваторов типа обратная лопата в углубочных системах разработки. [Дисс. ... к-та техн. наук]. С-Пб: СПбГУ; 2018.



В то же время с глубиной разработки коэффициент вскрыши неизбежно растет [12–14]. Для обеспечения эффективности горного производства необходимы комбинированные решения использования канатных и гидравлических экскаваторов в своих рациональных областях применения. Необходимо учитывать меньшую приспособленность гидравлических экскаваторов для отработки сложных скальных пород. На снижение эффективности загрузки ковша в сложных скальных породах влияет соотношение между шириной ковша и его емкостью. Этот параметр у гидравлических экскаваторов значительно больше, чем у канатной механической лопаты такой же емкости, более того, кинематическая схема, реализованная в конструкции обратных лопат, обеспечивает существенно меньшее усилие копания. Сравнивая вооружение гидравлических экскаваторов «прямая» и «обратная лопата», следует отметить, что прямая и обратная лопата отличаются усилиями напора и усилиями отрыва. Так, модели карьерных гидравлических экскаваторов производства компании Komatsu Mining Germany (KMG) с вооружением «обратная лопата» имеют на 20–30 % меньшее усилие напора и на 8–22 % меньшее усилие отрыва⁴.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является обоснование рациональной области и технологии применения гидравлических экскаваторов.

Задачи исследования:

- адаптация гидравлических экскаваторов к тяжелым горно-геологическим условиям эксплуатации;
- обоснование рациональных областей применения гидравлических экскаваторов и повышение их надежности и конкурентоспособности в сравнении с канатными карьерными экскаваторами.

Сформулированные задачи решаются на основе организации мониторинга процесса экскавации с выделением геомеханической составляющей для корректировки районирования пород по взрываемости, корректировки технологии ведения буровзрывных работ и применяемого оборудования, а также корректировки графика планово-предупредительных работ.

В качестве методов исследования использовались: сравнительный анализ (сопоставление эффективности канатных и гидравлических экскаваторов); аналитическое моделирование (расчет параметров); инструментальный мониторинг (акселерометры, гироскопы, GPS для анализа процесса экскавации); полевой эксперимент (апробация на карьерах Кабардино-Балкарской республики (КБР) и Ростовской области; дистанционные методы (беспилотная аэрофотосъемка для анализа структуры массива); метод машинного обучения экспертной модели прогноза вместимости скважин в зависимости от характеристики бурового шлама.

В данной работе продвигается главная идея, что конструкция канатных экскаваторов имеет оборудование, менее зависящее от геомеханической составляющей, и рассчитано на большой срок эксплуатации, но есть области применения, где оно неэффективно. В настоящей работе обосновывается необходимость создания комбинированной технологии, в рамках которой канатные и гидравлические экскаваторы успешно дополняют друг друга. Учитывая, что гидравлические экскаваторы имеют ограниченный ресурс и в процессе эксплуатации их надежность падает, область эффективного их применения становится менее очевидной. Например, скальные и абразивные породы требуют геомеханического обеспечения гидравлических экскаваторов другого уровня. Часто дробление удовлетворяет критериям производительной работы мехлопаты, но недостаточно для гидравлической обратной лопаты. Таким образом, несмотря на то что гидравлические экскаваторы успешно используются в строительной индустрии, для их эффективного переноса в горное производство нужна системная адаптация, затрагивающая техническую, технологическую и геомеханическую составляющие. Частичная адаптация, затрагивающая отдельные составляющие, в полной мере проблему не решает. Так, мероприятия по повышению надежности экскаваторов за счет более частой замены агрегатов, подвергающихся повышенному износу, без учета геомеханической составляющей не могут быть эффективными. Изменчивость структурных и прочностных свойств обрабатываемых массивов горных пород определяет геомеханическую составляющую влияния на износ оборудования, которая постоянно меняется вместе с наработкой на отказ агрегатов и оборудования в парке экскаваторов. Поэтому для системного решения проблемы повышения эффективности горного производства необходим мониторинг геомеханической составляющей, информационно обеспечивающий: корректировку районирования пород по взрываемости; корректировку технологии и применяемого оборудования; корректировку графика планово-предупредительных работ.

Основные теоретические положения

Главной методической проблемой является разделение технологической и геомеханической составляющих потерь производительности оборудования. Эта проблема авторами решена в более ранних исследованиях на основе использования интеллектуального модуля мониторинга процесса экскавации, который включает акселерометр, гироскоп, барометр, магнитометр, GPS и датчик температуры. Данный модуль в ударопрочном корпусе крепится магнитами на соединении рукояти с ковшом экскаватора. В частности, наличие акселерометра в составе измерительного модуля через измерение проекций силы гравитации на оси координат обеспечивает распознавание основных и вспомогательных технологических операций экскаватора, фиксацию во времени и пространстве положения ковша. Аппаратные средства и методика мониторинга процесса экскавации успешно прошли апробацию на карьерах КБР и Ростовской области (2019–2022 гг.) [15].

⁴ Булес П. Обеспечение надежности работы карьерных гидравлических экскаваторов при их эксплуатации на открытых разработках России. [Дисс. ... к-та техн. наук]. М.: НИТУ МИСИС; 2016.

Фиксация в пространстве операции цикла, а также изменения времени наполнения, величины наполнения ковша в совокупности с результатами анализа фактических параметров буровзрывных работ позволяет судить об изменении структурных и прочностных свойств. То есть данное техническое решение обеспечивает мониторинг процесса экскавации с выделением геомеханической составляющей для корректировки районирования пород по взрываемости, корректировки технологии и применяемого оборудования, корректировки графика плано-предупредительных работ.

Предлагается область приоритетного применения гидравлических экскаваторов устанавливать в зонах планируемой низкой концентрации буровзрывных работ. Как видно из рис. 1, именно в зонах низкой концентрации буровзрывных работ с объемами массовых взрывов 20–40 тыс. м³ коэффициент использования оборудования составляет менее 0,5. Эта область крайне низкого использования канатных экскаваторов.

Предлагаемая технология комбинированного использования канатных и гидравлических экскаваторов основана на совершенствовании технологического районирования по категориям взрываемости пород. Она предусматривает, с одной стороны, концентрацию взрывных работ на участках для высокоэффективного применения канатных экскаваторов. С другой стороны, для гидравлических экскаваторов выделяются зоны, где концентрация взрывных работ технологически нецелесообразна или невозможна.

Наибольшую сложность вызывают массивы скальных, абразивных горных пород, в том числе нарушенные как подземными [16, 17], так и открытыми горными

работами, требующие для эффективного применения гидравлических экскаваторов другого уровня геомеханического обеспечения. В условиях, когда дробление удовлетворяет критериям производительной работы мехлопаты, но недостаточно для гидравлической обратной лопаты, требуется переход на скважины меньшего диаметра с увеличением объема бурения. При этом необходимо учитывать, что трещиноватые массивы горных пород при взрыве разваливаются на естественные отдельности и дополнительное увеличение расхода взрывчатых веществ (ВВ) качества дробления не улучшает. Для реального сравнительного анализа технологий, использующих разное буровое и погрузочное оборудование, производительность буровых станков оценивается по отбитой горной массе.

Значительные затруднения вызывают трещиноватые массивы с включениями крупноблочных скальных отдельностей, когда в пределах одного взрывного блока меняется не только взрываемость горных пород, но и вместимость скважин, в них пробуренных. Например, в трещиноватых породах с наличием зияющих трещин вместимость скважин, пробуренных долотом диаметром 243 мм, для гранулированных ВВ может превышать 59 кг/м. Для монолитных пород этот показатель составляет около 45–47 кг/м. Повышенная вместимость отрицательно сказывается на размещении колонки заряда [18, 19], которая на 15–20 % смещается в нижнюю часть скважины. Таким образом, скважинный заряд сосредоточивается в перебуре, ухудшая дробление в верхней части уступа, что приводит к нарушению подошвы нижележащего уступа и к дополнительным потерям скважин из-за искусственной трещиноватости.

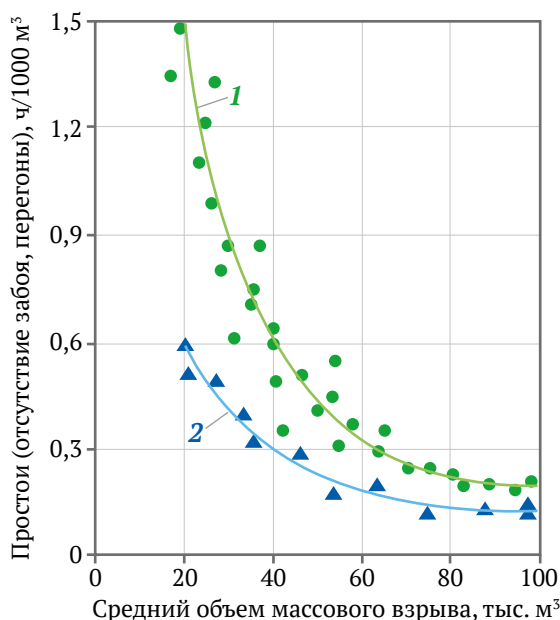


Рис. 1. Сравнительный анализ влияния концентрации буровзрывных работ на величину технологических простоев канатного и гидравлического экскаваторов: 1, 2 – изменение технологических простоев канатного экскаватора ЭКГ-4.6 и гидравлического экскаватора Hyundai R520LC-9S, связанных с перегонами и отсутствием горной массы соответственно

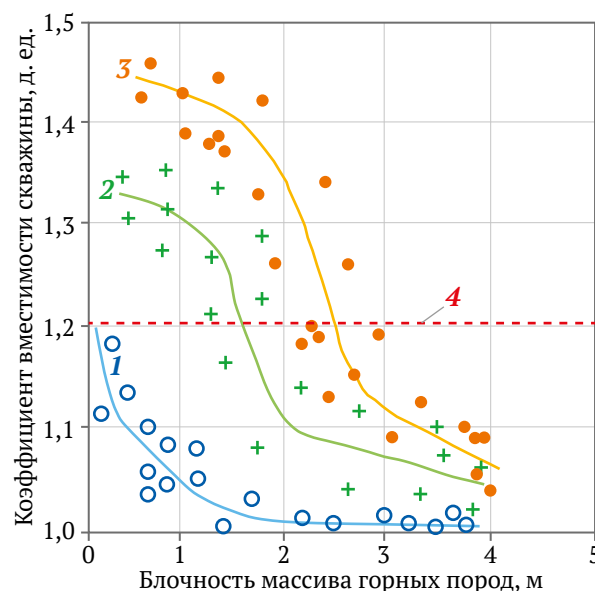


Рис. 2. Зависимость изменения вместимости взрывных скважин от структурных свойств массивов горных пород: 1 – трещиноватые массивы, характеризующиеся сомкнутыми трещинами; 2 – трещиноватые массивы с наличием раскрытых либо заполненных рыхлым материалом трещин; 3 – трещиноватые массивы с зияющими трещинами; 4 – граница управляемого взрывного дробления

Для устранения проблемы хаотического смещения колонки зарядов в нижнюю часть скважин проводят отдельные исследования по районированию. Устанавливают рациональные параметры буровзрывных работ трещиноватой и крупноблочной частей блока, а также уточняют зависимости изменения вместимости скважин от структурных свойств массивов горных пород (рис. 2). Для типов пород устанавливают размер характерного класса крупности, представляющего нижнюю границу крупных фракций шлама, выход которых характеризует блочность массива. Например, значение размера характерного класса для роговиков Тырныаузского месторождения составляет 5–10 мм.

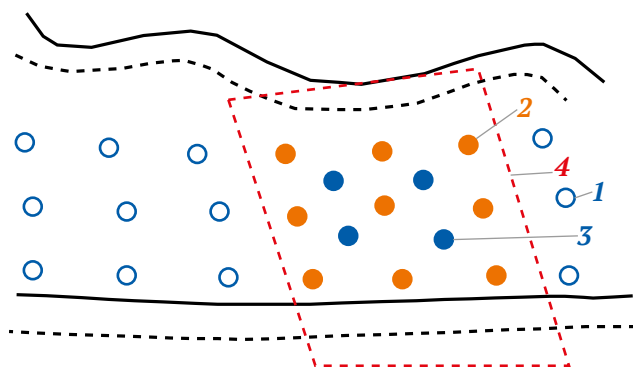


Рис. 3. Технологическая схема дифференциации параметров взрывной отбойки на участках с повышенной изменчивостью структуры массивов горных пород: 1, 2 – скважины, пробуренные по результатам проекта на бурение по блоку (1 – по результатам мониторинга идентифицированы как пробуренные в трещиноватом массиве, 2 – по результатам мониторинга идентифицированы как пробуренные в монолитном массиве); 3 – дополнительные скважины, пробуренные по результатам корректировочного расчета; 4 – зона локализации крупноблочных массивов, установленная по результатам мониторинга



Рис. 4. Обуренный блок, снятый с беспилотного летательного аппарата с выделением зоны, перспективной для дифференциации параметров взрывной отбойки

В проект на бурение закладывают параметры, актуальные для наиболее трещиноватой части блока (рис. 3 – позиции 1 и 2). После завершения бурения запроектированных на блоке скважин по выходу и крупности бурового шлама производят локализацию трудно дробимых участков. Скважины, пробуренные в трудно дробимых участках массива, имеют гладкие, без вывалов стенки и резко контрастирующую характеристику шлама (значительный выход шлама в основном характерного размера). Напротив, скважины, пробуренные в трещиноватой части блока, имеют неровные стенки с вывалами и зияющими трещинами, с незначительным выходом шлама, который имеет размеры, существенно превышающие установленные характерные значения.

Необходимо отметить, что эффективность этой достаточно несложной технологии имеет большую зависимость от «человеческого» фактора. В частности, отрицательно сказывается на результатах районирования пород по категориям трещиноватости и взрываемости значительный удельный вес визуальной характеристики состояния скважин, затрудняющий перепроверку и постобработку. С целью устранения этого существенного недостатка предлагается фиксация характеристики положения и состояния устьев скважин с беспилотного летательного аппарата для автоматизированного выделения перспективных зон и дифференциации параметров взрывной отбойки в пределах взрывного блока (рис. 4).

Задача корректировки районирования массивов горных пород по взрываемости решается на основе мониторинга с помощью интеллектуальных моделей и системного анализа результатов процессов горных работ, фактических параметров, показателей промышленных взрывов, привязанных к анализируемой локации массива горных пород.

Предлагаемая технология на участках с повышенной изменчивостью структуры массивов горных пород реализуется в два этапа:

- на первом этапе бурение осуществляют в соответствии с проектом, использующим параметры, актуальные для наиболее трещиноватой части блока;

- на втором этапе на локализованных участках трудно взрываемых массивов по центру относительно каждой четырех ранее пробуренных скважин дополнительно бурятся 1–2 взрывные скважины.

Методика расчета параметров буровзрывных работ

Повышенный расход ВВ для разрушения труднодробимых массивов горных пород требует дополнительных буровых работ, объем которых определяется из выражения, п. м [18]:

$$L_{\text{бд}} = \frac{(q_{\text{вв}} - q_{\text{р}})V_{\text{т}}}{Pk_{\text{и}}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{вв}}$ – удельный расход ВВ, требуемый для дробления крупноблочной части блока, кг/м³; $q_{\text{р}}$ – удельный расход ВВ по данным районирования для трещиноватой части блока, кг/м³; $V_{\text{т}}$ – объем труднодробимой части блока, м³; $k_{\text{и}}$ – коэффициент использования



скважины, д. ед.; P – вместимость скважин на крупноблочной части блока, определяемая из выражения, кг/м [18]:

$$P = k_1 + k_2 \frac{V_{\text{шл}}}{C_x}, \quad (2)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности, актуальные для определенного типа горных пород; $V_{\text{шл}}$ – выход шлама из скважины, пробуренной в труднодробимых участках, %; C_x – содержание наиболее характерных классов крупности буровой мелочи, %.

Для масштабирования технологии внутриблоковой дифференциации параметров буровзрывных работ необходимы предварительные исследования типов горных пород для установления взаимосвязей между характеристикой шлама и вместимостью пробуренных скважин. Наиболее трудоемкой операцией является определение таких параметров, как выход шлама и содержание наиболее характерных классов крупности буровой мелочи, фактическая вместимость по скважинам блока.

Следует отметить, что без достоверного прогнозирования показателя вместимости скважин невозможно эффективное проектирование буровзрывных работ. Для повышения надежности и оперативности разработан метод машинного обучения. Создана модель машинного обучения с базой данных, включающей изображения (фотографии) высокого разрешения скважин блока и фактическую вместимость скважин, полученную экспериментально в процессе зарядки. Обязательным элементом обучения является сравнение прогнозного значения с реальными данными. Кроме того, обязательным этапом является те-

стирование модели на данных по очередному блоку. Разработана технология съемки блока с беспилотника и лазерного сканирования, которая обеспечивает информационную поддержку самосовершенствующейся в процессе машинного обучения методом кластеризации модели прогнозирования вместимости скважин по характеристике бурового шлама. В результате решается наиболее трудоемкая составляющая внедрения технологии внутриблоковой дифференциации параметров буровзрывных работ.

Заключение

В результате проведения исследований и промышленных экспериментов разработаны и апробированы комбинированные решения по использованию канатных и гидравлических экскаваторов в рациональных для каждого типа областях применения для повышения эффективности горного производства. Область приоритетного применения гидравлических экскаваторов определяется в зонах с планируемой низкой концентрацией буровзрывных работ, где коэффициент использования канатных экскаваторов составляет менее 0,5, а коэффициент использования мобильных гидравлических экскаваторов – не менее 0,7. В то же время гидравлические экскаваторы не могут напрямую конкурировать с мощными карьерными механическими лопатами, особенно при отработке тяжелых скальных пород. Для решения этой проблемы предлагается специальная технология внутриблоковой дифференциации параметров буровзрывных работ, обеспечивающая геомеханические условия для эффективного внедрения гидравлических экскаваторов в горном производстве.

Список литературы / References

1. Blom M., Pearce A.R., Stuckey P.J. Short-term planning for open pit mines: a review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019;33(5):318–339. <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1448248>
2. Nehring M., Knights P.F., Kizil M. S., Hay E. A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing and conveying, and truck/shovel systems. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;28(2):205–214. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.12.026>
3. Анистратов К.Ю. Техничко-экономическое обоснование эффективности применения карьерных экскаваторов ЭКГ-18 с речным напором ПАО «Уралмашзавод» на угольных разрезах. *Горная промышленность*. 2016;(5):18–23.
Anistratov K.Yu. Feasibility Study of the Efficiency of Using EKG-18 Rack-and-Pinion Crowd Mining Excavators Manufactured by PJSC “Uralmashplant” in Coal Open-Pit Mines. *Russian Mining Industry*. 2016;(5):18–23. (In Russ.)
4. Demirel N., Taghizadeh A., Khouri S., Tyuleneva E. Optimization of the excavator-and-dump truck complex at open pit mines—the case study. In: *IIIrd International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conferences*. 2018;41:01006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101006>
5. Kuznetsov D., Kosolapov A. Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment. *Transportation Research Procedia*. 2022;63:1042–1048. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.104>
6. Макаров В.Н., Анистратов К.Ю. Достижение наивысших рекордных показателей месячной производительности экскаваторов ЭКГ-18 на разрезах ЗАО «Стройсервис». *Уголь*. 2019;(1):20–26. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-1-20-26>
Makarov V.N., Anistratov K.Yu. Achievement of the highest record indicators of the monthly production of EKG-18 excavators at open-pit mines of “Stroysservice” JSC. *Ugol’*. 2019;(1):20–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-1-20-26>
7. Upadhyay S.P., Askari-Nasab H. Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;28(2):153–166. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.12.003>



8. Дерябин С.А., Рзазаде У.А., Кондратьев Е.И., Темкин И.О. Мета модель архитектуры системы автономного управления транспортно-технологическими процессами в карьере. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(3):117–129. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_3_0_117
Deryabin S.A., Rzazade U.A., Kondratyev E.I., Temkin I.O. Metamodel of autonomous control architecture for transport process flows in open pit mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(3):117–129. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_3_0_117
9. Samavati M., Essam D., Nehring M., Sarkeret R. A local branching heuristic for the open pit mine production scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 2017;257(1):261–271. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.004>
10. Samavati M., Essam D., Nehring M., Sarkeret R. A new methodology for the open-pit mine production scheduling problem. *Omega*. 2018;81:169–182. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.10.008>
11. Хакулов В.А., Шаповалов В.А., Игнатов В.Н. и др. Обоснование рациональной технологии и области применения на карьерах гидравлических экскаваторов типа обратная лопата. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(8):112–127. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_8_0_112
Khakulov V.A., Shapovalov V.A., Ignatov V.N. et al. Rational technology and application domain of hydraulic backhoes in open pit mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(8):112–127. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_8_0_112
12. Moreno E., Rezakhah M., Newman A., Ferreira F. Linear models for stockpiling in open-pit mine production scheduling problems. *European Journal of Operational Research*. 2017;260(1):212–221. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.014>
13. Rais K., Kara M., Gadri L. et al. Original approach for the drilling process optimization in open cast mines; case study of Kef Essenoun open pit mine Northeast of Algeria. *Mining Science*. 2017;24:147–159. <https://doi.org/10.5277/msc172409>
14. Brown C. Autonomous vehicle technology in mining. *World of Mining Professionals*. 2012;(1):30–32.
15. Хакулов В.А., Шаповалов В.А., Игнатов В.Н. и др. Совершенствование методологии мониторинга геомеханического состояния и трансформации свойств массивов горных пород для обеспечения безопасности и эффективности геотехнологии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9):68–83. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_5_1_20
Khakulov V.A., Shapovalov V.A., Ignatov V.N. et al. Improvement of geotechnology based on monitoring and zoning of the geomechanical state of rock massifs. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9):68–83. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_5_1_20
16. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
17. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Irina G. Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new methods of borehole charges initiation in quarries. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(7):383–387.
18. Жабоев М.Н., Хакулов В.А., Бахарев Л.В., Равикович Б.С. Совершенствование технологии отбойки сложноструктурных массивов горных пород. *Горный журнал*. 1990;(9):22–23.
Zhaboev M.N., Khakulov V.A., Bakharev L.V., Ravikovich B.S. Improvement of the blasting technology for complex-structured rock masses. *Gornyi Zhurnal*. 1990;(9):22–23. (In Russ.)
19. Хакулов В.А., Карпова Ж.В., Хатухова Д.В., Шинахова А.Э. Совершенствование проектирования буровзрывных работ на основе экспертных систем искусственного интеллекта. *Горный журнал*. 2025;(2):13–18. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.02.07>
Khakulov V.A., Karpova Zh.V., Khatukhova D.V., Shinakhova A.E. Improving drilling and blasting design based on artificial intelligence expert systems. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(2):13–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.02.07>

Информация об авторах

Виктор Алексеевич Хакулов – доктор технических наук, заведующий кафедрой информационных технологий в управлении техническими системами, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова, г. Нальчик Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9429-1774](https://orcid.org/0000-0001-9429-1774), Scopus ID [57200144748](https://orcid.org/57200144748), ResearcherID [B-2340-2018](https://orcid.org/B-2340-2018); e-mail vk21@yandex.ru

Виталий Александрович Шаповалов – доктор физико-математических наук, профессор кафедры информационных технологий в управлении техническими системами, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9701-6820](https://orcid.org/0000-0002-9701-6820), Scopus ID [57190966150](https://orcid.org/57190966150), ResearcherID [J-9696-2015](https://orcid.org/J-9696-2015); e-mail [vet555@mail.ru](mailto:v555@mail.ru)



Виктор Николаевич Игнатов – доктор технических наук, профессор кафедры горного дела, Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5529-2395](#), Scopus ID [57200148638](#); e-mail VNIgnatov@yandex.ru

Жанна Викторовна Карпова – кандидат технических наук, инженер, ООО НИПИ «Недра», г. Новочеркасск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9664-5863](#), Scopus ID [57204943495](#); e-mail z.karpovaspb@gmail.com

Михаил Викторович Игнатов – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий в управлении техническими системами, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5393-470X](#), Scopus ID [57204758591](#); e-mail Ign_m@mail.ru

Ибрагим Альбиевич Ногеров – старший преподаватель кафедры информационных технологий в управлении техническими системами, Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8182-7293](#), Scopus ID [57200193883](#); e-mail nogеров.ibragim@mail.ru

Information about the authors

Viktor A. Hakulov – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Information Technologies in Control of Technical Systems, Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9429-1774](#), Scopus ID [57200144748](#), ResearcherID [B-2340-2018](#); e-mail vkx21@yandex.ru

Vitaliy A. Shapovalov – Dr. Sci. (Phys. & Math.), Professor of the Department of Information Technologies in Control of Technical Systems, Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9701-6820](#), Scopus ID [57190966150](#), ResearcherID [J-9696-2015](#); e-mail vet555_83@mail.ru

Viktor N. Ignatov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mining, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5529-2395](#), Scopus ID [57200148638](#); e-mail VNIgnatov@yandex.ru

Zhanna V. Karpova – Cand. Sci. (Eng.), Engineer, NIPI Nedra LLC, Novocherkassk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9664-5863](#), Scopus ID [57204943495](#); e-mail z.karpovaspb@gmail.com

Mikhail V. Ignatov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Information Technologies in Control of Technical Systems, Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5393-470X](#), Scopus ID [57204758591](#); e-mail Ign_m@mail.ru

Ibragim A. Nogеров – Senior Lecturer of the Department of Information Technologies in Control of Technical Systems, Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8182-7293](#), Scopus ID [57200193883](#); e-mail nogеров.ibragim@mail.ru

Поступила в редакцию

07.09.2025

Received

07.09.2025

Поступила после рецензирования

11.10.2025

Revised

11.10.2025

Принята к публикации

17.10.2025

Accepted

17.10.2025




РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-284>

УДК 553.98

**Локализация остаточных запасов нефти на поздней стадии разработки
Гильбертского месторождения
по данным комплекса геофизических исследований****И. И. Босиков¹  , Р. В. Ключев²  , И. В. Силаев³  **¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
г. Владикавказ, Российская Федерация² Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация³ Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, г. Владикавказ, Российская Федерация
 igor.boss.777@mail.ru**Аннотация**

Полнота выработки запасов нефти в условиях упруговодонапорного режима зависит от множества факторов: геологического строения коллектора, свойств нефтяных пластов, характера взаимосвязи зоны отбора с контурной областью, состояния текущего пластового давления относительно начального уровня, а также степени охвата продуктивных горизонтов процессом заводнения по всей толще и площади распространения. Основной задачей настоящего исследования является оценка оставшихся запасов нефти на месторождении и разработка технологий для их эффективной эксплуатации. Оценка степени отработки запасов проводится на основании комплексного анализа всех имеющихся данных, позволяющих определить особенности продвижения фронта водонефтяного контакта (ВНК) и энергетическое состояние резервуара. Анализ полноты выработки запасов проводился на основе результатов промысловых геофизических исследований, характеристик процесса вытеснения нефти водой и данных гидродинамического моделирования. Геофизический контроль выполнялся индивидуально по каждой скважине с целью мониторинга положения ВНК и выявления обводнённых участков продуктивного пласта. Метод импульсного нейтрон-нейтронного каротажа применялся для оперативного отслеживания динамики перемещения границы раздела нефть–вода в ходе разработки месторождения. Установлено, что остаточные извлекаемые запасы составляют 32,5% от начально извлекаемых запасов (НИЗ). Текущий коэффициент извлечения нефти составляет 0,507. Установлено, что месторождение находится на четвертой стадии разработки, характеризующейся высокой обводненностью (94,8 %) и низкими темпами отбора нефти (1,71–2,32 % от НИЗ в год).

Ключевые слова


нефтяные месторождения, скважина, каротаж, метод импульсного нейтрон-нейтронного каротажа, водонефтяной контакт, горизонтальные скважины, интерпретация, пласт, пористость, коллектор, нефтенасыщенность

Для цитирования

Bosikov I. I., Klyuev R. V., Silaev I. V. Identification of remaining oil reserves at the late stage of development of the Gilbert field using integrated geophysical data. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):346–356. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-284>

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research paper

**Identification of remaining oil reserves at the late stage of development
of the Gilbert field using integrated geophysical data****I. I. Bosikov¹  , R. V. Klyuev²  , I. V. Silaev³  **¹ North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation³ North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, Vladikavkaz, Russian Federation igor.boss.777@mail.ru**Abstract**

The completeness of oil recovery under elastic water-drive conditions depends on numerous factors, including the geological structure of the reservoir, the properties of the oil-bearing formations, the interaction between the production zone and the peripheral area, the current reservoir pressure relative to the initial level, and the



extent to which the productive horizons are swept by waterflooding throughout their thickness and areal distribution. The main objective of this study is to evaluate the remaining oil reserves in the field and to develop technologies for their efficient recovery. The degree of reserve depletion was assessed through a comprehensive analysis of all available data, enabling the identification of the oil–water contact (OWC) front movement and the current energy state of the reservoir. The assessment of recovery completeness was carried out using the results of field-geophysical surveys, the characteristics of oil-displacement by water, and data from hydrodynamic modelling. Geophysical monitoring was performed for each well individually to track the OWC position and identify water-swept zones of the productive reservoir. The Pulsed Neutron-Neutron Logging (PNNL) method was employed for real-time monitoring of oil-water interface movement during field development. It was established that the remaining recoverable reserves (RRR) account for 32.5% of the initial recoverable reserves (IRR). The current oil recovery factor (ORF) is 0.507. The field is currently at the fourth stage of development, characterized by a high water cut (94.8%) and a low annual oil-production rate (1.71–2.32% of the IRR).

Keywords

oil field, borehole, well logging, Pulsed Neutron–Neutron Logging (PNNL), oil-water contact (OWC), horizontal wells, interpretation, reservoir, porosity, collector, oil saturation

For citation

Bosikov I. I., Klyuev R. V., Silaev I. V. Identification of remaining oil reserves at the late stage of development of the Gilbert field using integrated geophysical data. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):346–356. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-284>

Введение

Полнота извлечения запасов нефти в условиях упруговодонапорного режима зависит от множества факторов: геологического строения месторождений, свойств коллектора, характера взаимодействия зон отбора с законтурной областью, текущего состояния пластового давления относительно начального уровня, равномерности охватывания продуктивных пластов процессом заводнения по всей толще и площади распространения, а также ряда иных условий.

Гильбертское нефтяное месторождение было открыто в результате проведенных сейсморазведочных исследований на территории северной площади Сунженской антиклинальной структуры Северо-Кавказского региона, известной своей продуктивностью олигоценowymi отложениями. Работы проводились специалистами предприятия ООО «Геофизинфо» в 1996–1997 гг. Впоследствии полученные данные были дополнительно подтверждены детальной обработкой материалов методами общей глубинной точки (ОГТ), осуществленной сотрудниками предприятия АО «Регионгеофизика», продолжавшихся с 1997 по 1999 г. Разведочная деятельность начала осуществляться в декабре 2001 г. путем бурения первой поисково-разведочной скважины (№1). Уже весной 2002 г. при испытании горизонта среднекембрийских песчаных коллекторов специалистам удалось зарегистрировать значительные притоки высококачественной промышленной нефти, подтвердившие наличие перспективных запасов углеводородов на данном участке.

Промышленная нефтеносность Гильбертского месторождения подтверждается комплексом исследований: лабораторным анализом керна, данными геофизических исследований скважин (ГИС), а также успешными испытаниями нефтяных интервалов, проведенными как в процессе бурения, так и после проведения геолого-технических мероприятий.

Целью исследования является оценка оставшихся извлекаемых запасов нефти на месторождении и разработка технологий для их эффективного освоения. Эта оценка базируется на полном комплексе доступ-

ной информации, позволяющей оценить динамику продвижения фронта вытесняемой водой и общее энергетическое состояние нефтяной залежи.

В основу методов исследования легли данные промысловых и геофизических исследований, характеристики процесса вытеснения нефти и гидродинамического моделирования. Геофизические исследования были направлены на контроль перемещения водонефтяного контакта (ВНК) и выявление обводнившихся участков продуктивного горизонта. Контроль за положением линии ВНК осуществлялся посредством метода импульсного нейтрон-нейтронного каротажа (ИННК) [1–3]. Этот метод является одним из наиболее эффективных методов геофизического исследования скважин, применяемых для изучения литологического состава пород, определения пористости, оценки содержания водорода и выделения зон нефтегазонасыщенности [3–5].

Преимущества ИННК перед другими методами: высокая чувствительность к содержанию водорода; определение эффективной пористости; выделение продуктивных интервалов; отсутствие влияния плотностных характеристик пород; минимальное влияние на окружающую среду; совместимость с современными технологиями обработки данных.

Таким образом, ИННК обладает рядом преимуществ, позволяющих получать детальную информацию о свойствах горных пород и эффективно выявлять продуктивные интервалы, обеспечивая надежную основу для планирования дальнейших работ по разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых [4–6].

Исходная постановка предполагает проведение исследований с целью контроля продвижения ВНК и выделения обводнённых интервалов продуктивных пластов, а также включает исследования, обеспечивающие комплексный подход к изучению процесса добычи нефти и мониторингу состояния скважин [6, 7].

Основные задачи исследования:

1. Оценить динамику и характер продвижения ВНК и обводнения продуктивных пластов на Гильбер-



тском месторождении на основе комплексного анализа данных ИННК и других промыслово-геофизических исследований.

2. Определить степень выработки и локализацию остаточных извлекаемых запасов (ОИЗ) нефти путем анализа характеристик вытеснения, гидродинамического моделирования и сопоставления текущих и начальных данных о нефтенасыщенности.

Научная новизна исследования заключается в разработке и апробации комплексной методики локализации остаточных запасов нефти на поздней стадии разработки для месторождений со сложным геологическим строением, которая включает:

- количественную оценку вклада разнородных механизмов обводнения (послойного и подъема ВНК) в общую выработку запасов и их пространственное разнесение на основе многолетних данных ИННК;

- верификацию данных геофизического мониторинга ИННК с помощью трассерных исследований, что позволило идентифицировать наличие высокопроводящих каналов («суперколлекторов») и оценить их влияние на вытеснение;

- интеграцию уточненных по данным ИННК и трассеров границ обводнения в гидродинамическую модель, что позволило с высокой достоверностью построить карту распределения остаточных подвижных запасов и выделить конкретные зоны для проведения геолого-технических мероприятий (ГТМ).

Характеристики продуктивности и исходные условия разработки месторождения

Данные, полученные в марте 2002 г. при исследовании первой скважины, показали, что дебит безводной нефти стабилизировался на уровнях 8,07–11,22 м³/сут при фиксированных значениях давления (штуцер Ø 2–4 мм), соответствующие депрессии составили 2,86–3,67 МПа. Нижние точки перфорированного интервала, откуда добывалась нефть (дебиты варьировались от 8,1 до 11,2 м³/сут), располагались на абсолютной отметке –1988,1 м (глубина около 2038–2040 м). Из-за особенностей строения пород, представляющих собой тонкое чередование песчаных и глиняных слоев, точное определение положения водонефтяного контакта затруднительно; условная граница продуктивной зоны установлена на глубине 2047,4 м (абс. отметка –1995,3 м). Согласно результатам испытаний скважины №1, проведенных в мае 2003 г. (перфорационный интервал 2023–2038 м), объем добычи почти чистой нефти составлял от 27,0 до 60,5 м³/сут при штуцере Ø 3–5 мм и диапазоне депрессий 1,8–3,7 МПа [7]. Коэффициент продуктивности оценивался в пределах 15,0–16,3 м³/(сут·МПа) [8–10]. Исследованные две первые поисковые скважины находились внутри контуров нефтеносности: первая (№1) расположена на самом участке, вторая (№2) – вблизи нее. Дополнительные исследования, включающие детальное изучение сейсмологических материалов и последующую интерпретацию всей полученной ранее информации, были проведены после завершения бурения скважин №1 и №2 в 2002 г., позволив уточнить структуру Сунженской антиклинали. При проведении анализа добычных ха-

рактеристик всех последующих эксплуатационных скважин (№3–№9) максимальные показатели продуктивности зарегистрированы в скважинах №3 и №9 – порядка 40,9 и 53,3 м³/(сут·МПа) соответственно, при показателях суммарной продукции (нефть + вода) от 37,2 до 62,8 м³/сут и от 55,2 до 132,2 м³/сут. Минимальные же значения наблюдались в скважинах №4, №7 и №8 – около 9,0–12,9 м³/(сут·МПа).

Такой значительный разброс значений прежде всего свидетельствует о ярко выраженной зональной неоднородности продуктивного пласта. Любопытно отметить, что уже при подготовке первого проектного документа [10–12] по результатам исследования поисковых и оценочных скважин, пробуренных в центральной части Сунженской структуры, были зафиксированы неудовлетворительные емкостно-фильтрационные характеристики коллекторских пород, что отразилось и на характере индикаторных диаграмм.

Одновременно в ходе гидродинамического анализа определялись показатели пластовой температуры, средняя величина которой составила около 58 °С.

Полученные экспериментальные данные позволили обосновать значения начального пластового давления и рассчитать коэффициенты продуктивности. По формуле Дюпюи была установлена проницаемость призабойной зоны скважины и определен коэффициент гидропроводности [13–15].

Определение положения начального водонефтяного контакта осуществлялось по результатам испытаний скважин и промыслово-геофизических исследований.

Замеры методом ИННК интерпретированы по данным девяти скважин. Комплекс ГИС-исследований, включающих определение профиля притока (термометрию, термодобитометрию, расходометрию и др.), проведен в шести скважинах.

Практически весь фонд скважин, за исключением горизонтальных, охвачен промыслово-геофизическими исследованиями за всю историю разработки месторождения. Всего выполнено 17 исследований методом ИННК в девяти скважинах и семь исследований по профилю притока.

Особенности подъема водонефтяного контакта

Подъем ВНК протекает неравномерно. Основные факторы, определяющие динамику процесса, включают геологическое строение залежи, темпы бурения и отбора пластовых флюидов. Важную роль играет также неоднородность продуктивных пластов по вертикальному разрезу: верхние слои представлены различными по размеру зерна песчаниками, средняя часть характеризуется повышенной неоднородностью и включает песчаники с высоким содержанием алевроитовой и пелитовой фракции, нижняя часть состоит преимущественно из песчаников [15, 16].

Критерии оценки нефтенасыщенности определены следующим образом: нефть в чистом виде присутствует при коэффициенте нефтенасыщенности выше 0,7 (или 70 %); коллектор считается насыщенным нефтью и водой с преобладанием нефти при коэффициентах от 0,6 до 0,7 (60–70 %), включая границу 0,6;



смешанное насыщение нефтью и водой характерно для интервала от 0,3 до 0,7 (30–60 %); при значениях ниже 0,3 (менее 30 %) отмечается полное заполнение пор водой [16–18].

Интерпретация данных промыслово-геофизических исследований

Скважина №1 расположена в приконтурной зоне северной части месторождения. В геологическом разрезе выделяются как высокоёмкие пласты с пористостью от 10 до 16 %, так и тонкие прослои с пористостью 2–6 %. Рабочий интервал 2038–2040 м вскрыт перфорацией в 2002 г.; при испытании со штуцером диаметром 3 мм зафиксирован дебит нефти 9,76 м³/сут. Интервал 2023–2038 м перфорирован ранее – в 2013 г. Эксплуатация скважины начата в августе 2004 г. Исследование методом ИННК проведено трижды: непосредственно перед началом эксплуатации, повторно в мае 2019 г. при обводнённости продукта около 3 %. Ранее, в 2006 г., при незначительном уровне обводнения (до 3 %) были выполнены комплексные гидродинамические исследования, включая методы ИННК, гамма-каротаж (ГК), локатор муфт и построение профилей притоков [18, 19]. По результатам ИННК 2019 г. флюиды типа «нефть + вода» фиксируются начиная с глубины 2035,8 м, «вода + нефть» – с отметки 2038,4 м, тогда как чётко водоносные горизонты расположены глубже уровня 2040,6 м.

Анализ ГК показывает, что основным источником поступления нефти является верхняя часть рабочего интервала (2023–2025 м), в то время как вода преимущественно поступает из нижних отверстий перфорации (2039–2040 м). При повторном проведении ИННК было установлено, что зона проникновения смеси «нефть + вода» фиксируется в верхней части разреза (2023,6–2024,2 м); ниже, вплоть до глубины 2025 м, преобладает состав «вода + нефть». Промежуточные зоны «вода + нефть» также наблюдаются в интервалах 2025,2–2025,8 и 2032,0–2032,8 м. Для этих интервалов характерна пониженная нефтенасыщенность (0–8 %), что подтверждает послойное замещение нефтяных запасов водой [19]. Таким образом, низкая степень нефтенасыщенности интервала 2039,8–2040,6 м согласно критериям промышленного значения ($K_n = 33$ %) и появление воды из глубинных зон подтверждают предположение о подъёме водонефтяного контакта одновременно с процессом послойного обводнения разреза скважины.

На основе полученных данных был разработан план геолого-технических мероприятий для скважины №1: при достижении критической обводнённости (99 %) изолировать текущие интервалы перфорации 2038–2040 м (рабочий) и 2023–2038 м (дострел) путем установки цементного моста под давлением с последующим разбуриванием цементного стакана и вскрытием кровельной части пласта перфорацией в интервале 2023–2030 м.

Согласно данным ИННК, полученным в скважине №2 в начальный период эксплуатации при обводнённости продукции не более 1 % (перед выполнением обработки призабойной зоны пласта), разрез характеризуется как нефтенасыщенный.

Через четыре месяца после проведения ОПЗ по данным определения профиля притока (01–06.12.2005 г.) работает практически весь интервал перфорации.

Исследования ИННК продемонстрировали, что уменьшение нефтенасыщенности сопровождается ростом уровня ВНК. Так, текущее положение ВНК в исследуемой скважине находится на два метра выше отметки, зафиксированной при бурении скважины.

В 2012 г. зафиксировано дополнительное падение нефтенасыщенности до значений 25–55 % в интервале глубин 2159,4–2164 м, а также наличие зон послойного обводнения в нижних частях вскрытого интервала пласта.

Согласно данным ИННК, проведенным при обводнённости продукции более 80 %, отмечены полностью промытые зоны в пределах перфорированных интервалов. Ниже перфорированного участка присутствуют как нефтенасыщенные слои, так и участки с водой и нефтью, что свидетельствует о послойном характере обводнения нижнего неперфорированного отрезка разреза. Тем не менее подъёма уровня ВНК не установлено.

На основании полученных результатов в 2018–2019 гг. были выполнены геолого-технические мероприятия, включая дополнительную перфорацию в интервале 2168–2171 м с одновременной изоляцией всех ранее открытых участков. По данным ИННК уровень нефтенасыщенности вновь открытого интервала составил 76–89 %.

Результаты анализа ИННК свидетельствуют о фиксации как подъёма ВНК, так и послойного обводнения продуктивных пластов, причём в отдельных случаях отмечаются оба явления одновременно.

Анализ динамики подъёма ВНК по годам показал, что в начальной стадии освоения месторождения скорость движения ВНК была неоднородной. Так, по состоянию на 2006 г. разница в положении ВНК между пятью измеренными скважинами составила 13 м. Дебит жидкости в этих скважинах варьировался от 15 до 20 т в сутки при депрессиях от 1,9 до 3,6 МПа. Максимальное перемещение ВНК наблюдалось в скважинах №8 и №9 (подъём примерно на 15 м).

При повторных исследованиях установлено следующее изменение уровня ВНК: в скважине №2 за пятилетний срок оно составило всего 1,4 м, в скважине №8 за семилетний период разработки отмечено увеличение на 7,6 м, тогда как в скважине №9 уровень поднялся на 1 м за один год.

Согласно представленным трендовым зависимостям (рис. 1) текущее среднее положение ВНК оценивается на отметке –1984 м.

Приведённые результаты позволяют заключить, что процесс послойного обводнения характерен главным образом для периферийных зон месторождения, простирающихся с северо-восточного направления на юго-восток, тогда как смещение ВНК преобладает в центральных зонах. Исходя из полученных результатов интерпретаций ИННК и истории добычи углеводородов делается вывод о локализации ОИЗ преимущественно в центральной куполообразной зоне северо-восточной части нефтяной залежи.

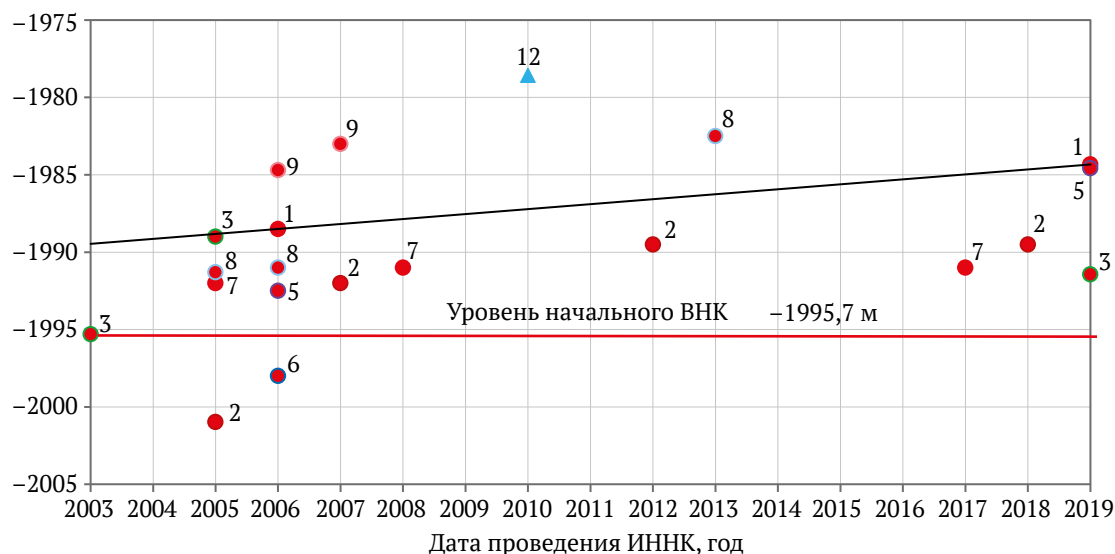


Рис. 1. Оценка подъема ВНК на Гильбертском месторождении по данным ИННК

В 2012 г. на Гильбертском месторождении были проведены трассерные исследования скважин. Трассер-маркер закачивали в водопоглощающую скважину №12 с целью выявления гидродинамических связей между водопоглощающей и добывающими скважинами, определения истинных скоростей и направлений перемещения закачиваемой воды и пластовых флюидов, а также оценки воздействия водопоглощающей скважины на производительность добывающих.

Некоторые скважины характеризуются наличием «ведущего» пропластка, выделяющегося значительным увеличением концентрации трассера. Для скважин №№ 4, 5, 6 проявление данного пропластка отмечено при первом же обнаружении маркера, тогда как для скважин №№ 1, 2, 3, 10, 11 оно произошло лишь при четвертом поступлении. Исключением стала скважина №8, где концентрации оставались стабильными на протяжении всего периода наблюдения.

Уровень концентрации трассера обратно пропорционален количеству крупных проводящих слоев. Особенностью скважины №5 являются крайне высокие значения концентрации трассера, что свидетельствует о существовании небольшого по объему, но высокоэффективного фильтрационного пути. Это предполагает существование трещины или зон интенсивного развития коллекторов («суперколлекторов»). На сегодняшний день данная скважина отличается наименьшей степенью обводнения среди аналогичных наклонно-направленных скважин (около 90 %).

Обводнение скважин на Гильбертском месторождении началось ещё в 2007 г., причём для ряда объектов фиксировался стремительный рост уровня обводнённости вплоть до 70–80 %. В течение последующих тринадцати лет среднегодовые темпы роста обводнённости варьировались от 11 до 14 %. После ввода в эксплуатацию водопоглощающей скважины №12 (декабрь 2010 г.) степень обводнённости по большинству наклонно-направленных скважин составила от 42 до 82 %.

Начиная с 2011 г. динамика изменения обводнённости замедлилась: показатель снизился с 9,2 % годовых до незначительных значений порядка 0,1 % в 2016 г. Например, в скважине №8 уровень обводнённости уменьшился с 90,8 % в январе 2016 г. до 84 % к концу декабря.

Следовательно, эксплуатация водопоглощающей скважины №12 не вызвала значительного увеличения обводнённости, что согласуется с результатами моделирования на гидродинамической модели, согласно которым исключение из эксплуатации скважины №12 оказывает минимальное влияние на показатели обводнённости нефти (менее 1 %).

Анализ характеристик вытеснения и оценка остаточных извлекаемых запасов

Характеристика вытеснения интегрально отображает реальные процессы добычи нефти и обусловленную ими динамику обводнения пласта на завершающих этапах эксплуатации месторождений. Перевод технологических параметров разработки в характеристику вытеснения и выбор подходящей эмпирической зависимости позволяют оценить потенциальные объёмы нефтедобычи.

Необходимо подчеркнуть, что наиболее точное определение характеристик вытеснения возможно для продуктивных горизонтов с длительным периодом эксплуатации и уровнем обводнённости скважинной жидкости свыше 80–90 %. Реальные данные рассматриваемого месторождения за период 16 лет демонстрируют стабильно высокий уровень обводнённости продукции и значительную выработку запасов нефти.

Характеристики вытеснения позволили провести оценку ОИЗ нефти при текущих параметрах разработки с использованием известных методик. Оценочные расчёты выполнены как по графикам нарастания обводнённости, так и по зависимостям снижения дебитов. Итоговые значения представлены в табл. 1.



При достижении конечной обводнённости 98 % среднее значение ОИЗ лишь немного ниже показателя в 131 тыс. т. Фактические характеристики вытеснения и прогнозируемые показатели, полученные на основании характеристик вытеснения, отображены на рис. 2.

На рис. 2 представлены фактические и расчетные характеристики вытеснения, используемые для оценки потенциала доразработки месторождения. Левая часть иллюстрирует зависимость между накопленной добычей нефти и жидкостью, правая – между текущей добычей нефти и обводненностью. Расхождение между фактическими данными (сплошные линии) и прогнозными кривыми (пунктир) в области высоких значений обводненности (> 90 %) и накопленной добычи жидкости свидетельствует о наличии дополнительного потенциала добычи, оцененного в среднем в 131 тыс. т нефти. Полученные зависимости легли в основу расчета коэффициента извлечения нефти и определения остаточных запасов.

Также для оценки эффективности процесса разработки месторождения были построены характеристики вытеснения, отражающие зависимость обводнённости от степени отбора нефти (рис. 3).

Зависимости иллюстрируют динамику обводнения продукции по мере выработки запасов. По горизонтальной оси отложена степень отбора от НИЗ (%), по вертикальной – обводненность добываемой жидкости (%). Сплошной линией показаны фактические промысловые данные, пунктирной – аппроксимирующая зависимость (характеристика вытеснения), используемая для прогнозирования технологических показателей до достижения предельно-экономической обводнённости (98 %). Анализ кривой подтверждает, что месторождение вышло на завершающую стадию разработки с текущей обводненностью 94,8 % при выработке 84,2% от НИЗ.

Разрабатывается единственный объект среднего кембрия (пласт 2). Выработка запасов по данному пласту составляет 83,4 %, и именно этот показатель учтён в государственном балансе запасов на 01.01.2022 г. Обводнённость добываемой продукции достигает 94,8 %. Небольшое расхождение между значением отбора относительно НИЗ и уровнем обводнённости свидетельствует о достижении планируемого значения коэффициента извлечения нефти и извлечённых запасов, учитываемых государственным балансом на указанную дату.

Таблица 1

Результаты оценки коэффициента извлечения нефти (КИН) по характеристикам вытеснения для Гильбертского месторождения по разным методикам

Показатели	Кривые обводнения			Кривые падения		Средние значения
	Методика Пирвердян А.М.	Методика Назаров С.Н. – Сипачев Н.В.	Методика Камбаров Г.С.	Методика Пирвердян А.М.	Методика Камбаров Г.С., Копытов А.В.	
Накопленная добыча нефти по факту на 01.01.2020, тыс. т	682	682	682	682	682	682
Накопленная добыча нефти на конец разработки, тыс. т	788	758	749	948	821	813
Прирост добычи нефти на 01.01.2023	106	76	67	266	139	131
КИН расчетный	0,583	0,560	0,554	0,701	0,607	0,601
КИН утвержденный	0,605					

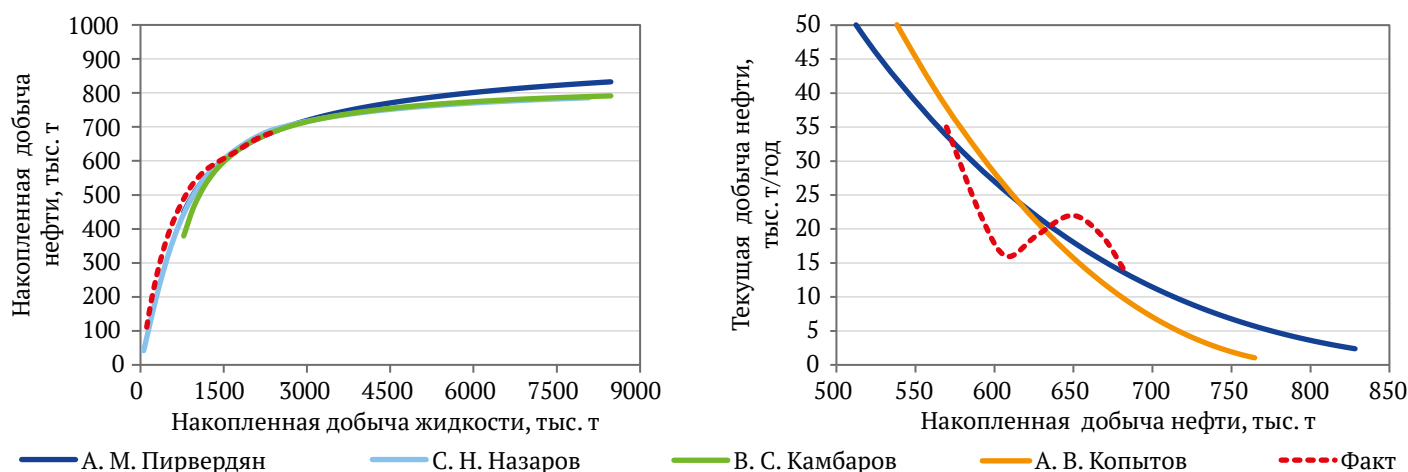


Рис. 2. Характеристики вытеснения Гильбертского месторождения

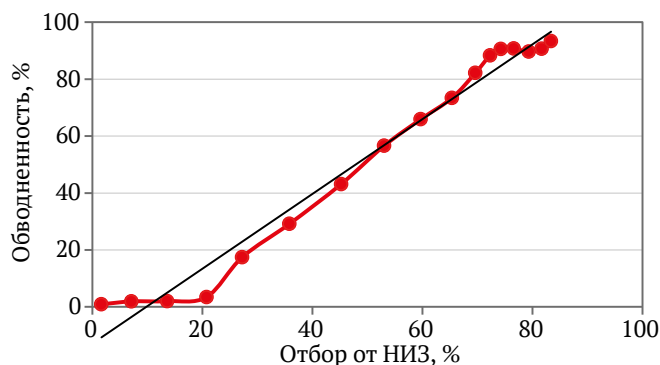


Рис. 3. Зависимость отбора низковязких углеводородов от степени обводнённости пласта на примере Гильбертского месторождения

Анализируя имеющиеся данные, мы пришли к выводу, что обводнение продуктивной толщи обусловлено двумя факторами: повышением уровня ВНК и послойным распространением воды. Послойное обводнение преимущественно наблюдается в периферийных зонах месторождения вдоль направления от северо-востока к юго-западу, тогда как рост уровня ВНК характерен для центральных участков залежи. По итогам иссле-

дований интерпретируемых нейтронно-карбонатных кривых ИННК и истории эксплуатации скважин определено скопление оставшихся неизвлечёнными запасов в северо-восточной части залежи вблизи трещинных зон около скважин №1 и №8, а также в центре месторождения возле скважин №2 и №4.

Оценка характеристик процесса вытеснения позволила рассчитать ожидаемое количество остаточных извлекаемых запасов (ОИЗ) при текущих условиях разработки. Прогнозируемый диапазон величин ОИЗ колеблется от 67 до 266 тыс. т, среднее значение составляет примерно 131 тыс. т.

Подтверждение степени выработки запасов и местоположение оставшейся нефти были определены путём гидродинамического моделирования (на 01.01.2022 г.), позволяющего более точно оценить текущую степень отработанности запасов (табл. 2).

На рис. 4 показано распределение подвижных запасов нефти по объекту среднего кембрия Гильбертского месторождения на начальный период разработки на 01.01.2019 (дата подготовки проектного документа – 2020 г.) и 01.01.2022 г. Карты распределения плотности показывают, что наибольшие концентрации подвижных запасов расположены в зонах максимальной начальной толщины нефтяного пласта.

Таблица 2

Выработка запасов нефти Гильбертского месторождения на 01.01.2022 г.

Место-рождение	Пласт	Категория запасов	Начальные геологические запасы, нефти, тыс. т	Утвержденный КИН, д.е.	Начальные извлекаемые запасы, нефти, тыс. т	Накопленная добыча нефти на 01.01.2022	Отбор от НИЗ, %	Текущий КИН, д.е.	Текущая обводненность, %	Остаточные извлекаемые запасы, нефти, тыс. т	Остаточные извлекаемые запасы, нефти, %
Гильбертское	Средний кембрий	A	1582	0,609	997	785	84,2	0,507	94,8	185	18,5

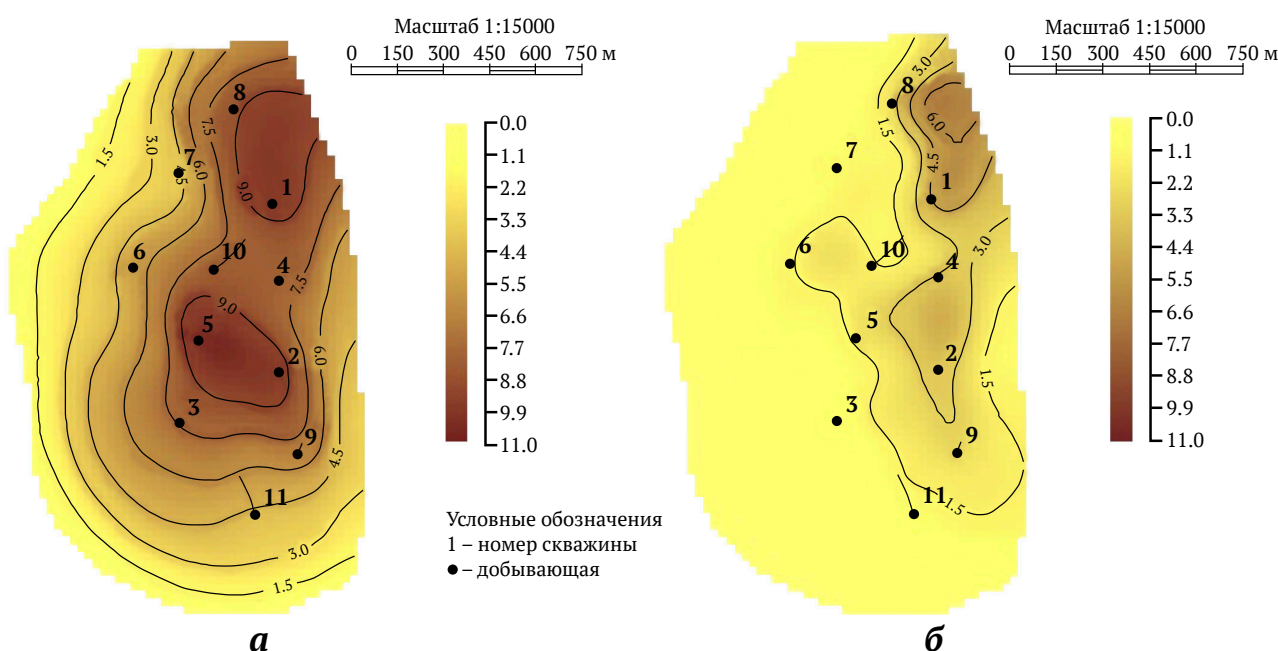


Рис. 4. Карта остаточных подвижных запасов Гильбертского месторождения: а – на начало разработки – 2019 г.; б – на 01.01.2022 г.



Анализ полученных данных позволяет определить следующее:

1. Объект среднего кембрия характеризуется четвёртой стадией разработки, отмеченной уменьшением объёмов добычи нефти, высоким уровнем обводнения извлекаемого сырья и замедленным отбором относительно первоначально промышленно-залегающих запасов.

2. Наиболее высокая концентрация подвижных запасов расположена в северной и восточной частях залежи вблизи скважин №1 и №8, при этом небольшие объёмы остаются также в центре продуктивного участка возле скважин №2 и №4.

3. Остаточные запасы нефти (185 тыс. т, полученные на основе ГДМ) возможно эффективно освоить имеющимися эксплуатационными скважинами (№№ 1–10). Однако для ускорения сроков завершения разработки целесообразно провести геолого-технические мероприятия либо пробурить дополнительный боковой ствол из действующих скважин №1 или №8 в зависимости от того, какая из них раньше достигнет критического уровня обводнённости.

Фактически на рис. 4 представлены карты пространственного распределения плотности подвижных запасов нефти: а – на начальном этапе разработки (2019 г.), б – на 01.01.2022 г. Анализ карт демонстрирует значительную перераспределённость запасов в результате выработки. Наибольшая концентрация остаточных подвижных запасов сохранилась в северо-восточной части залежи вблизи скважин №1 и №8, а также в центральной части в районе скважин №2 и №4. Сравнение карт визуализирует зоны наиболее интенсивной выработки и подтверждает вывод о локализации остаточных запасов в прискважинных зонах с наилучшими фильтрационно-емкостными свойствами.

Практическая значимость

Практическая значимость исследования состоит в том, что его результаты позволяют:

- перейти от экстенсивной к целенаправленной разработке месторождения – точно локализовать зоны с остаточными запасами нефти для планирования эффективных геолого-технических мероприятий;
- обеспечить экономическую целесообразность дальнейшей эксплуатации: количественно оценить потенциал доработки в объеме ~185 тыс. т, что продлевает жизненный цикл месторождения;
- внедрить отработанную методику: апробированный комплексный подход (ИННК, трассеры, гидродинамическое моделирование) применим для повышения нефтеотдачи на других месторождениях-аналогах.

Экономическая эффективность

Проведенное исследование переводит управление разработкой на завершающей стадии из оперативной в стратегическую плоскость. Выявленный потенциал доработки формирует основу для экономически обоснованного продления жизненного цикла месторождения.

До получения результатов любые геолого-технические мероприятия несли высокие риски из-за неопре-

деленности в положении продуктивных интервалов. Предложенная методика позволяет перейти от равномерного обслуживания фонда скважин к политике точечных инвестиций. Четкая пространственная привязка остаточных запасов позволяет сформировать оптимизированную программу геолого-технических мероприятий, избегая дорогостоящих поисковых операций.

Основной объем добычи может быть обеспечен за счет действующего фонда скважин, что минимизирует потребность в новых капиталоемких объектах, существенно повышая рентабельность проекта. Реализация потенциала позволяет приблизиться к утвержденному коэффициенту извлечения нефти, переводя запасы в категорию коммерчески извлекаемых. Таким образом, экономическая значимость работы заключается не только в прямой монетизации дополнительных объемов нефти, но и в создании управленческой модели, обеспечивающей рентабельное завершение разработки месторождения.

Выводы

На основе проведенного комплексного анализа выработки запасов Гильбертского месторождения с использованием геоинформационных систем и данных промыслово-геофизических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Достигнута основная цель исследования – определены ОИЗ нефти месторождения и локализованы зоны их концентрации. Установлено, что остаточные извлекаемые запасы соответствуют 18,5 % от НИЗ. Текущий коэффициент извлечения нефти (КИН) составляет 0,507 при утвержденном значении 0,609. Установлено, что месторождение находится на четвёртой стадии разработки, характеризующейся высокой обводненностью продукции (94,8 %).

2. Оценены динамика и характер продвижения ВНК и обводнения продуктивных пластов. На основе анализа данных ИННК установлено, что подъем ВНК происходит неравномерно: в скважинах центральной части залежи зафиксирован подъем ВНК на 2–15 м, в то время как в краевых зонах преобладает послойное обводнение. Текущее положение ВНК оценено на отметке –1984 м.

3. Определены степень выработки и локализация ОИЗ. По результатам гидродинамического моделирования и анализа характеристик вытеснения выявлено, что невыработанные запасы нефти сосредоточены в приразломной зоне в районе скважин №1 и №8 и в центральной части залежи (район скважин №2 и №4).

4. Подтверждена эффективность применения метода ИННК для мониторинга разработки: проведено 17 исследований в девяти скважинах, что позволило точно определить зоны обводнения и нефтенасыщенные интервалы, а также оценить текущую нефтенасыщенность пластов (снижение до 25–55 % в обводненных интервалах).

Таким образом, проведенные исследования позволили получить полную картину текущего состояния месторождения, обосновать объемы остаточных запасов и разработать мероприятия по увеличению нефтеотдачи, что снизит технологические риски и повысит экономическую эффективность дальнейшей разработки.



Список литературы / References

1. Бембель Р.М., Сухов Л.А., Щетинин И.А. Пути повышения геологической эффективности освоения месторождений углеводородов в Западной Сибири. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2017;(6):6–10. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2017-6-6-10>
Bembel R.M., Sukhov V.A., Schetinin I.A. Ways of increasing geological efficiency of hydrocarbon fields development in Western Siberia. *Oil and Gas Studies*. 2017;(6):6–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2017-6-6-10>
2. Босиков И.И., Ключев Р.В., Хетагуров В.Н., Силаев И.В. Комплексная оценка гидродинамических процессов на карьерах Клинского месторождения с помощью методов управления ими в массивах горных пород. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(2):284–297. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-284-297>
Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N., Silaev I.V. Comprehensive assessment of hydrodynamic processes in the Klinskoye Quarry with the use of their control methods in rock masses. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):284–297. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-284-297>
3. Гайдук В.В. Природа нефтегазоносности Терско-Сунженского нефтегазоносного района. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2019;(2):40–46. <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-2-40-46>
Gayduk V.V. The nature of the oil and gas potential of the Tersko-Sunzhensky oil and gas-bearing region. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2019;(2):40–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-2-40-46>
4. Медведев Н.Я. *Геотехнологические основы разработки залежей с трудноизвлекаемыми запасами нефти*. Москва: ВНИИОЭНГ; 1997. 336 с.
Medvedev N.Y. *Geotechnological basis for the development of oil pools with hard-to-recover reserves*. Moscow: VNIIOENG; 1997. 336 p. (In Russ.)
5. Данилов В.Н. Надвигообразование и нефтегазоносность Предуральяского краевого прогиба. *Геология нефти и газа*. 2021;(1):57–72. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-1-57-72>
Danilov V.N. Formation of thrusts and hydrocarbon potential of Urals Foredeep. *Russian Oil and Gas Geology*. 2021;(1):57–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-1-57-72>
6. Джафаров Р.Р., Рагимов Ф.В., Гашимова Г.И. Перспективы нефтегазоносности надкормакинской глинистой свиты месторождения Чилов. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*. 2020;(12):12–16. <https://doi.org/10.37474/0365-8554/2020-12-12-16>
Jafarov R.R., Rahimov F.V., Hashimova G.I. Perspectives of upper kirmaki clay suite in Chilov field. *Azerbaijan Oil Industry Journal*. 2020;(12):12–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.37474/0365-8554/2020-12-12-16>
7. Ивлев Д.А. Метод регионального прогноза нефтегазоносности территорий алгоритмами машинного обучения на примере Тюменской свиты Западной Сибири. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(1):41–53. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/2998>
Ivlev D.A. Method for regional forecast of oil and gas potential territories by machine learning algorithms on the example of the Tyumen formation of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(1):41–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/2998>
8. Каукунова А.С. Перспективы нефтегазоносности в Южно-Тургайском бассейне. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2020;(3):38–45. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-3-38-45>
Kaukenova A.S. Oil and gas potential of the south Turgay basin. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2020;(3):38–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-3-38-45>
9. Кобылинский Д.А. Критерии определения нефтегазоносности территории на основе данных наземной геохимической съемки, выполненной по грунту и искусственному сорбенту. *Вестник евразийской науки*. 2020;12(6):1–10. URL: <https://esj.today/PDF/51NZVN620.pdf>
Kobylynsky D.A. Criteria for determining the oil and gas potential of the territory based on the data of ground geochemical survey performed on the ground and artificial sorbent. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020;12(6):1–10. (In Russ.) URL: <https://esj.today/PDF/51NZVN620.pdf>
10. Кузнецов В.Г., Журавлева Л.М. Рифовые образования Западно-Канадского бассейна и их нефтегазоносность. *Литоология и полезные ископаемые*. 2018;(3):257–273. <https://doi.org/10.7868/S0024497X18030047> (Перев. вер.: Kuznetsov V.G., Zhuravleva L.M. Reef formations in the West Canada basin and their oil and gas potential. *Lithology and Mineral Resources*. 2018;53(3):236–251. <https://doi.org/10.1134/S0024490218030045>)
Kuznetsov V.G., Zhuravleva L.M. Reef formations in the West Canada basin and their oil and gas potential. *Lithology and Mineral Resources*. 2018;53(3):236–251. <https://doi.org/10.1134/S0024490218030045> (Orig. ver.: Kuznetsov V.G., Zhuravleva L.M. Reef formations in the West Canada basin and their oil and gas potential. *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*. 2018;(3):257–273. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0024497X18030047>)



11. Гайнаншин Р.Н., Хафизов С.Ф., Абрамов В.Ю. и др. Оценка перспектив нефтегазоносности и выбор программы геологоразведочных работ на основе многовариантного геологического моделирования. *Территория Нефтегаз*. 2019;(3):12–16.
Gainanshin R.N., Khafizov S.F., Abramov V.Y. et al. Oil and gas perspective assessment and the choice of the exploration program based on the multivariate geological modeling. *Territorija Neftegaz*. 2019;(3):12–16. (In Russ.)
12. Босиков И.И., Ключев Р.В., Ревазов В.Ч., Мартышев Н.В. Анализ и оценка перспективных участков высококачественного кварцевого сырья на территории Северного Кавказа. *Горные науки и технологии*. 2023;8(4):278–289. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-165>
Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch., Martyushev N.V. Analysis and evaluation of prospects for high-quality quartz resources in the North Caucasus. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):278–289. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-10-165>
13. Паникаровский Е.В., Паникаровский В.В., Анашкина А.Е. Опыт разработки Ванкорского месторождения. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2019;(1):47–51. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2019-1-47-51>
Panikarovskii E.V., Panikarovskii V.V., Anashkina A.E. Vankor oil field development experience. *Oil and Gas Studies*. 2019;(1):47–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2019-1-47-51>
14. Шарафутдинов В.Ф., Черкашин В.И., Мусихин В.А. и др. Перспективы нефтегазоносности майкопских отложений буйнакской депрессии предгорного Дагестана. *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. 2018;1(72):17–23. <https://doi.org/10.31161/2541-9684-2018-62-1-17-23>
Sharafutdinov V.F., Cherkashin V.I., Musikhin V.A. et al. Prospects of oil and gas production of Michael depression of Buy-Naks depression of pre-degenary Daghestan. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018;1(72):17–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.31161/2541-9684-2018-62-1-17-23>
15. Бронскова Е.И. Комплексный анализ геологического строения Апрельского месторождения для эффективности доразведки и разработки залежей в тюменской свите. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2016;(8):36–44.
Bronskova E.I. Comprehensive analysis of April field geological structure to provide effective additional exploration and development of Tyumen suite deposits. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2016;(8):36–44. (In Russ.)
16. Севостьянова Р.Ф., Ситников В.С. Развитие представлений о строении и нефтегазоносности территории непско-ботубинской антеклизы и прилегающей части предпатомского прогиба. *Записки Горного института*. 2018;234:599–603. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.6.599>
Sevostyanova R.F., Sitnikov V.S. The development of ideas about the structure and oil and gas potential of Nepa-Botuoba antecline and adjacent part of Predpatomskii trough. *Journal of Mining Institute*. 2018;234:599–603. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.6.599>
17. Черкашин В.И., Сабанаев К.А., Гаджиева Т.Р. и др. Тектоническое строение и перспективы нефтегазоносности осадочного покрова дна Каспийского моря. *Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН*. 2018;4(75):24–29. <https://doi.org/10.31161/2541-9684-2018-62-4-25-30>
Cherkashin V.I., Sabanaev K.A., Gadzhieva T.R. Tectonic structure and perspectives of oil and gas sedimentary cover of the bottom of the Caspian Sea. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018;4(75):24–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.31161/2541-9684-2018-62-4-25-30>
18. Ульмасвай Ф.С., Добрынина С.А., Сидорчук Е.А. Новые закономерности распределения нефтегазоносности в осадочной толще (на примере Предкавказья). *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2018;1(20):8. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-20.art8>
Ulmasvay F.S., Dobrynina S.A., Sidorchuk E.A. New regularities in the distribution of oil and gas in sedimentary stratum (by the case of Ciscaucasia). *Actual Problems of Oil and Gas*. 2018;1(20):8. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-20.art8>
19. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V. et al. Analysis of the quality of underground mineral waters of terrigenous deposits of the hauterivbarremian aquifer of the lower cretaceous. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2024;2(464):36–47. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-170x.392>

Информация об авторах

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

Роман Владимирович Ключев – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры техники низких температур им. П.Л. Капицы, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), Scopus ID [57194206632](https://orcid.org/57194206632), Research J-8000-2014; e-mail kluev-roman@rambler.ru



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

Information about the authors

Igor I. Bosikov – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Oil and Gas Engineering, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8930-4112](#), Scopus ID [56919738300](#); e-mail igor.boss.777@mail.ru

Roman V. Klyuev – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Low-Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3777-7203](#), Scopus ID [57194206632](#), Research [J-8000-2014](#); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Ivan V. Silaev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Physics and Astronomy, North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0003-2490-1578](#), Scopus ID [57189031683](#)

Поступила в редакцию 16.07.2024
Поступила после рецензирования 24.10.2025
Принята к публикации 27.10.2025

Received 16.07.2024
Revised 24.10.2025
Accepted 27.10.2025



ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-05-413>

УДК 550.8.013:622.276.1/.4

**Комплексное исследование анизотропии
микроструктурных и фильтрационных свойств коллектора
газоконденсатного месторождения на базе цифрового анализа керна**В. В. Химуля   

Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Российская Федерация

 khim@ipmnet.ru**Аннотация**

Современные технологии, основанные на применении методов численного моделирования и рентгеновской микротомографии, предоставляют новые возможности для детального изучения порового пространства коллектора и прогноза его фильтрационно-ёмкостных свойств. В статье описаны результаты цифрового анализа порового пространства и фильтрационных характеристик слабосцементированных песчаников продуктивного интервала газоконденсатного месторождения, расположенного на северном шельфе РФ. Исследование выполнено на основе данных рентгеновской компьютерной микротомографии, методов цифрового анализа керна и численного моделирования. Для построения цифровых двойников керна выполнена обработка и бинаризация 3D-снимков коллектора. Проведены количественные расчёты направленной изменчивости ключевых коллекторских свойств, включая открытую и закрытую пористость, геодезическую извилистость, характеристики перколяционных путей, а также численное моделирование фильтрационного потока по трём ортогональным направлениям. Отдельное внимание уделено определению репрезентативного элементарного объёма на основе поэтапного усреднения пористости по кубическим доменам. Результаты демонстрируют слабовыраженную, но устойчивую анизотропию фильтрационных свойств пород, связанную с направленной структурой порового каркаса. Выявлено, что даже при близких значениях открытой пористости геометрия фильтрационных путей и извилистость оказывают значительное влияние на проницаемость. Полученные данные имеют практическую значимость для задач геолого-гидродинамического моделирования, оптимизации направления горизонтальных скважин, оценки риска пескопроявлений и прогноза устойчивости фильтрационного фронта при разработке шельфовых месторождений. Работа подчёркивает необходимость комплексного цифрового подхода при оценке фильтрационных свойств коллекторов в условиях сложной литологии и ограниченности кернового материала.

Ключевые слова

цифровой анализ керна, пористость, проницаемость, извилистость, пути перколяции, фильтрационные свойства, анизотропия, ФЕС

Для цитирования


Khimulia V.V. Comprehensive study of the anisotropy of microstructural and filtration properties of a gas condensate field reservoir based on digital core analysis. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):357–368. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-05-413>

DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Research paper

**Comprehensive study of the anisotropy of microstructural and filtration properties
of a gas condensate field reservoir based on digital core analysis**V. V. Khimulia   

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

 khim@ipmnet.ru**Abstract**

Modern technologies based on numerical simulation and X-ray microtomography provide new opportunities for detailed study of a reservoir pore space and prediction of its filtration properties. The paper describes the findings of digital analysis of pore space and filtration characteristics of poorly consolidated sandstones in a pay interval of a gas condensate field located in the northern shelf of the Russian Federation. The study was conducted based on data from X-ray computed microtomography, digital core analysis methods, and numerical simulation. To build digital twins of a core, 3D images of the reservoir rocks were processed and binarized. Calculations of the directional variability of key reservoir properties including open and closed porosity,



geodesic tortuosity, and percolation path characteristics were performed, as well as numerical simulation of filtration flow in three orthogonal directions. Special attention was paid to determining the representative elementary volume based on step-by-step averaging of porosity across cubic domains. The results demonstrate a weak but stable anisotropy in the filtration properties of rocks, associated with the directional structure of the pore framework. It has been found that even with similar values of open porosity, the geometry of filtration paths and tortuosity have a significant effect on permeability. The data obtained are of practical importance for geological and hydrodynamic simulations, optimization of horizontal well direction, assessment of sand production risk, and prediction of filtration front stability in offshore field development. The work emphasizes the need for a comprehensive digital approach when assessing the filtration properties of reservoirs in conditions of complex lithology and limited core material.

Keywords

digital core analysis, porosity, permeability, tortuosity, percolation paths, filtration properties, anisotropy, filtration and capacitance properties

For citation

Khimulia V.V. Comprehensive study of the anisotropy of microstructural and filtration properties of a gas condensate field reservoir based on digital core analysis. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):357–368. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-05-413>

Введение

Современные технологии, основанные на применении методов численного моделирования и рентгеновской микротомографии, предоставляют новые возможности для детального изучения порового пространства коллектора и прогноза его фильтрационно-ёмкостных свойств [1, 2]. Однако традиционные методы оценки (лабораторные измерения на керне [3], гидродинамические исследования скважин, эмпирические корреляции [4]) не учитывают микроструктуру порового каркаса и часто не позволяют надёжно прогнозировать проницаемость только на основе пористости [4]. Это особенно актуально для слабосцементированных песчаников газоконденсатных шельфовых месторождений, для которых стабильность коллектора и эффективность фильтрации [5] часто зависят не только от объёма пор, но и от их пространственной организации [6]. Использование цифровых двойников керна на основе микротомографических данных позволяет воспроизвести топологию порового пространства [7, 8] и повысить достоверность прогноза продуктивности [9].

Одной из ключевых задач цифрового анализа является количественная характеристика параметров, влияющих на фильтрационные процессы, включая открытую и закрытую пористость [7, 9], извилистость [10], структуру перколяционных каналов [11] и направленную (анизотропную) изменчивость этих параметров [12, 13]. Это особенно важно при эксплуатации пластов горизонтальными скважинами, где эффективность дренажа может значительно зависеть от ориентации ствола относительно текстурных особенностей коллектора [14, 15].

Количество и морфология фильтрационных каналов приобретают критическое значение при разработке шельфовых месторождений [16], где эксплуатационные ошибки могут привести к пескопроявлениям, выносу породы и резкому падению проницаемости [17, 18]. В условиях слабосцементированных пород устойчивость стенок скважин [19] и локальная проницаемость определяются не столько средними характеристиками [20], сколько микроструктурными параметрами порового каркаса, включая субструктурную анизотропию [21, 22].

Несмотря на увеличивающуюся значимость учета вышеописанных характеристик большинство исследований ограничиваются изотропными моделями или фокусируются на пористости, не учитывая комплексного влияния морфологии пор на фильтрацию [23, 24].

Целью настоящего исследования является количественное описание анизотропии фильтрационно-ёмкостных свойств, направленный анализ морфометрических характеристик и их связи с проницаемостью для слабосцементированных песчаников продуктивного интервала газоконденсатного месторождения северного шельфа на основе цифровых двойников керна с последующей интерпретацией результатов для задач гидродинамического моделирования, распространения фронта фильтрации в пласте и проектирования направлений горизонтальных скважин. Научная новизна работы заключается в выполнении комплексной цифровой оценки пространственной анизотропии порового пространства с учётом морфологических и физических особенностей коллектора, установлении факта устойчивой субструктурной анизотропии внутри плоскости напластования для рассматриваемого месторождения, обосновании направлений бурения горизонтальных скважин в условиях текстурной неоднородности пласта, выводах о рисках локального накопления давления в пласте и капиллярной изоляции конденсата.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- построение цифровых двойников керна по микротомографическим данным высокого разрешения;
- определение открытой и закрытой пористости, извилистости, параметров перколяционных путей и оценка их направленной вариации;
- численное моделирование фильтрационного потока по трём ортогональным направлениям с расчётом проницаемости;
- анализ соотношения между геометрическими характеристиками порового пространства и фильтрационными свойствами;
- определение репрезентативного элементарного объёма (REV) и обоснование достоверности цифровой модели.

1. Методика и объекты исследований

Объектом исследования являлись породы-коллекторы продуктивного пласта газоконденсатного месторождения, расположенного на северном шельфе России. Породы представлены слабосцементированными песчаниками с низкой прочностью, обладающими высокими пористостью и проницаемостью. Коллектор экстрагированный, характеризуется отсутствием выраженного визуального напластования, подвержен интенсивному пескопроявлению. Из продуктивного интервала были отобраны фрагменты зерна с последующей подготовкой более 10 образцов произвольной формы с габаритами от 5 до 20 мм. Для исследования порового пространства применялась технология рентгеновской компьютерной микрофотографии. Сканирование проводилось с использованием оборудования Procon X-Ray CT-MINI Института проблем механики РАН [9]. Полученные томографические данные представляли собой наборы срезов с разрешением (размер вокселя – кубического пикселя [25]) 4,995 мкм, реконструированных в трёхмерные цифровые модели фрагментов зерна. Все образцы имели схожий структурный состав, что подтверждает репрезентативность выборки, однако для последующего цифрового анализа были отобраны образцы с полным отсутствием трещиноватости, которая может быть следствием влияния условий транспортировки и хранения подверженного растрескиванию материала.

После процедуры реконструкции и обработки (включая коррекции яркости Gradient и/или Gaussian Brightness correction [26], фильтрации алгоритмами Non-local Means [27]) выполнялась сегментация [28] томографических снимков для выделения двух фаз: порового пространства (воздуха) и твёрдой матрицы (зерен). Для реконструкции использовалось ПО VGStudio [29], а также авторские алгоритмы для обработки 3D-снимков. Для сегментации использовались пороговые алгоритмы, основанные на анализе гистограммы распределения интенсивностей [28].

В результате формировалась бинарная воксельная модель (цифровой двойник), в которой каждый воксель обозначался либо как поровый, либо как матричный. Такие модели служат основой для последующих вычислений. На рис. 1 показаны основные этапы работы со снимками.

Цифровой анализ порового пространства включал:

- оценку открытой и закрытой пористости в трёх ортогональных направлениях;

- расчет геодезической извилистости (минимальной, максимальной и средней) на основе алгоритмов поиска кратчайших путей от одной грани трехмерной бинарной модели до противоположной;

- выделение и анализ перколяционных путей, включая расчет их длины и диаметра сужений (максимального диаметра проходимой через канал частицы);

- численное моделирование фильтрационного потока на базе модели Навье–Стокса с использованием условий ламинарного течения для оценки проницаемости и распределения потоков в каждом направлении;

- построение визуальных карт скоростей, градиентов давления и распределения пористости по слоям для качественной интерпретации пространственной структуры порового каркаса.

Анализ порового пространства выполнен в среде GeoDict [30]. Открытая и закрытая пористость вычислялась путём подсчёта долей поровых вокселей. Открытая пористость определялась как доля вокселей, которые связаны с одной из внешних граней модели и формируют сквозной путь. Закрытая пористость – это оставшиеся изолированные поры, не соединённые с внешними гранями. Эти значения рассчитывались отдельно по трём ортогональным направлениям.

Геодезическая извилистость оценивалась на основе построения кратчайших путей от одной грани образца до противоположной в каждом направлении. Извилистость определялась как отношение длины пути по поровому пространству к геометрической длине образца.

Размер вокселя 4,995 мкм

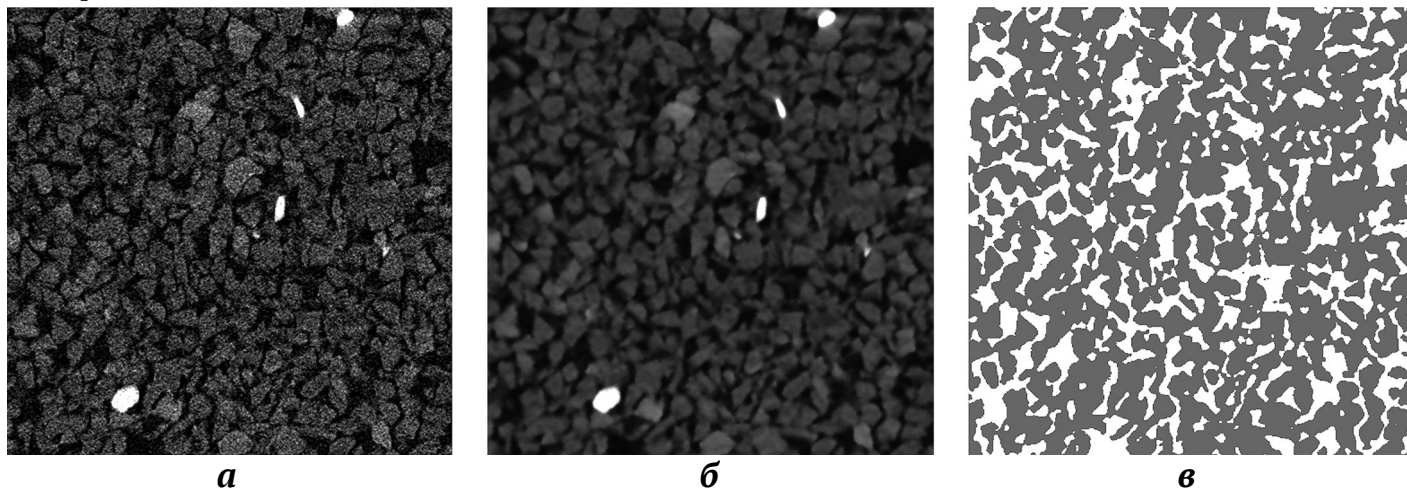


Рис. 1. Основные этапы предобработки и сегментации томографических данных: *а* – часть проекции реконструированного снимка; *б* – часть проекции снимка после предварительной обработки и сглаживания; *в* – эта же область после сегментации на две фазы: серым изображены зерна матрицы, белым – поры



В отличие от извилистости, которая может учитывать узкие участки, недоступные для реального флюида, алгоритм поиска перколяционных путей строил физически реалистичные траектории, учитывая диаметр проходимой частицы. Алгоритм исключал пути с «горлышками», меньшими заданного диаметра, и отбирал те каналы, по которым частица могла бы пройти, не нарушая непрерывности. Для каждого направления рассчитывались: длина перколяционного пути – действительное расстояние, которое прошла бы частица; максимальный диаметр – минимальный поперечный размер по пути (самое узкое место), определяющий проходимость. В результате визуализации получен набор фильтрационных каналов, соответствующих физическим условиям флюидопроводности. Таким образом, в работе применяется физически ориентированный подход к перколяции, позволяющий выявлять эффективные траектории фильтрационного потока с учётом геометрических ограничений.

На базе бинарной модели проводилось моделирование течения флюида (воздуха) через поровое пространство по уравнениям Навье–Стокса [31] в стационарной ламинарной постановке:

$$-\mu \Delta \vec{u} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + \nabla p = \vec{f},$$

где μ – вязкость жидкости, Па·с; \vec{u} – скорость жидкости, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; p – давление, Па; \vec{f} – объемная сила, Н/м³.

Уравнение сохранения массы в данном случае принимает вид:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0.$$

Проницаемость материала может быть рассчитана с использованием закона Дарси:

$$Q = \frac{-kA}{\mu} \cdot \frac{P_b - P_a}{L},$$

где Q – поток жидкости, м³/с; k – проницаемость среды, м²; A – площадь поперечного сечения потока, м²; μ – вязкость жидкости, Па·с; P_b, P_a – давления, Па; L – длина, на которой происходит этот перепад давления, м.

В данном исследовании для численного моделирования фильтрации использовался решатель LIR [32]. Расчёты выполнялись с заданным перепадом давления 100 Па. Критерий завершения вычислений – error bound 0,1 [33]. В направлении расчета выставлялись периодические граничные условия с прослойками в 10 вокселей на входе и выходе для однородности потока. Симметричные граничные условия были выставлены в тангенциальном направлении [33]. На выходе рассчитывались: поля скоростей и давления; интегральное значение проницаемости по каждому направлению (по обобщённому закону Дарси); визуализация скоростных каналов, отражающая активные пути фильтрации. В отличие от традиционных методов оценки проницаемости, таких как лабораторные фильтрационные эксперименты, корреляции типа ϕ – k , модели Козени–Кармана, используемый подход основан на прямом численном моделировании фильтрации по 3D-данным микротомографии. Он позволяет не только учитывать реальную геометрию порового простран-

ства и анизотропию, но и проводить детальный анализ структуры фильтрационных каналов.

Для качественной оценки неоднородности структуры порового пространства строились картограммы послойной пористости [34]. Модель усреднялась по слоям, перпендикулярным к выбранной оси, а затем пористость отображалась в виде двумерной цветовой карты. Это позволяло выявить вертикальные или горизонтальные флуктуации в структуре и визуально оценить однородность образца.

В дополнение к численному моделированию проводились лабораторные измерения проницаемости по оси керна Z и в плоскости напластования XY на установке ИСТНН ИПМех РАН [9]. Полученные лабораторные значения использовались для валидации цифровой модели и сопоставления с результатами прямого численного расчёта.

2. Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены сводные результаты цифрового анализа для трёх характерных образцов. Итоговые цифровые образцы представляли собой кубы с габаритами 500 вокселей, по которым выполнялись расчёты фильтрации в трёх взаимно перпендикулярных направлениях – X , Y и Z (ось Z совпадает с продольной осью керна). Таблица включает значения геодезической извилистости (минимальной, максимальной и средней), длины, рассчитанной в ходе оценки извилистости траектории (минимальной, максимальной и средней), параметров перколяционных путей (средний максимальный диаметр частицы и средняя длина физического пути по всем каналам в заданном направлении), а также значения открытой и закрытой пористости, вычисленной проницаемости. Таблица структурирована по образцам: строки сгруппированы по номеру образца, каждая строка соответствует одному направлению моделирования.

Полученные данные по пористости демонстрируют высокую однородность порового пространства как в количественном отношении, так и в пространственном распределении. Открытая пористость во всех трёх ортогональных направлениях практически идентична и составляет около 26 % (см. табл. 1), причём различия между направлениями не превышают сотых долей процента. Максимальное значение открытой пористости наблюдается по оси X ($\approx 26,007$ %), минимальное – по оси Y ($\approx 25,995$ %), а по оси Z составляет $\approx 26,008$ %. Таким образом, разница в открытой пористости между X , Y и Z ничтожно мала (не более 0,013 пп.), что указывает на отсутствие направленной анизотропии открытой пористости и подтверждает текстурную однородность образцов. Стандартное отклонение значений открытой пористости между образцами для каждого направления не превышает 0,005 %, а коэффициент вариации составляет менее 0,02 % – это свидетельствует о высокой воспроизводимости полученных результатов. Закрытая пористость также имеет очень низкие значения (порядка десятых долей процента) и незначительно варьируется между направлениями. Необычно, что по направлению Y она оказалась несколько выше ($\approx 0,413$ %) по сравнению с Z ($\approx 0,204$ %) и X ($\approx 0,176$ %).



Такой результат на первый взгляд противоречит ожидаемому влиянию: обычно более высокая доля изолированных пор (закрытая пористость) должна ухудшать фильтрационные свойства. В данном случае, однако, разница настолько мала в абсолютном выражении, что её влияние не прослеживается – направление Y остаётся наиболее проницаемым даже при повышенной закрытой пористости. Низкие значения тупиковой пористости подтверждают высокую степень связности пустотного пространства и коррелируют с долей закрытых пор, что может указывать на возникновение их преимущественно в силу сечения изолированных пор границами рассматриваемых структур. В целом, столь малый разброс значений пористости (менее 0,5 % относительно) позволяет считать поровый каркас практически изотропным по параметру пористости.

Геодезическая извилистость порового пространства демонстрирует ограниченные, хотя и устойчивые колебания от ~1,03 до 1,26. Эти значения указывают на то, что реальные пути фильтрации лишь немного длиннее прямого (геометрического) размера образца. Разброс средней извилистости между разными образцами незначителен (стандартное отклонение ~0,01, коэффициент вариации ~1 %), что подчёркивает воспроизводимость данного параметра. В плоскости напластования (оси X и Y) наблюдается нетипичная разница: средняя извилистость по оси Y чуть меньше, чем по оси X (на ~3–4 %), несмотря на расположение этих направлений в плоскости залегания породы. Одновременно ось Z (ось зерна) ожидаемо показывает более высокую извилистость, что отражает влияние напластования. Тем не менее все полученные значения τ остаются низкими (~1,1), подтверждая высокую связанность поровых каналов.

Анализ путей перколяции позволил получить дополнительную информацию о геометрии порового пространства, которая выходит за пределы чисто геодезических характеристик. Для каждого направления (X , Y , Z) было определено по 100 перколяционных путей, представляющих собой физически реализуемые

траектории, по которым могла бы пройти частица сквозь поровую систему. В отличие от извилистости, отражающей только длину геометрической кривой, алгоритм перколяции учитывает минимальные размеры поровых горлышек, способных пропустить частицу определённого диаметра. На рис. 2 представлены на примере одного из образцов перколяционные пути по трём ортогональным направлениям ($a - X$, $b - Y$, $c - Z$) с наложенным цветовым градиентом, отображающим длину каждой траектории от входной до выходной поверхности. Во всех трёх направлениях перколяционные каналы формируют организованную, связную сетевую структуру с длинными непрерывными потоковыми зонами, без резких локальных искажений или пятен, которые могли бы свидетельствовать о наличии зон, требующих обхода или указывающих на локальные барьеры.

На рис. 3 показано распределение скоростей фильтрационного потока; во всех случаях видны схожие вытянутые области высоких скоростей, соответствующие «магистральным» каналам потока. Это означает, что в образцах присутствуют направленные пути фильтрации с минимальными геометрическими препятствиями, и подтверждает, что степень связности порового пространства высока в любом направлении. Таким образом, несмотря на слабую анизотропию фильтрационных свойств (см. ниже) сама геометрия порового каркаса близка к изотропной – как по интегральным показателям (пористость, извилистость), так и по структурной организации перколяционных путей.

В отличие от пористости, фильтрационные свойства проявляют слабовыраженную, но отчётливую анизотропию. Расчётные значения проницаемости (см. табл. 1) различаются между тремя осями. Наблюдается слабое проявление нетипичного типа анизотропии: одно из горизонтальных направлений X оказалось менее проницаемым, чем вертикальное направление Z , а предпочтительный фильтрационный поток ориентирован вдоль оси Y . В количественном отношении эта анизотропия невелика (отношение

Таблица 1

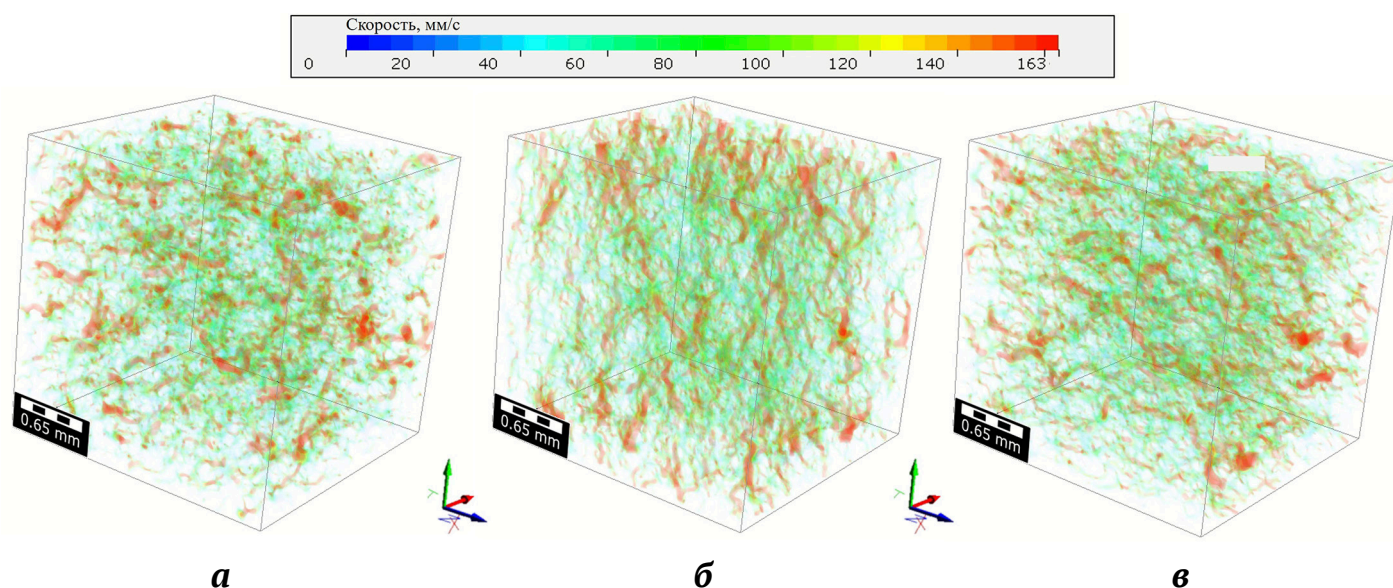
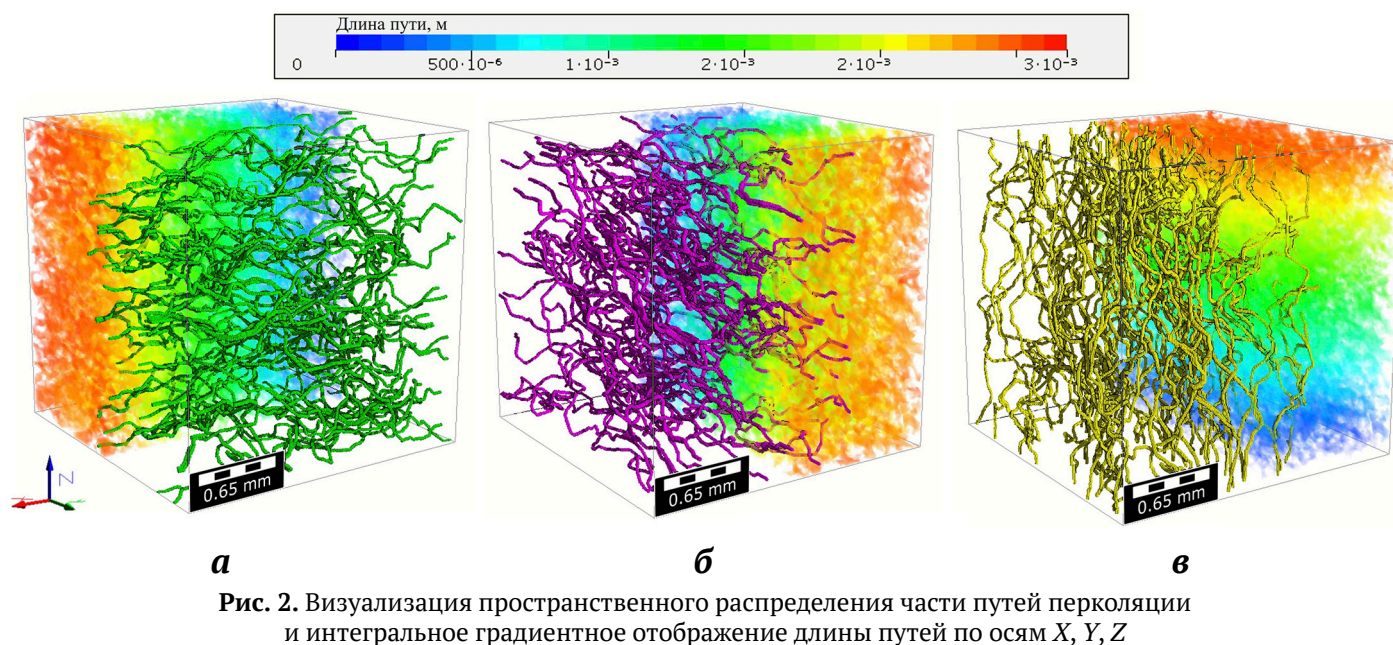
Сводные результаты проведенного цифрового анализа

№ образца	Ось	Минимальная извилистость	Максимальная извилистость	Средняя извилистость	Минимальная длина траектории, мкм	Максимальная длина траектории, мкм	Средняя длина траектории, мкм	Средний максимальный диаметр частиц, мкм	Средняя физическая длина пути, мкм	Вычисленная проницаемость, Д	Открытая пористость, %	Закрытая пористость, %	Тупиковая пористость, %
1	X	1,045	1,244	1,117	2590	3081	2767	22,64	4290	3,334	26,011	0,176	0,036
	Y	1,036	1,161	1,081	2568	2875	2678	22,88	4456	4,296	25,998	0,413	0,081
	Z	1,061	1,201	1,106	2628	2976	2740	22,58	4133	3,583	26,010	0,204	0,044
2	X	1,051	1,262	1,134	2604	3088	2751	22,43	4280	3,316	26,007	0,180	0,031
	Y	1,035	1,158	1,089	2556	2820	2651	22,56	4459	4,301	25,995	0,407	0,087
	Z	1,067	1,198	1,101	2615	2925	2749	22,91	4074	3,572	26,008	0,206	0,039
3	X	1,049	1,236	1,105	2596	3087	2763	22,48	4304	3,340	26,014	0,175	0,040
	Y	1,030	1,182	1,090	2517	2897	2670	22,77	4377	4,308	25,999	0,414	0,086
	Z	1,057	1,201	1,092	2593	2981	2700	22,82	4146	3,590	26,012	0,205	0,062

$k_Y : k_X \approx 1,3$, $k_Y : k_Z \approx 1,2$), но она устойчиво воспроизводится во всех образцах. Разброс значений проницаемости между разными образцами для каждой оси не превышает 0,01 Д (относительный коэффициент вариации $< 0,5\%$), благодаря чему выявленная разница между X, Y и Z является статистически достоверной и обусловлена микроструктурой породы. Это подтверждается и независимыми физическими экспериментами: лабораторные измерения на керновом материале показали проницаемость $\sim 5,6$ Д вдоль оси керна и $\sim 6,1$ Д в плоскости напластования XY. Хотя абсолютные значения в лаборатории несколько выше, соотношение между направлениями аналогично модельным данным, указывая на наличие слабой, но устойчивой трансверсальной анизотропии фильтрационных свойств породы. Хорошее соответствие результатов численного моделирования и эксперимента свиде-

тельствует о корректности применённого цифрового подхода и адекватности модели для воспроизведения реального фильтрационного поведения образцов.

Картограммы пористости, полученные путём послойного усреднения по каждому направлению, представлены на рис. 4. Цветовая шкала отражает локальные значения пористости; синий соответствует минимальным значениям, красный – максимальным. По всем трём проекциям (a – YZ, б – XZ, в – XY) распределение значений сохраняет близкую структуру: на изображениях преобладают зоны с равномерным переходом от голубых к зелёно-жёлтым оттенкам, что соответствует значениям пористости около среднего значения. Локальные отклонения встречаются, но не формируют кластеров или выраженных направленных аномалий. Это свидетельствует о том, что структура порового пространства сохраняет близкий к изотроп-



ному характер не только по интегральным значениям, но и по распределению пор в объёме. Это позволяет предположить, что наблюдаемые различия в фильтрационных свойствах связаны не с пористостью как таковой, а с геометрией соединения пор – извилистостью, шириной горловин и степенью их связности.

Результаты показывают, что при одинаковой пористости различия в геометрии порового пространства (извилистость, размер каналов, связность) существенно влияют на проницаемость. Направление Y демонстрирует наибольшую проницаемость, сочетая минимальную среднюю извилистость и немного больший средний диаметр поровых каналов (см. табл. 1). Согласно формуле Козени–Кармана (в модификации Беккера) для однородной пористой среды:

$$k = \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{1}{C\tau^2 S_0^2},$$

где ϕ – пористость; C – константа структуры; τ – коэффициент извилистости; S_0 – удельная поверхность зерен. Соотношение является качественной иллюстрацией известных взаимосвязей, однако часто используется для первичной оценки свойств поровых сред. Пористость в рассматриваемых образцах почти постоянна ($\phi \approx 26\%$), а различия в удельной поверхности можно оценить через характерный размер порового канала. Приняв, что S_0 обратно пропорциональна среднему диаметру пор d , формулу можно упростить до: $k \propto d^2/\tau^2$. Это отражает интуитивно ожидаемую зависимость: увеличение поперечного сечения потока (большой d) и уменьшение извилистости (меньший τ) повышают проницаемость. Действительно, качественно наблюдаемая анизотропия согласуется с этой моделью: направление Y имеет крупнейший средний диаметр пор ($\sim 22,8$ мкм) и наименьшую извилистость ($\sim 1,08$), благодаря чему и демонстрирует максимальное k .

Однако количественно классическая модель недооценивает эффект. Расчёты показывают, что при снижении τ всего на $\sim 3\%$ и увеличении d на $\sim 1\%$ (как в направлении Y относительно X) относительный рост k должен составить лишь около 10% , тогда как по моделированию он достигает $\sim 30\%$. Аналогично перколяционная модель Каца–Томпсона (связывающая проницаемость с квадратом критического радиуса порового

канала) предсказывает почти равные значения k для X и Y ввиду практически одинакового размера «горлышек» (в рассматриваемом случае средний максимальный диаметр ограничивающих отверстий отличается менее чем на 1%). Таким образом, стандартные модели не полностью объясняют полученную анизотропию, что указывает на наличие дополнительных факторов. Вероятно, более высокая проницаемость по оси Y обусловлена тонкой организацией поровых каналов, не отражённой напрямую в усреднённых параметрах d и τ (например, конфигурацией сети пор, распределением радиусов и т.д.). В направлении Y реализованы более прямые и сквозные потоки благодаря литологической упорядоченности структуры, тогда как в направлении X часть каналов перегороджена или отклонена. Иными словами, проницаемость слабосцементированных песчаников оказывается крайне чувствительной к изменению извилистости и связности пор: даже небольшое «выпрямление» каналов даёт непропорционально большой прирост k . Аналогичные выводы сделаны в работе [35], в которой показано, что в песчаниках и карбонатах логарифмическая зависимость между проницаемостью и пористостью имеет большой разброс и сильно зависит от сортировки и диагенеза. Это наблюдение подтверждается и в настоящем исследовании, что подчёркивает ограниченность использования только пористости как прогностического параметра. Аналогично и в более поздней работе [36], основанной на статистическом моделировании 13 000 пористых структур, сделан вывод о том, что корреляция проницаемости и пористости может быть недостаточной, особенно при пористости ниже $0,7$, и что геометрические параметры, такие как извилистость и проводимость, при корректной формализации дают более точное описание фильтрационных особенностей порового пространства. Аналогичная связь пористости и проницаемости подчеркнута для нефтеносных песчаников в работе [37]. Особенно важно, что направление Y несмотря на минимальную открытую пористость оказалось наиболее проницаемым – что хорошо согласуется с гипотезами [38] о роли литологической упорядоченности и текстурной направленности в формировании эффективных каналов фильтрации. Это подчёркивает необходимость комплексного подхода к оценке кол-

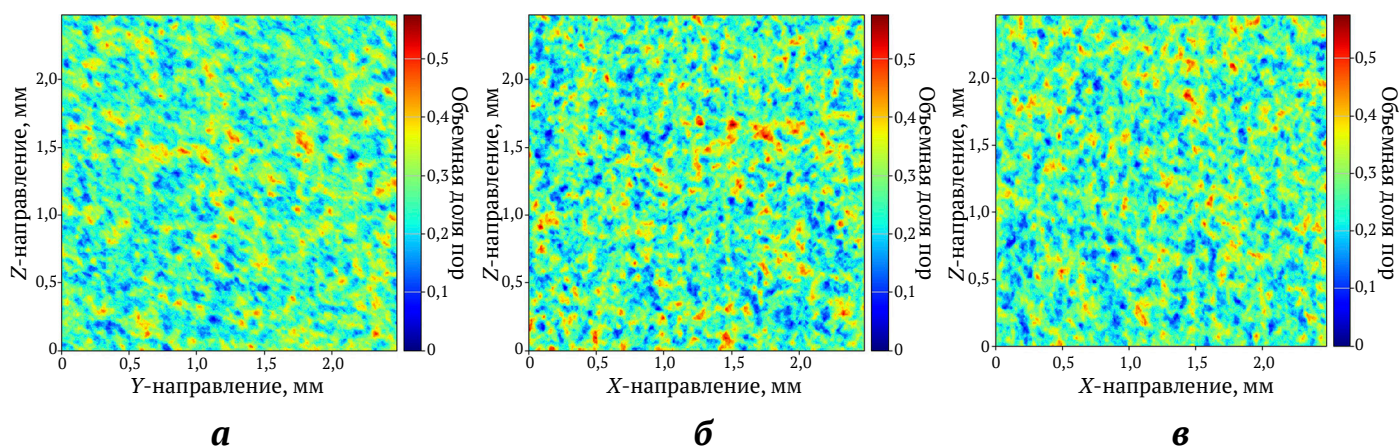


Рис. 4. Распределение усреднённых значений пористости по осям X , Y , Z

литорских свойств, включающего не только классические петрофизические параметры, но и топологический анализ поровой сети, прямое гидродинамическое моделирование и морфологическую характеристику порового каркаса.

Для корректной оценки параметров порового пространства цифровой модели необходимо определить репрезентативный элементарный объём (REV, Representative Elementary Volume [39]) – минимальный объём пористой среды, для которого значения исследуемых характеристик (в данном случае пористости) становятся статистически устойчивыми и перестают зависеть от размера выборки. Знание этого параметра обеспечивает достоверность и воспроизводимость дальнейших вычислений, в частности, моделирования процессов фильтрации и оценки проницаемости.

Для численного определения REV использовался метод поэтапного разбиения цифровой модели на домены меньшего размера с последующим анализом распределения пористости в каждом из них. В рамках данного подхода трёхмерная бинарная модель (полученная после реконструкции и сегментации) последовательно разбивалась на кубические домены различного размера: от крупных (300 вокселей по ребру) до более мелких (10 вокселей по ребру). На каждой стадии разбиения определялась пористость каждого выделенного домена, после чего строилась совокупная кривая распределения значений пористости.

На рис. 5 показан в общих чертах процесс разбиения исходных моделей на более мелкие домены. На рис. 6 отражены результаты количественного анализа пористости доменов: по горизонтальной оси отложены линейные размеры доменов (в вокселях), по вертикальной оси – рассчитанное значение пористости каждого домена. Каждая синяя точка соответствует пористости одного домена данного размера, а красная пунктирная линия – среднему значению пористости для соответствующего масштаба. Уменьшение разброса значений при увеличении размера домена свидетельствует о достижении статистической устойчивости параметра. Как видно из графика, при больших размерах домена (более 150 вокселей) разброс значений пористости между различными доменами становится минимальным и среднее значение стабилизируется. При расчётах ниже этого порога характеристики теряют устойчивость, что может приводить к некорректным обобщениям по модели. Все расчёты, выполненные в работе, были проведены на моделях с линейными размерами 500 вокселей. Также была проведена оценка REV на основе алгоритма контроля качества моделей песчаников, которая подтвердила достаточность используемого размера структур ($N(REV) > 25$). Данный подход учитывает соотношение наименьшей длины структуры к эффективному диаметру зерен [40] и обеспечивает надёжную оценку REV для однофазного потока жидкости в песчаниках.

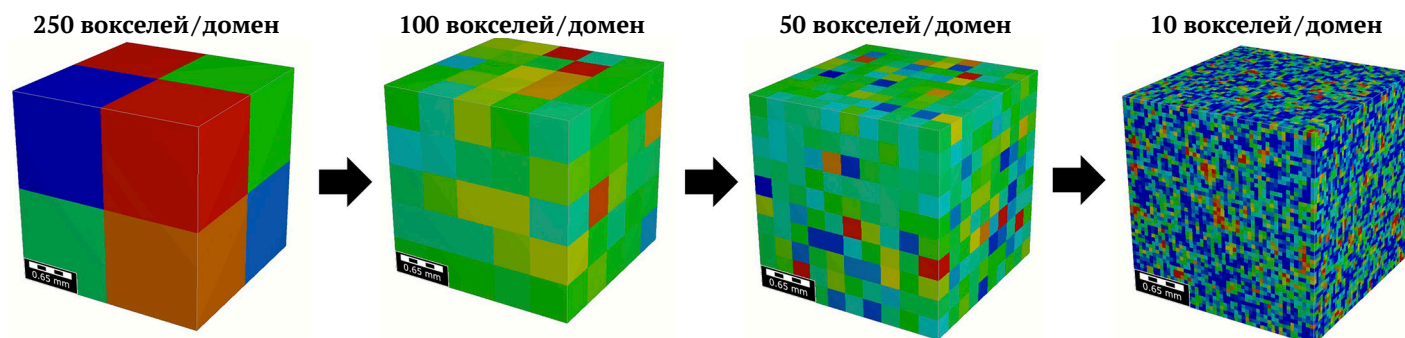


Рис. 5. Визуализация процесса определения репрезентативного элементарного объёма (REV) методом последовательного уменьшения размера доменов

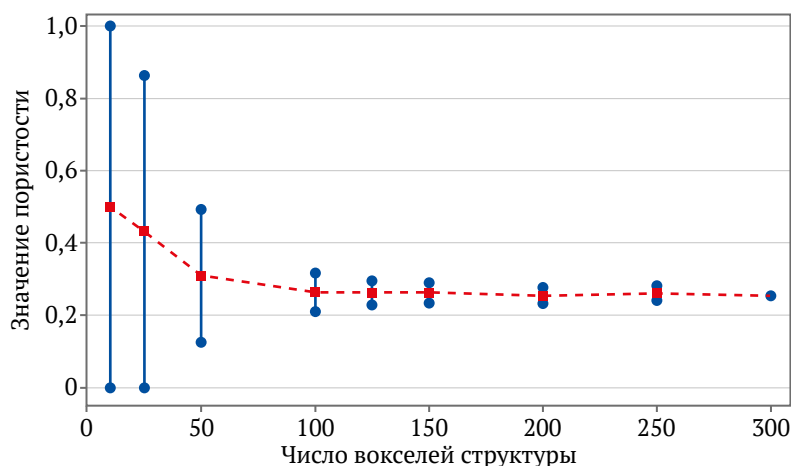


Рис. 6. Зависимость значения пористости от размера домена (числа вокселей по ребру) при определении репрезентативного элементарного объёма (REV)



3. Практические выводы и рекомендации

Выявленная анизотропия проницаемости связана с ориентированной структурой порового пространства в плоскости напластования. Выявленный профиль подтверждает целесообразность бурения горизонтальных скважин вдоль пласта – в направлении естественной текстуры пород, где сформированы наиболее проводящие фильтрационные каналы. Причем отдельное внимание стоит уделить выбору направления скважины в плоскости залегания в связи с проявлением нетипичной анизотропии: правильная ориентация стволов скважин позволит максимально задействовать высокопроницаемые пути и максимизировать дренаж пласта.

Высокая степень связности порового пространства и отсутствие барьерной анизотропии по проходимости частиц указывают на равномерность фильтрации во всех направлениях. Это значит, что фронт вытеснения (например, при закачке или продвижении газового/водного фронта) будет устойчивым и равномерным, без преждевременного прорыва в отдельных направлениях. Однородная внутренняя архитектура также благоприятна для полного дренажа пласта и эффективного вовлечения конденсата в поток. Минимальная доля изолированных пор (закрытая пористость < 0,5 %) и крупные поровые горловины снижают риск капиллярной изоляции конденсата – жидкая фаза не застревает в микропорах, а продолжает участвовать в фильтрации. Таким образом, обеспечивается более стабильная работа газоконденсатного пласта без резкого падения продуктивности из-за образования застойных зон конденсата.

Знание морфометрических характеристик поровых сетей позволяет с большей точностью подобрать оптимальный размер пропанта для гидроразрыва пласта и степень фильтрации закачиваемой воды. Таким образом предотвращаются закупорки пор частицами и вынос породного материала, что сохраняет проницаемость пласта. Применяемые методики цифрового анализа позволяют достоверно оценивать фильтрационно-ёмкостные свойства в условиях ограниченного кернового материала и могут обеспечить экспресс-оценку коллектора на этапе разведки: оперативное получение данных о пористости, проницаемости и анизотропии ускоряет принятие решений, сокращая зависимость от длительных лабораторных исследований.

Детальный анализ микроструктуры позволил оценить уязвимые места породы с точки зрения выноса частиц. Визуализация потоков показала наличие непрерывных высокоскоростных каналов фильтрации. В слабосцементированных песчаниках такие зоны концентрации потока могут вызывать повышенные напряжения на скелет и способствовать выносу зерен. Однако равномерное распределение пор и высокое общесвязное поровое пространство означают отсутствие резко выраженных «узких горлышек», где скорость локально возрастала бы экстремально. Это снижает риск внезапных пескопроявлений. Полученные результаты следует учитывать при проектировании режимов работы скважин: недопущение

чрезмерных депрессий и равномерное распределение отбора по пласту будут способствовать стабильности стенок скважин. Интеграция полученных данных в геомеханические модели позволит количественно предсказать критические градиенты давления, при которых возможно разрушение породы, и тем самым минимизировать риск пескопроявлений.

4. Перспективы исследований

Дальнейшее развитие направлений исследований планируется за счет обоснования моделей извилистости порового пространства слабосцементированных песчаников и выявления её влияния на фильтрационные свойства этих пород. Планируется уточнить предельные условия применимости формулы Козе-ни–Кармана и перколяционных моделей для рассматриваемых слабосцементированных коллекторов. Отдельной задачей является обеспечение масштабируемости параметров от микроуровня к масштабам керна и пласта, чтобы цифровые модели лучше отражали свойства на уровне пласта. Важным направлением является развитие цифровых моделей порового пространства для применения в моделировании многофазных или термо-гидромеханических процессов, что позволит учитывать натурные условия в коллекторе. Кроме того, не менее актуально развитие методов машинного обучения для автоматического прогнозирования фильтрационно-ёмкостных свойств по данным микроструктурного анализа.

С прикладной точки зрения одним из ключевых направлений дальнейших исследований является разработка протоколов экспресс-оценки проницаемости по цифровым моделям. Важной задачей является интеграция результатов цифрового моделирования в геолого-гидродинамические модели месторождений, особенно при ограниченном объёме исходных данных. Практическую значимость представляет адаптация методики на породах со сложной и неоднородной поровой структурой (например, карбонатах и трещиноватых песчаниках), что позволит распространить подход на более широкий класс коллекторов.

Заключение

Проведенное исследование анизотропии фильтрационно-ёмкостных свойств слабосцементированных песчаников газоконденсатного месторождения на основе цифрового анализа керна позволило получить новые данные о взаимосвязи микроструктуры порового пространства и фильтрационных характеристик. Комплексный подход, включающий микротомографию, 3D-моделирование и численные расчёты, подтвердил высокую точность цифровых методов при оценке коллекторских свойств, особенно в условиях ограниченного кернового материала, а также позволил сделать ряд выводов, важных для оценки коллекторских свойств и оптимизации разработки пласта.

1. Показатели открытой пористости практически идентичны во всех направлениях (~26 %), однако проницаемость демонстрирует слабую, но устойчивую нетипичную анизотропию. Наибольшие значения проницаемости наблюдаются вдоль одного из на-



правлений в плоскости напластования, что связано с пониженной извилистостью и размером пор в этом направлении.

2. Показано, что при одинаковой пористости проницаемость существенно зависит от извилистости каналов, ширины горловин и связности пор. Классические модели типа Козени–Кармана недооценивают влияние этих факторов, что подчеркивает необходимость комплексного анализа морфологии порового пространства.

3. Оптимальное направление горизонтальных скважин должно учитывать выявленные особенности анизотропии проницаемости (отличие до 30 % в разных направлениях) для максимизации дренажа, что позволит максимально задействовать наиболее высокопроницаемые пути по направлению к скважине, будет способствовать снижению депрессии при одинаковых темпах отбора и поможет улучшить охват пласта при закачке рабочих агентов.

4. Установленная равномерность структуры порового пространства, включая диаметр фильтруемых частиц, способствует минимизации рисков пескопроявлений благодаря снижению локальных скоростей фильтрационного потока. Кроме того, низкие значе-

ния закрытой пористости уменьшают вероятность капиллярного запираания конденсата.

5. Цифровые методы позволяют оперативно оценивать свойства коллектора на этапе разведки и минимизировать неопределённости при дефиците керна. При этом требуется минимальный объем образца (от 5 мм³), что критически важно для шельфовых месторождений с дефицитом ядерного материала. Полученный широкий спектр данных может оперативно интегрироваться в гидродинамические модели, значительно повышая их прогностическую способность. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с лабораторными измерениями, подтверждая достоверность подхода для прогнозирования фильтрационных свойств в сложных геологических условиях.

Таким образом, работа демонстрирует эффективность цифровых технологий для изучения анизотропии коллекторов и предоставляет инструменты для оптимизации разработки месторождений, особенно в условиях шельфовой добычи, где доступ к физическим образцам ограничен, а требования к надёжности прогноза – повышены. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение моделей извилистости и масштабирование результатов на масштаб пласта.

Список литературы / References

1. Ponomarev A.A., Kadyrov M.A., Tugushev O.A., et al. Digital core reconstruction research: challenges and prospects. *Geology, Ecology, and Landscapes*. 2024;8(1):49–56. <https://doi.org/10.1080/24749508.2022.2086201>
2. Abdollahi-Mamoudan F., Savard S., Filletter T., et al. Numerical simulation and experimental study of capacitive imaging technique as a nondestructive testing method. *Applied Sciences*. 2021;11(9):3804. <https://doi.org/10.3390/app11093804>
3. Novikova E. V., Trimonova M. A., Dubinya N. V. et al. Estimation of breakdown pressure in laboratory experiments on hydraulic fracturing. *Materials Physics and Mechanics*. 2023;51(5):52–65. https://doi.org/10.18149/MPM.5152023_6
4. Hommel J., Coltman E., Class H. Porosity–permeability relations for evolving pore space: a review with a focus on (bio-)geochemically altered porous media. *Transport in Porous Media*. 2018;124(2):589–629. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1086-2>
5. Jing W., Zhang L., Li A., et al. Phase behaviors of gas condensate at pore scale: direct visualization via microfluidics and in-situ CT scanning. *SPE Journal*. 2024;29(5):2566–2577. <https://doi.org/10.2118/218421-PA>
6. Hosseinzadegan A., Mahdiyar H., Raoof A., et al. The pore-network modeling of gas-condensate flow: elucidating the effect of pore morphology, wettability, interfacial tension, and flow rate. *Geoenergy Science and Engineering*. 2023;229:211937. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211937>
7. Wang S., Qu H., Yu S., Zhang S.X. Nondestructive investigation on close and open porosity of additively manufactured parts using an X-ray computed tomography. *Materials Today: Proceedings*. 2022;70:124–130. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.559>
8. Bushuev Y.G., Grosu Y., Chorążewski M.A., Meloni S. Subnanometer topological tuning of the liquid intrusion/extrusion characteristics of hydrophobic micropores. *Nano Letters*. 2022;22(6):2164–2169. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c02140>
9. Khimulia V.V., Karev V.I. Pore-Scale Computational Study of Permeability and Pore Space Geometry in Gas Condensate Reservoir Rocks. In: Karev V. (ed.) *Proceedings of the 9th International Conference on Physical and Mathematical Modelling of Earth and Environmental Processes. PMMEEP 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Cham: Springer; 2024. Pp. 243–256. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54589-4_26
10. Panini F., Ghanbarian B., Borello E.S., Viberti D. Estimating geometric tortuosity of saturated rocks from micro-CT images using percolation theory. *Transport in Porous Media*. 2024;151(7):1579–1606. <https://doi.org/10.1007/s11242-024-02085-w>
11. Lian S., Meng T., Song H., et al. Relationship between percolation mechanism and pore characteristics of recycled permeable bricks based on X-ray computed tomography. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2021;60(1):207–215. <https://doi.org/10.1515/rams-2021-0022>



12. Yang Y., Wang D., Yang J., Wang B., Liu T. Fractal analysis of CT images of tight sandstone with anisotropy and permeability prediction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;205:108919. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108919>
13. Aljawad M.S. Permeability anisotropy impact on wormhole propagation in openhole and limited-entry completions: a 3D numerical study. *Gas Science and Engineering*. 2023;116:205050. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.205050>
14. Lux M., Szanyi J. Effects of vertical anisotropy on optimization of multilateral well geometry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022;208:109424. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109424>
15. Wang N., Chang H., Zhang D., et al. Efficient well placement optimization based on theory-guided convolutional neural network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022;208:109545. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109545>
16. Muravyev A.V. Gas condensate wells: challenges of sampling, testing and production optimization. *Energies*. 2022;15(15):5419. <https://doi.org/10.3390/en15155419>
17. Poplygin V. V., Riabokon E. P., Turbakov M. S. et al. Changes in rock permeability near-wellbore due to operational loads. *Materials Physics and Mechanics*. 2022;48(2):175–183. https://doi.org/10.18149/MPM.4822022_3
18. Yusupov Y., Zaglyadin Y. Application of a 4D geomechanical model to reduce the risks of offshore field (Russian Federation) development throughout the entire life cycle. In: *ARMA/DGS/SEG International Geomechanics Symposium*. Kuala Lumpur, Malaysia, November 18–20, 2024. Paper IGS-2024-0194. <https://doi.org/10.56952/IGS-2024-0194>
19. Zhen W., Liu H., Chi M., et al. Investigation into the influence of stress conditions on the permeability characteristics of weakly cemented sandstone. *Applied Sciences*. 2023;13(22):12105. <https://doi.org/10.3390/app132212105>
20. Deng X., Zhou X., Patil S., et al. Multiphase flow dynamics with micro-CT imaging: review of applications in oil and gas industry. *Energy & Fuels*. 2023;37(21):16311–16332. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c02446>
21. Razavifar M., Mukhametdinova A., Nikoee E., et al. Rock porous structure characterization: a critical assessment of various state-of-the-art techniques. *Transport in Porous Media*. 2021;136:431–456. <https://doi.org/10.1007/s11242-020-01518-6>
22. Ye Z.L., Lu H.W., Gao X., et al. Research progress of micro-CT in the field of petroleum engineering. In: *International Field Exploration and Development Conference*. Singapore: Springer; 2023. Pp. 726–738. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0468-2_55
23. Revina A.V., Konnov D.A., Revina N.S., Kolesnikova V.A. Analysis of the dependence of permeability on the open porosity of carbonate reservoir rocks in the areas of the Astrakhan gas condensate field. *Oil and Gas Technologies and Environmental Safety*. 2023;3(5):48–56. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-3-48-56>
24. Manzoor S., Zeidani K., Syed A. et al. Unified near wellbore modelling and impact of velocity-dependent relative permeability on performance of gas condensate fields. In: *ECMOR 2024 – 21st European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*. Naples, Italy, 3–6 June 2024. Houten: EAGE; 2024. Pp. 1–17. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202437069>
25. Bera A., Shukla B., Jogani D. A perspective review of applications of the computed tomography (CT) scan imaging technique for microscopic reservoir rock characterization. *Deep Underground Science and Engineering*. 2025. (In press) <https://doi.org/10.1002/dug2.12138>
26. Khimulia V.V. Digital examination of pore space characteristics and structural properties of a gas condensate field reservoir on the basis of μ CT images. In: *Conference on Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2023. Pp. 23–34. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54589-4_3
27. Kong H., Wu J., Liang W., et al. An improved non-local means algorithm for CT image denoising. *Multimedia Systems*. 2024;30(2):79. <https://doi.org/10.1007/s00530-024-01283-2>
28. Withers P.J., Bouman C., Carmignato S., et al. X-ray computed tomography. *Nature Reviews Methods Primers*. 2021;1(1):18. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00015-4>
29. Cayron C., Lowe T., Thompson A., MacDonald E. Comparison of dimensional measurements from images acquired by synchrotron tomography with VGSTUDIO MAX and ImageJ. In: *Proceedings of the Special Interest Group Meeting on Advancing Precision in Additive Manufacturing*. Bedford, UK, 2021. Bedford: European Society for Precision Engineering and Nanotechnology; 2021. Pp. 98–101.
30. Lu X., Huang J., Xu J., Lu J., et al. Comparison between two numerical methods for the computation of thermal conductivities of particulate composites: FEM and GeoDict. In: *Proceedings of the 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. Xiamen, China, 2021. Pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICEPT52650.2021.9568014>
31. Soulaire C. Micro-continuum modeling: an hybrid-scale approach for solving coupled processes in porous media. *Water Resources Research*. 2024;60(2):e2023WR035908. <https://doi.org/10.1029/2023WR035908>



32. Linden S., Wiegmann A., Hagen H. The LIR space partitioning system applied to the Stokes equations. *Graphical Models*. 2015;82:58–66. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2015.06.003>
33. Hilden J., Cheng L., Linden S., Planas B. *FlowDict User Guide. GeoDict release 2022*. Published: November 9, 2021. <https://doi.org/10.30423/userguide.geodict2022-flowdict>
34. Khimulia V.V. Digital analysis of changes in hydrocarbon reservoir pore space characteristics after filtration tests. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025;1:1–13. <https://doi.org/10.2205/2025ES000988>
35. Nelson P.H. Permeability–porosity relationships in sedimentary rocks. *The Log Analyst*. 1994;35(3):SPWLA-1994-v35n3a4. <https://doi.org/10.2118/SPWLA-1994-v35n3a4>
36. Rezaei Niya S.M., Selvadurai A.P.S. A statistical correlation between permeability, porosity, tortuosity and conductance. *Transport in Porous Media*. 2018;121(3):741–752. <https://doi.org/10.1007/s11242-017-0983-0>
37. Закиров Т.Р., Галеев А.А., Королев Э.А. и др. Исследование фильтрационно-емкостных свойств песчанников Ашальчинского месторождения методом рентгеновской компьютерной томографии. *Нефтяное хозяйство*. 2015;(8):96–99.
38. Zakirov T.R., Galeev A.A., Korolev E.A., et al. Estimation of sandstone reservoir properties using X-ray CT studies in Ashalchinskoye oil field. *Oil Industry*. 2015;(8):96–99. (In Russ.)
39. Yang Y., Aplin A.C. A permeability–porosity relationship for mudstones. *Marine and Petroleum Geology*. 2010;27(8):1692–1697. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.07.001>
40. Liu W., Han D., Wang G., Chu X. Representative elementary volume evaluation of coal microstructure based on CT 3D reconstruction. *Fuel*. 2023;336:126965. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126965>
41. Saxena N., Hows A., Hofmann R., et al. Imaging and computational considerations for image computed permeability: Operating envelope of Digital Rock Physics. *Advances in Water Resources*. 2018;(116):127–144. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.04.001>

Информация об авторе

Валерий Владимирович Химуля – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории геомеханики, Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-2116-6483](https://orcid.org/0000-0003-2116-6483), Scopus ID [57224741664](https://scopus.org/57224741664), ResearcherID [ACJ-7411-2022](https://orcid.org/ACJ-7411-2022); e-mail khim@ipmnet.ru

Information about the author

Valerii V. Khimulia – Cand. Sci. (Phys. & Math.), Researcher at the Laboratory of Geomechanics, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-2116-6483](https://orcid.org/0000-0003-2116-6483), Scopus ID [57224741664](https://scopus.org/57224741664), ResearcherID [ACJ-7411-2022](https://orcid.org/ACJ-7411-2022); e-mail khim@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 27.05.2025
Поступила после рецензирования 31.07.2025
Принята к публикации 17.10.2025

Received 27.05.2025
Revised 31.07.2025
Accepted 17.10.2025



ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-392>

УДК 630*181:581.5

**Влияние добычи оловорудного сырья на речной сток малых рек горнопромышленных районов**Н.К. Растанина¹ , Д.А. Голубев^{1,2} , Н.А. Каюмов^{1,2} , П.Л. Растанин¹ , И.А. Попадьев¹ ¹ Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация² Приморский государственный аграрно-технологический университет, г. Хабаровск, Российская Федерация

n.rastanina@yandex.ru

Аннотация

Добыча полезных ископаемых оказывает значительное воздействие на окружающую среду, особенно на гидрологический режим рек. Формирование отходов переработки горнорудного сырья в виде хвостохранилищ в долинах рек является общепринятой практикой. Лесной массив, как и речная сеть в данном случае, подвергаются активной трансформации. Происходит сплошная вырубка со снятием корнеобитаемого слоя и изменяется русло реки. При этом речной сток, формирующийся на участке, становится менее водоносным. С 70-х годов XX в. в бассейне р. Силинки Хабаровского края активно развивается деятельность по извлечению и переработке оловорудного сырья. Вследствие деятельности горнопромышленных предприятий формируются техногенные объекты в виде хвостохранилищ, карьеров, отвалов и т.д., которые являются объектами экологической и техногенной опасности, источниками загрязнения грунтовых и поверхностных вод, почвы, растительности и атмосферы. Лесистость территории является одним из основных показателей формирования речного стока, позволяющих рассчитать капитализированную стоимость 1 км² исследуемой территории. В работе с помощью расчёта лесистости через нормализованный разностный индекс вегетации дана оценка влияния процесса добычи оловорудного сырья в бассейне р. Силинки. Определено снижение средней стоимости 1 км² исследуемой территории на 25 %.

Ключевые слова

горнопромышленная система, хвостохранилище, экологический ущерб, речной сток, речной бассейн, нормализованный разностный индекс растительности, капитализированная стоимость

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., Kayumov N.A., Rastanin P.L., Popadyev I.A. Impact of tin ore mining on the streamflow of small rivers in mining regions. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):369–378. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-392>

ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Impact of tin ore mining on the streamflow of small rivers in mining regionsN.K. Rastanina¹ , D.A. Golubev^{1,2} , N.A. Kayumov^{1,2} , P.L. Rastanin¹ , I.A. Popadyev¹ ¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation² Primorsky State Agrarian-Technological University, Khabarovsk, Russian Federation

n.rastanina@yandex.ru

Abstract

Mineral extraction exerts a significant impact on the environment, particularly on the hydrological regime of rivers. The placement of tailings storage facilities in river valleys is a common practice in ore processing. Forest stands and river networks in such areas undergo intensive transformation involving large-scale deforestation with removal of the root-inhabited soil layer and alteration of river channels. As a result, the streamflow in the affected sections becomes less abundant. Since the 1970s, active tin ore mining and processing have been carried out in the Silinka River basin of the Khabarovsk Territory. Mining activities have produced technogenic



landforms such as tailings storage facilities, open pits, and waste dumps, which pose both ecological and technogenic hazards and act as sources of pollution for groundwater, surface water, soil, vegetation, and the atmosphere. Forest cover is one of the key indicators determining river runoff and can be used to estimate the capitalized value of 1 km² of the study area. Using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), this study assessed the impact of tin ore mining on the Silinka River basin. The results indicate a 25% decrease in the average capitalized value of 1 km² of the study area.

Keywords

mining system, tailings storage facility, environmental damage, river runoff, river basin, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), capitalized value

Funding

This research was supported by 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 the Khabarovsk Territory (Agreement No. 121C/2024).

For citation

Rastanina N.K., Golubev D.A., Kayumov N.A., Rastanin P.L., Popadyev I.A. Impact of tin ore mining on the streamflow of small rivers in mining regions. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):369–378. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-392>

Введение

Добыча полезных ископаемых является одним из ключевых источников дохода Российской Федерации, но также ведёт к значительному негативному экологическому воздействию. Так, на территории России накоплено уже более 80 млрд т отходов, расположенных на общей нарушенной горными работами площади 1,1 млн га. Ежегодно это число растёт и влечёт за собой снижение ключевых функций лесов, расположенных на местах и вблизи источников добычи и переработки минерального сырья. Создание таких объектов сопровождается сплошной вырубкой, снятием почвенного плодородного слоя и изменениями русел рек и речного стока¹ [1].

При этом состояние лесного массива является важным фактором в процессе формирования речного бассейна из поверхностных стоков, особенно в горнопромышленных районах [2]. М.Е. Ткаченко (1952) рассматривал водоохранную роль леса в более широком смысле и не сводил ее лишь к количественной оценке стока. По его мнению, благотворное влияние леса проявляется не только на поверхностных водах (реках, озерах, водохранилищах), но и на подземных, которые часто являются основным источником водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий [3].

Согласно концепции всеобщей увлажняющей роли лесов леса характеризуются как экосистемы, способствующие накоплению влаги на водосборах и вследствие этого увеличивающие годовой суммарный сток [4]. Но существует и противоположная точка зрения, в которой лес рассматривается как мощный испаритель влаги, и поэтому увеличение лесистости уменьшает сток в реках [5]. В работе О.И. Крестовского на примере южной тайги установлено, что при сплош-

ной рубке составляющая испарения значительно ослабляется и снижается на 20–40 %. В результате ухудшается режим стока: в половодье объёмы жидкого стока увеличиваются, а в межень реки мелеют [6]. Техногенное воздействие приводит не только к изменению условий формирования различных видов стока [7–9], но и к трансформации характеристик диффузного загрязнения, влияя на качество поверхностных водотоков [10], особенно при наличии токсичных элементов в виде тяжёлых металлов и мышьяка, что приводит к угнетению и гибели лесных насаждений в связи с их распространением в природных и техногенных компонентах окружающей среды [11].

Таким образом, формирование речного стока может зависеть от следующих факторов:

1. Природно-климатические условия могут влиять на объём годового речного стока и его распределение за счёт общего количества и характера осадков, их распределения по территории и во времени, температуры и влажности воздуха, а также скорости ветра, которые обуславливают потери стока вследствие испарения [4, 12].

2. Рельеф местности, а именно крутизна склонов и уклонов русел формируют условия для инфильтрации талых и дождевых вод в почву, склонового и подповерхностного стока, питания грунтовых горизонтов [13].

3. Почвенно-гидрологические условия, характеризующиеся большей водопроницаемостью пород и более мощными отложениями, формируют большую подземную ёмкость и её регулируемую способность и, следовательно, и более равномерный сток в течение года [14].

4. Растительный покров влияет на интенсивность снеготаяния и скорость стекания воды по земной поверхности, тем самым оказывает воздействие и на водный режим [13].

5. Размер и форма водосборной площади имеют прямую корреляцию с равномерностью стока за счёт изменения доли подземного (грунтового) питания [15].

6. Озёрность и заболоченность водосбора способствуют снижению речного стока, так как из-за сильно

¹ Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель. URL: <https://rosreestr.gov.ru/activity/gosudarstvennoe-upravlenie-v-sfere-ispolzovaniya-i-okhrany-zemel/gosudarstvennyy-natsionalnyy-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-zemel-rossiyskoy-federatsii> (Дата обращения: 07.11.2024).

обводненных водораздельных озерно-болотных массивов или низинных болот сток более зарегулирован и амплитуда колебаний водности менее значительна [16].

7. Антропогенное воздействие в виде регулирования и перераспределения речного стока, забора и сбросов воды в промышленности и сельском хозяйстве, мелиорации земель и др. приводит к кардинальному изменению естественного режима речного стока [17].

8. Лесистость территории является одним из ключевых факторов, регулирующих водный баланс, так как лесной массив способствует инфильтрации осадков и поддержанию меженного стока. Вырубка лесов снижает задержание влаги усиливает сезонные колебания водности рек [18].

9. Нарушение почвенного покрова путём удаления корнеобитаемого слоя, что ведёт к снижению водоудерживающей способности почвы [19].

10. Горнопромышленные объекты в виде хвостохранилищ и отвалов горных пород изменяют фильтрационные свойства водосборов, а загрязняющие вещества могут менять химический состав воды [20, 21].

Хвостохранилища Солнечного ГОКа являются объектами экологической и техногенной опасности, источниками загрязнения грунтовых и поверхностных вод, почвы, растительности и атмосферы при пылении с его поверхности [14, 22, 23]. Цель исследования – оценить воздействие горнодобывающего предприятия на формирование речного стока и снижение водности малых рек в речном бассейне р. Силинки. В рамках указанной темы были поставлены

следующие задачи: 1 – анализ литературных данных по факторам, влияющим на формирование речного стока малых рек; 2 – характеристика нарушенной территории, занимаемой оловорудным предприятием; 3 – оценка лесистости и водоохранной функции лесов в границах влияния Солнечного ГОКа.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования послужили нарушенные территории бывшего Солнечного горно-обогатительного комбината (ГОК) в элементарном бассейне р. Силинки Солнечного района Хабаровского края [13, 24]. Солнечный ГОК являлся главным градообразующим предприятием Солнечного района. С 1969 г. накоплено большое количество токсичных отходов, складированных в три хвостохранилища.

В результате отработки открытым и закрытым способами касситеритовых и касситерит-сульфидных месторождений Солнечным горно-обогатительным комбинатом на дневной поверхности остались карьеры, часто значительные по размерам, и отвалы некондиционных руд и вмещающих пород, а также многочисленные штольни, из устья которых на склон сбрасываются вмещающие породы и рудничные воды (рис. 1).

Сформированная в Комсомольском оловорудном районе горнопромышленная техногенная система в результате увеличения поверхности соприкосновения агентов выветривания с открытыми поверхностями сульфидных руд и тонкоизмельченными сульфидами хвостов активизирует гипергенные процессы, переходящие в следующую техногенную стадию.

БАСЕЙН РЕКИ СИЛИНКИ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ

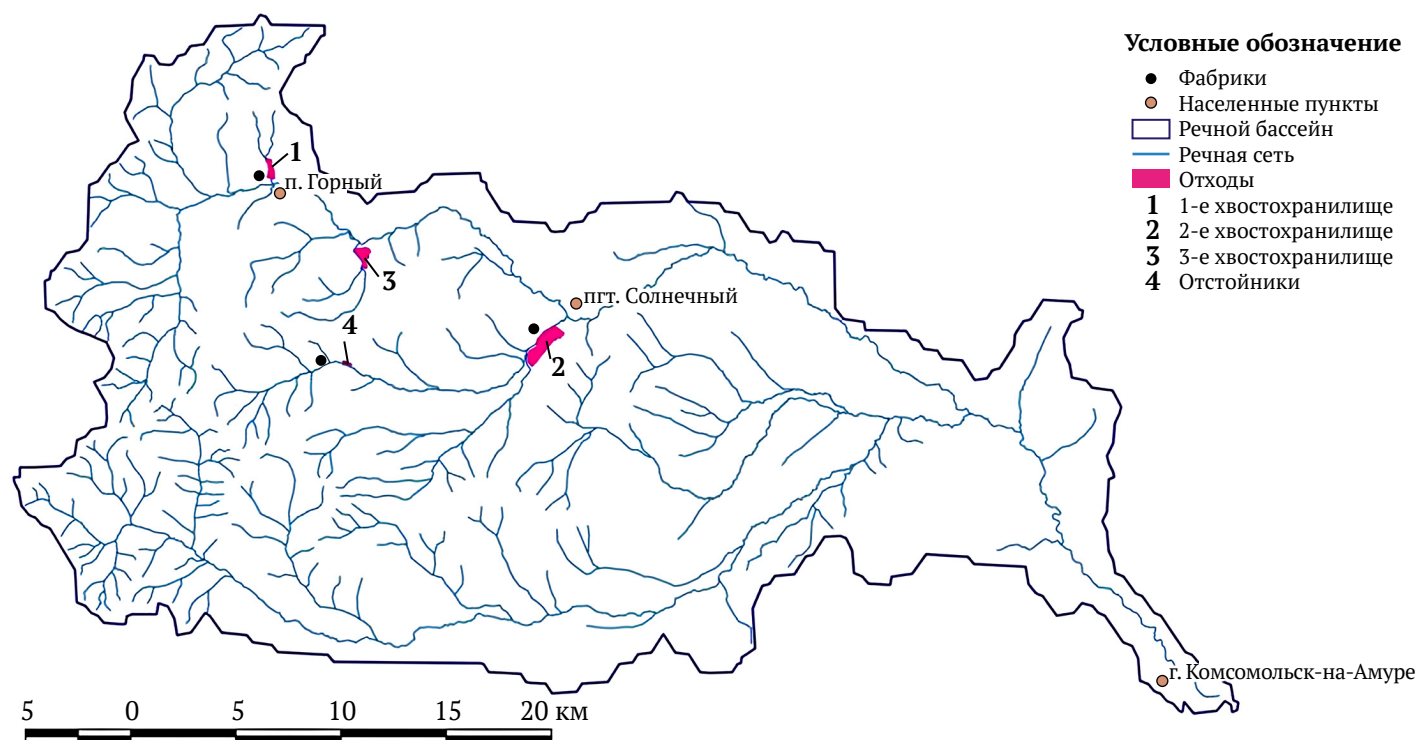


Рис. 1. Карта-схема размещения техногенных объектов в бассейне р. Силинки

Хвостохранилища Солнечного ГОКа сложены намывными песками серого цвета, иногда окрашенными гидроксидами железа, образующимися за счет окисления сульфидов, в коричневые оттенки. Размерность песчаных частиц в основном менее 0,5 мм. Около 1 % объема (в отдельных слоях – 3 %) занимают фракции более 2 мм, 70–83 % – 0,1–0,5 мм, 13–14 % – менее 0,1 мм (на отдельных горизонтах – 28 %). В вертикальном разрезе распределение песков по крупности зерен неравномерно. Согласно ранее проведенным исследованиям класса опасности отходов осушенные хвосты относятся к высоко опасному классу токсичности [25]. На территории нарушенных земель рекультивация в соответствии с Законом о недрах РФ не проводилась [26].

Первое хвостохранилище расположено напротив посёлка Горный на расстоянии около 100–500 м от обогатительной фабрики. Его площадь составляет 44 га, объём – 10,4 млн т (рис. 2, а).

Отходы второго хвостохранилища активно перерабатывает компания ООО «Геопроминвест» с целью производства оловянного и медного концентратов (рис. 2, б).

В настоящее время активы бывшего Солнечного ГОКа, месторождения «Фестивальное» и «Переваль-

ное», находятся под управлением АО «Оловянная рудная компания», которая перезапустила добычу олова и вольфрама и продолжила наполнять третье хвостохранилище (рис. 2, в, г).

Оценка лесистости бассейна р. Силинки проведена посредством расчёта нормализованного разностного индекса растительности (NDVI) с использованием данных Landsat 8 при обработке в QGIS. Согласно ранее проведенным исследованиям [27] определено, что значение индекса NDVI до 0,3 отражает безлесную территорию, выше 0,3 – покрытую лесом площадь.

Эколого-экономическая оценка воздействия работ по разведке и добыче полезных ископаемых не является стандартизированной и не имеет единого методического подхода. В данной работе использованы метод картографического моделирования с применением открытого программного обеспечения QGIS 3.10, а также рекомендации по расчёту экономического ущерба речному стоку через лесистость [28]:

$$M = -1,02 + 0,068 \times L, \quad (1)$$

где M – модуль стока с 1 км² водосборного бассейна; L – лесистость территории.


а

б

в

г

Рис. 2. Техногенно-нарушенные территории бывшего Солнечного ГОКа:

- а – действующая перерабатывающая фабрика АО «Оловянная рудная компания»;
 б – поверхность второго хвостохранилища; в – поверхность третьего хвостохранилища;
 г – поверхность отстойника месторождения «Фестивальное»

Результаты и обсуждение

Площадь речного бассейна Силинки составляет 1016 км² [29]. Бассейн реки относится к Дальневосточному таёжному лесному району и расположен в границах двух лесничеств: Комсомольского и Солнечного. На северо-западе расположена охранный зона памятника природы краевого значения «Оползневое озеро Амут», остальная часть лесного массива расположена в зелёной зоне или относится к эксплуатационным лесам.

За период с 2012 по 2024 г. площадь всей территории нарушенных земель в бассейне р. Силинки от горнопромышленной деятельности увеличилась с 341,5 га до 430,8 га (рис. 3).

Согласно геоинформационным исследованиям с использованием расчёта нормализованного разностного индекса растительности (NDVI) в QGIS из данных спутников программы Landsat в бассейне р. Силинки максимальное значение индекса не превышает 0,494, что можно отнести к средней степени развития лесной биомассы (рис. 4).

По результатам анализа полученных растровых изображений (табл. 1, рис. 5) выявлено, что лесистость бассейна р. Силинки в местах размещения нарушенных территорий Солнечного ГОКа изменилась

в зависимости от увеличения площади техногенных образований (рис. 6). Расчёт лесистости через вегетационный индекс показал снижение на 14,8 %.

Согласно рекомендациям по расчёту экономического ущерба речному стоку через лесистость (1) модуль стока с 1 км² водосборного бассейна для исследуемой территории на 2012 г. составил 3,978 тыс. м³. На 2024 г. – модуль речного стока составляет 2,9726 тыс. м³.

Налоговая ставка за 1 тыс. м³ из поверхностных вод водных объектов бассейна р. Амура (Дальневосточный регион) в пределах установленных квартальных лимитов водопользования равняется 264 руб. При заборе воды сверх установленных квартальных лимитов налоговые ставки устанавливаются в 5-кратном размере. Кроме того, налоговые ставки в 2024 г. применяются с коэффициентом 1,1.

Таким образом, стоимость 1 тыс. м³ воды на 2012 и 2024 гг. составляла 5776,05 и 4314,76 руб. соответственно.

Капитализированная стоимость исследуемой территории² равна 57760,5 и 43147,6 руб. соответственно.

² Приказ «Об утверждении методики исчисления размера ущерба от загрязнения подземных вод» от 11.02.1998 № 81. Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды. 1998.



а



б



в



г

Рис. 3. Карта-схема расположения техногенно-нарушенных территорий: а – первое хвостохранилище; б – второе хвостохранилище; в – третье хвостохранилище; г – отстойник месторождения «Фестивальное».

Примечание: синий – граница объекта в 2012 г., красный – граница объектов в 2024 г., фиолетовый – общая граница 2012 и 2024 гг.

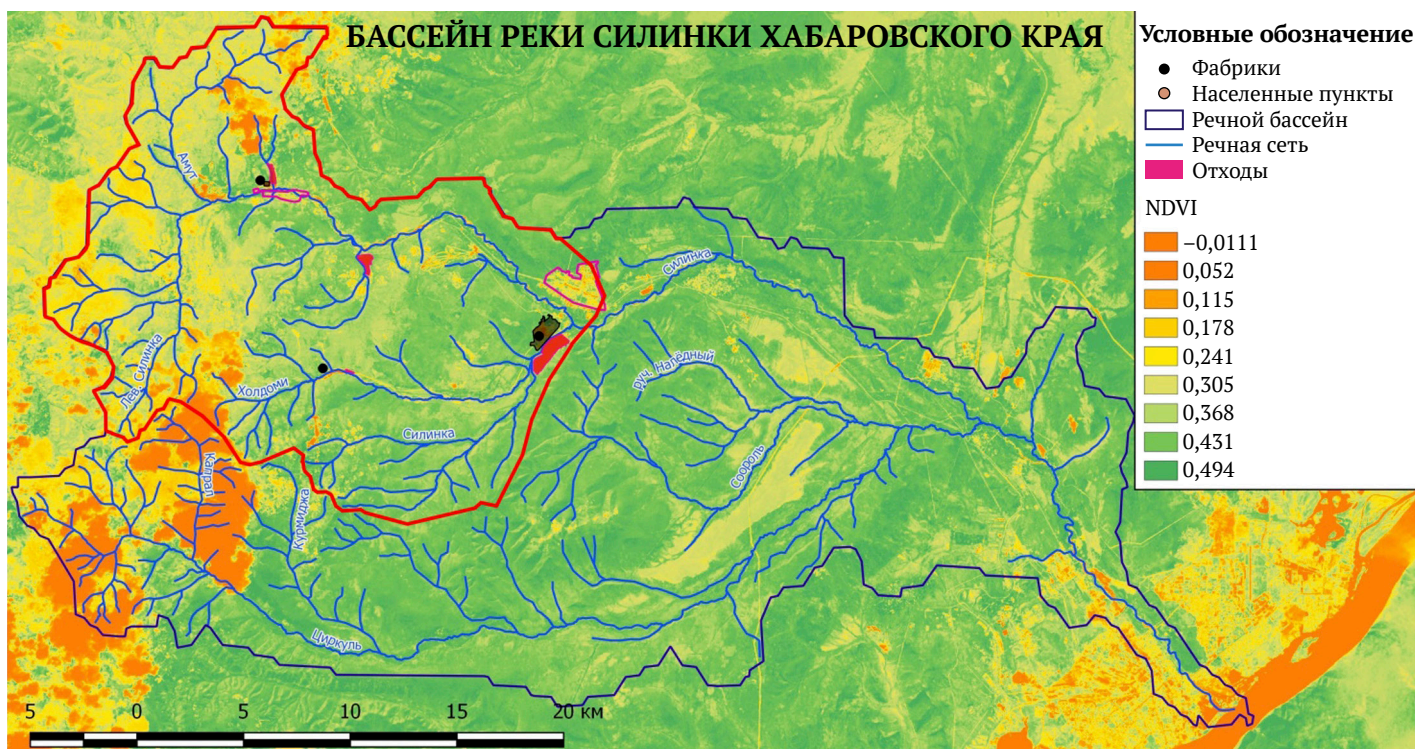


Рис. 4. Карта-схема бассейна р. Силинки с учётом нормализованного разностного индекса растительности (NDVI).

Примечание: красный – граница исследуемого участка речной сети

Таблица 1

Параметры лесистости при расчёте с использованием NDVI в границах бассейна рек, на которых расположены техногенные объекты исследуемых горных предприятий

Годы	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Лесистость, %	73,5	69,6	73,8	68,5	76,5	71,3	72,6	63,2	66,3	58,7	62,6	61,4
Площадь 1-го хвостохранилища	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	44	44	44	44	44
Площадь 2-го хвостохранилища	195	195	233	233	233	233	233	256	256	312	312	312
Площадь 3-го хвостохранилища	40,1	40,1	40,8	40,8	40,8	40,9	40,9	40,9	44	44	44	44
Площадь отстойника	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8

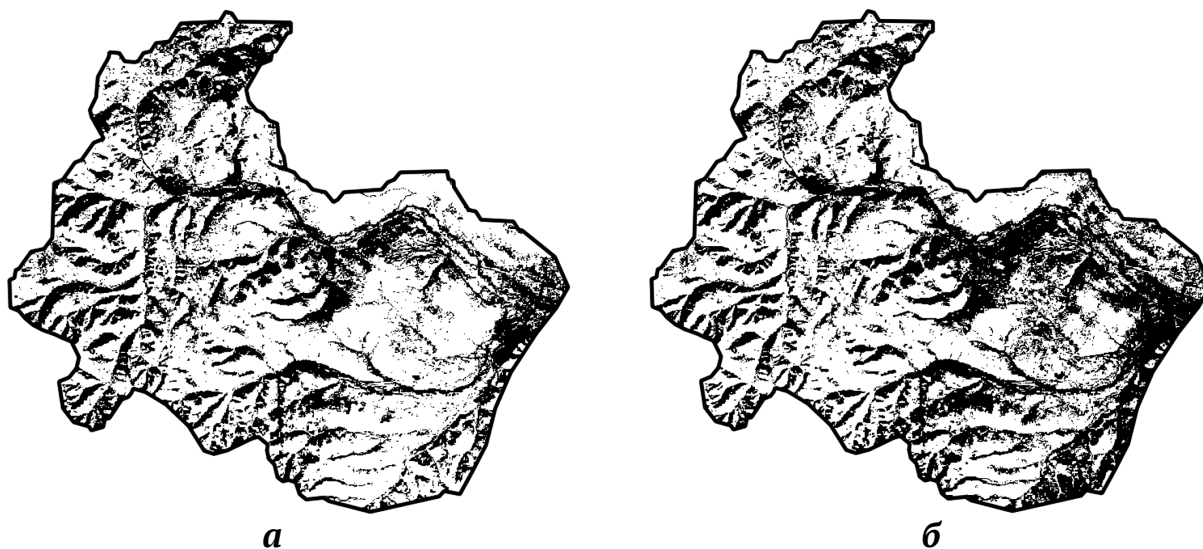


Рис. 5. Расчёт лесистости с использованием NDVI в границах бассейна рек, на которых расположены техногенные объекты исследуемых горнодобывающих предприятий (а – 2012, б – 2024).

Примечание: чёрные пиксели отображают территорию, не покрытую лесом

Таким образом, снижение стоимости исследуемой территории, выполняющей водоохранную функцию в бассейне р. Силинки на 1 км² площади, можно определить как разность между капитализированной стоимостью исследуемого бассейна р. Силинки на 2012 и 2024 гг.

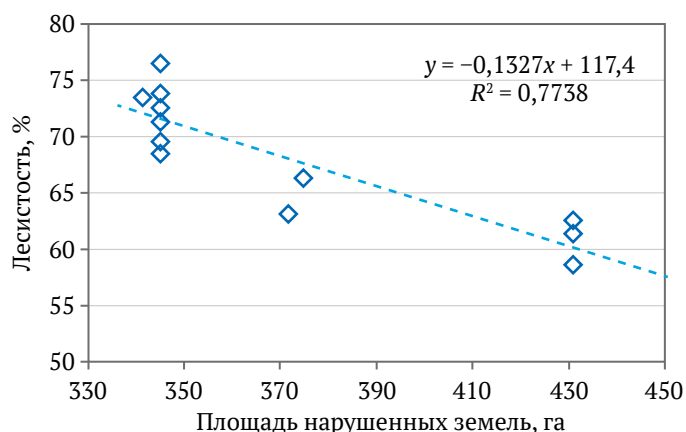


Рис. 6. Зависимость лесистости на исследуемой территории от площади нарушенных земель в бассейне р. Силинки

По результатам расчётов определено снижение средней стоимости 1 км² исследуемой территории в результате деятельности горнопромышленного предприятия на 14612,9 руб., что составляет около 25 %.

Заключение

Согласно проведенным исследованиям с использованием геоинформационных систем по расчёту нормализованного разностного индекса вегетации (NDVI) отмечается снижение лесистости речного бассейна в районе деятельности бывшего Солнечного горно-обогатительного комбината на 14,8 % относительно исследуемого водосборного бассейна р. Силинки на 2012 г., что подтверждает деградацию водорегулирующих функций растительного покрова. В результате снижения лесистости отмечается уменьшение модуля речного стока на 1,0064 тыс. м³, что эквивалентно снижению водности на 25 %. Расчёт средней стоимости 1 км² исследуемой территории на 2024 г. в результате деятельности горнопромышленного предприятия показал снижение на 14612,9 руб. горнопромышленных районов. Таким образом, процесс извлечения полезных ископаемых в виде оловянного сырья в бассейне р. Силинки Солнечного района Хабаровского края приводит к снижению лесистости, что обуславливает прямо пропорциональное снижение водности малых рек.

Список литературы / References

1. Болтыров В.Б., Дегтярев С.А., Селезнев С.Г., Стороженко Л.А. Экологические ущербы территорий образования и накопления горнопромышленных отходов. В: Под ред. В.И. Осипова, Н.Г. Максимовича, А.А. Баряха и др. Сергеевские чтения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Пермь, 2–4 апреля 2019 г. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2019. Вып. 21. С. 151–156. Boltryov V.B., Degtyarev S.A., Seleznev S.G., Storozhenko L.A. Ecological damages in territories of mining waste formation and accumulation. In: Osipov V.I., Maksimovich N.G., Baryakh A.A., et al. (Eds.) *Sergeevskie Chteniya: Proceedings of the Annual Session of the RAS Scientific Council on Geoecology, Engineering Geology, and Hydrogeology*. April 2–4, 2019. Perm: State National Research University. Vol. 21. Pp. 151–156. (In Russ.)
2. Рыбникова Л.С. Техногенное воздействие горнодобывающих предприятий Урала на состояние гидросферы. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2012;(1):74–91. Rybnikova L.S. Technogenic impact of the Urals mining works upon the hydrosphere status. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2012;(1):74–91. (In Russ.)
3. Ткаченко М.Е. *Общее лесоводство*. Изд. 2-е. М.: Гослесбумиздат; 1952. 598 с. Tkachenko M.E. *General forestry*. 2nd ed. Moscow: Goslesbumizdat; 1952. 598 p. (In Russ.)
4. Побединский А.В. *Водоохранная и почвозащитная роль лесов*. Изд. 2-е. Пушкино: ВНИИЛМ; 2013. 208 с. Pobedinskiy A.V. *Water protection and soil conservation role of forests*. 2nd ed. Pushkino: VNIILM; 2013. 208 p. (In Russ.)
5. Касимов Д.В., Касимов В.Д. *Некоторые подходы к оценке экосистемных функций лесных насаждений в практике природопользования*. М.: Мир науки; 2015. 91 с. Kasimov D.V., Kasimov V.D. *Some approaches to assessing ecosystem functions of forest stands in environmental management practice*. Moscow: Mir Nauki; 2015. 91 p. (In Russ.)
6. Гапаров К.К. *Влияние лесохозяйственных мероприятий на гидрологические и защитные функции еловых лесов Прииссыккуля*. Бишкек: Институт леса и ореховодства им. проф. П. А. Гана НАН Кыргызской Республики; 2007. 103 с. Gaparov K.K. *The influence of forestry practices on hydrological and protective functions of spruce forests in Issyk-Kul region*. Bishkek: Institute of Forest and Nut Farming named after Prof. P. A. Gan of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic; 2007. 103 p. (In Russ.)
7. Крестовский О.И. *Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек*. СПб.: Гидрометеиздат; 1986. 118 с. Krestovskiy O.I. *The influence of forest cutting and restoration on river water content*. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat; 1986. 118 p. (In Russ.)



8. Алексеевский Н.И. Речной сток: географическая роль и индикационные свойства. *Вопросы географии*. 2012;133:48–71.
Aleksееvskiy N.I. River runoff: geographical role and indicative properties. *Problems of Geography*. 2012;133:48–71. (In Russ.)
9. Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Влияние урбанизированных территорий на речной сток в Европе. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2019;(3):78–87. <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019378-87>
Koronkevich N.I., Melnik K.S. Impact of urbanized landscapes on the river flow in Europe. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2019;(3):78–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019378-87>
10. Ясинский С.В., Веницианов Е.В., Вишневская И.А. Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе. *Водные ресурсы*. 2019;46(2):232–244. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596462232-244>
Yasinskiy S.V., Venitsianov E.V., Vishnevskaya I.A. Diffuse pollution of waterbodies and assessment of nutrient removal under different land-use scenarios in a catchment area. *Vodnye Resursy*. 2019;46(2):232–244. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0321-0596462232-244>
11. Бузмаков С.А., Назаров А.В., Санников П.Ю. Изменения растительности под влиянием горнодобывающей деятельности. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2012;(5):261–263.
Buzmakov S.A., Nazarov A.V., Sannikov P.Yu. Influence of mining on vegetation. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;(5):261–263. (In Russ.)
12. Лебедев Ю.В., Неклюдов И.А. Оценка водоохранно-водорегулирующей роли лесов: методические указания. Екатеринбург: УГЛУ; 2012. 36 с.
Lebedev Yu. V., Neklyudov I. A. Assessment of water conservation and water regulation functions of forests: methodological guidelines. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University; 2012. 36 p. (In Russ.)
13. Киреева М.Б., Илич В.П., Сазонов А.А., Михайлюкова П.Г. Оценка трансформации поверхности водосбора и её влияния на условия формирования стока в бассейне р. Дон на основе данных космической съёмки. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018;15(2):191–200. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-191-200>
Kireeva M.B., Ilich V.P., Sazonov A.A., Mikhaylyukova P.G. An assessment of changes in land usage and their impact on Don River basin runoff using satellite imagery. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018;15(2):191–200. (In Russ.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-191-200>
14. Макаров В.Н. Геохимическая оценка хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов Якутии. *Недропользование XXI век*. 2023;(3–4):34–41.
Makarov V.N. Geochemical assessment of tailings of mining and processing plants in Yakutia. *Nedropolzovanie XXI Vek*. 2023;(3–4):34–41. (In Russ.)
15. Абакумова В.Ю. Изучение влияния рельефа на строение речной сети бассейна реки Средняя Борзя (Забайкальский край). В: *Природоохранное сотрудничество в трансграничных экологических регионах: Россия – Китай – Монголия*. Чита: Поиск; 2012. Вып. 3. Часть 1. С. 199–203.
Abakumova V.Y. Research of relief impact on river network structure (Zabaikalsky Krai). In: *Environmental cooperation in transboundary ecological regions: Russia – China – Mongolia*. Chita: Poisk; 2012. Vol. 3. Pt. 1. Pp. 199–203. (In Russ.)
16. Инишев Н.Г., Воронова А.А. Влияние ландшафтных особенностей заболоченных водосборов на гидрографы весеннего половодья. В: Под науч. ред. Инишевой Л.И. *Болота и биосфера*. Материалы Всероссийской с международным участием IX школы молодых ученых. Д. Вяткино Владимирской области, 14–18 сентября 2015 г. Вяткино: ООО «ПресСто»; 2015. С. 199–203.
Inishev N.G., Voronova A.A. The influence of landscape features of wetland watersheds on the hydrographs of spring flood. In: Inisheva L.I. (Ed.) *Swamps and the Biosphere*. Proceedings of the IX All-Russian School-Conference of Young Scientists with international participation. Vyatkinno, Vladimir Oblast, September 14–18, 2015. Vyatkinno: PresSto; 2015. Pp. 199–203. (In Russ.)
17. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Зайцева И.С. и др. Климатические и антропогенные факторы в многолетних изменениях речного стока реки Волги. *Водное хозяйство России*. 2013;(4):4–19.
Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Zaitseva I.S., et al. Climatic and anthropogenic factors in long-term alterations of the Volga river runoff. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2013;(4):4–19. (In Russ.)
18. Землянухин И.П., Радцевич Г.А. Влияние морфологии и лесистости водосборов на формирование стока. *Модели и технологии природообустройства (региональный аспект)*. 2016;(2):41–46.
Zemlyanukhin I.P., Radcevic G.A. Influence of morphology and woodiness of reservoirs on formation of the drain. *Modeli i Tekhnologii Prirodoustroistva (Regional'nyi Aspekt)*. 2016;(2):41–46. (In Russ.)
19. Конокова Б.А. Проблема сохранения качества пресных вод в горных условиях. *Новые технологии*. 2012;(2):1–6.
Konokova B.A. The problem of preservation of fresh water quality in the mountains. *New Technologies*. 2012;(2):1–6. (In Russ.)



20. Денмухаметов Р.Р., Шарифуллин А.Н. Антропогенная составляющая речного стока растворенных веществ. *Экологический консалтинг*. 2011;(1):34–41.
Denmukhametov R.R., Sharifullin A.N. Anthropogenic components of the river flow dissolved substances. *Ekologicheskii Konsalting*. 2011;(1):34–41. (In Russ.)
21. Крупская Л.Т., Мелконян Р.Г., Зверева В.П. и др. Опасность отходов, накопленных горными предприятиями в Дальневосточном федеральном округе, для окружающей среды и рекомендации по снижению риска экологических катастроф. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):102–112.
Krupskaya L.T., Melkonyan R.G., Zvereva V.P., et al. Ecological hazard of accumulated mining waste and recommendations on risk reduction in the Far Eastern Federal District. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):102–112. (In Russ.)
22. Крупская Л.Т., Голубев Д.А., Растанина Н.К., Филатова М.Ю. Рекультивация поверхности хвостохранилища закрытого горного предприятия Приморского края с использованием биоремедиации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(9):138–148. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-138-148>
Krupskaya L.T., Golubev D.A., Rastanina N.K., Filatova M.Yu. Reclamation of tailings storage surface at a closed mine in the Primorsky Krai by bio remediation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(9):138–148. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-138-148>
23. Назаркина А.В. Особенности физических свойств и водного режима аллювиальных почв пойм рек Сихотэ-Алиня. *Почвоведение*. 2008;(5):576–586. (Перев. вер.: Nazarkina A.V. Physical properties and hydraulic regime of alluvial soils in floodplains of rivers in the Sikhote-Alin mountains. *Eurasian Soil Science*. 2008;41(5):509–518. <https://doi.org/10.1134/S1064229308050062>)
Nazarkina A.V. Physical properties and hydraulic regime of alluvial soils in floodplains of rivers in the Sikhote-Alin mountains. *Eurasian Soil Science*. 2008;41(5):509–518. <https://doi.org/10.1134/S1064229308050062> (Orig. ver.: Nazarkina A. V. Physical properties and hydraulic regime of alluvial soils in floodplains of rivers in the Sikhote-Alin mountains. *Pochvovedenie*. 2008;(5):576–586. (In Russ.))
24. Растанина Н.К., Колобанов К.А. Воздействие техногенного пылевого загрязнения на экосферу и здоровье человека закрытого горного предприятия Приамурья. *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):16–22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22>
Rastanina N.K., Kolobanov K.A. Impact of technogenic dust pollution from the closed mining enterprise in the Amur Region on the ecosphere and human health. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):16–22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-16-22>
25. Растанина Н.К., Галанина И.А., Попадьев 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. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2024.05.28>
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 & Practice. Series Natural & Technical Sciences*. 2024;(5):22–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2024.05.28>
26. Крупская Л.Т., Ионкин К.В., Крупский А.В. и др. К вопросу оценки хвостохранилища как источника загрязнения объектов природной среды. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(5):234–241.
Krupskaya L.T., Ionkin K.V., Krupskiy A.V., et al. On the issue of assessing tailing dumps as a source of environmental pollution. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(5):234–241. (In Russ.)
27. Комаров А.А. Оценка состояния травостоя с помощью вегетационного индекса NDVI. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2018;(2):124–129.
Komarov A.A. Assessment of grass stand condition using NDVI vegetation index. *Izvestiya Saint Petersburg State Agrarian University*. 2018;(2):124–129. (In Russ.)
28. Тишков А.А., Бобылев С.Н., Медведева О.Е. и др. Экономика сохранения биоразнообразия. М.: Институт экономики природопользования; 2002. 604 с.
Tishkov A.A., Bobylev S.N., Medvedeva O.E., et al. *Economics of biodiversity*. Moscow: Institut Ekonomiki Prirodopol'zovaniya; 2002. 604 p. (In Russ.)
29. Белов Д.В., Бровко П.Ф. Рекреационный потенциал бассейна реки Силинка (Хабаровский край). *Тихоокеанская география*. 2020;(4):65–73. <https://doi.org/10.35735/tig.2020.4.4.007>
Belov D.V., Brovko P.F. Recreational potential of the Silinka River basin (Khabarovsk region). *The Pacific Geography*. 2020;(4):65–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.35735/tig.2020.4.4.007>

Информация об авторах

Наталья Константиновна Растанина – кандидат биологических наук, доцент высшей школы промышленности, 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, 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](#); e-mail poet.golubev@mail.ru

Никита Алексеевич Каюмов – студент, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация; Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, г. Хабаровск, Российская Федерация; ORCID [0009-0001-6875-3290](#); e-mail nik.kayumov@mail.ru

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

Илья Андреевич Попадъев – студент, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Российская Федерация; ORCID [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](#); e-mail n.rastanina@yandex.ru

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

Nikita A. Kayumov – Student, Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation; Far East Forestry Research Institute, Khabarovsk, Russian Federation; ORCID [0009-0001-6875-3290](#); e-mail nik.kayumov@mail.ru

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

Ilya A. Popadyev – Student, Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation; ORCID [0009-0009-7054-3856](#)

Поступила в редакцию 15.04.2025

Поступила после рецензирования 20.06.2025

Принята к публикации 21.06.2025

Received 15.04.2025

Revised 20.06.2025

Accepted 21.06.2025



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-454>

УДК 622.775.4:549.211.2:661.183

**Регулирование олеофильности поверхности алмазов и минералов кимберлита добавками реагентов-регуляторов различных классов****В. А. Чантурия , В. В. Морозов , Е. Л. Чантурия , А. Л. Самусев ***Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,
г. Москва, Российская Федерация**dchmggu@mail.ru***Аннотация**

Цель проведенных исследований – обоснованный выбор реагентов для регулирования олеофильности поверхности алмазов и минералов кимберлита в процессах кондиционирования алмазо-кимберлитовых продуктов перед их обогащением пенной сепарацией, флотацией и рентгенолюминесцентной сепарацией с применением люминофорсодержащих реагентов-модификаторов и собирателей, основой состава которых являются аполярные коллекторы. В работе представлены результаты комплексных физико-химических исследований влияния реагентов-регуляторов различных классов на закрепление аполярных коллекторов на поверхности алмазов и минералов кимберлита (визиометрический анализ, измерение краевых углов смачивания в системе минерал – органический коллектор – водная фаза, измерение поверхностного натяжения на границе раздела фаз органический коллектор – водная фаза – беспенная флотация). На основе анализа полученных данных обоснованы и выбраны эффективные реагенты-регуляторы, обеспечивающие селективность обогащения алмазов. Исследованы реагенты-регуляторы, принадлежащие к классам алкиларилфосфонатов (НТФК, ОЭДФ), аминополикарбоновых кислот (ЭДТА), катионоактивных полимеров (ПЭГ-1500, Неонол АФ-9-6), полифосфатов (ТПФ), бифункционально модифицированных производных карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ 75-В и Камцел-600), смеси алкилфосфатов, алкилфосфонатов и анионных полимеров (ИС-3), ионогенных и неионогенных азотсодержащих полимеров (Эмульгатор ОП-4, Оксипав А1218.30), аминокислот (ТЭА), гидроксикислот (молочная кислота), четвертичных аммониевых оснований (сульфат аммония). В качестве основных минералов кимберлита, склонных к адгезии аполярных коллекторов, выбраны тальк, пирит, кальцит, мусковит, флогопит, серпентин, доломит. Установлено, что в наибольшей мере краевой угол смачивания снижают реагенты Неонол АФ-9-6, Эмульгатор ОП-4, Оксипав А1218.30, что связано с существенным снижением поверхностного натяжения границы раздела фаз органический коллектор – водная фаза. Термодинамическая оценка олеофильности минералов кимберлита, проведенная по уравнению Дюпре–Юнга с использованием результатов измерения краевых углов смачивания и поверхностного натяжения, показала, что энергия адгезии органического коллектора на минералах кимберлита при добавках реагентов-регуляторов снижается в 2–6 раз и достигает значений 6–17 Дж/м², приближающихся к энергии адгезии воды (5 Дж/м²). На алмазах энергия адгезии аполярного коллектора при максимальных концентрациях снижается только до 17–27,5 Дж/м², что и обуславливает его устойчивое закрепление. Результаты флотационных опытов подтвердили депрессирующую способность исследованных реагентов-регуляторов по отношению к флотоактивным минералам кимберлита. На основе анализа полученных данных выбраны и рекомендованы для апробации в промышленных режимах пенной сепарации эффективные реагенты-регуляторы, обеспечивающие повышение селективности закрепления аполярного коллектора на поверхности алмазов и минералов кимберлита: НТФК, ОЭДФ, ИС-3, ОП-4.

Ключевые слова

алмазы, кимберлит, минералы, коллектор, олеофильность, реагенты, поверхностно-активные вещества, работа адгезии, флотация, селективность

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25–17–00009, <https://rscf.ru/project/25-17-00009/>

Для цитирования

Chanturiya V.A., Morozov V.V., Chanturiya E.L., Samusev A.L. Regulation of the oil receptivity of the surface of diamonds and kimberlite minerals using various classes of regulating agents. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):379–392. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-454>



BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

Regulation of the oil receptivity of the surface of diamonds and kimberlite minerals using various classes of regulating agentsV.A. Chanturiya , V.V. Morozov ✉, E.L. Chanturiya , A.L. Samusev *Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*✉ dchmggu@mail.ru**Abstract**

The purpose of the research is to select appropriate agents for regulating the oil receptivity of diamond and kimberlite mineral surfaces in the conditioning of diamond-kimberlite products prior to their beneficiation by froth flotation and X-ray luminescence separation using phosphor-containing modifying agents and collecting agents, the basis of which is apolar collecting agents. The paper presents the results of comprehensive physicochemical studies of the influence of various classes of regulating agents on the attachment of apolar collecting agents on the surface of diamonds and kimberlite minerals (visiometric analysis, measurement of limiting wetting angles in a mineral–organic collecting agent–aqueous phase system, measurement of surface tension at the organic collecting agent–aqueous phase–frothless flotation phase boundary). Based on the analysis of the data obtained, effective regulating agents have been identified and selected to ensure the selectivity of diamond beneficiation. Regulating agents belonging to the classes of alkylarylphosphonates (NTPA, OEDPA), aminopolycarboxylic acids (EDTA), cationic polymers (PEG-1500, Neonol AF-9-6), polyphosphates (STPP), bifunctionally modified carboxymethylcellulose derivatives (CMC 75-V and Kamcel-600), mixtures of alkyl phosphates, alkyl phosphonates, and anionic polymers (IS-3), ionogenic and non-ionogenic nitrogen-containing polymers (Emulsifier OP-4, Oxypav A1218.30), amino alcohols (TEA), hydroxy acids (lactic acid), and quaternary ammonium bases (ammonium sulfate) were tested. Talc, pyrite, calcite, muscovite, phlogopite, serpentine, and dolomite were selected as the main minerals of kimberlite prone to adhesion of apolar collecting agents. It has been established that the limiting wetting angle is reduced most significantly by the agents Neonol AF-9-6, Emulsifier OP-4, and Oxypav A1218.30 that is associated with a significant decrease in the surface tension of the interface between an organic collecting agent and the aqueous phase. A thermodynamic assessment of the oil receptivity of kimberlite minerals conducted using the Dupré–Young equation and based on measurements of limiting wetting angles and surface tension showed that the energy of adhesion of an organic collecting agent on kimberlite minerals with the addition of regulating agents decreases by 2–6 times and reaches values of 6–17 J/m², approaching the adhesion energy of water (5 J/m²). On diamonds, the energy of adhesion of an apolar collecting agent at maximum concentrations decreases only to 17–27.5 J/m² that determines its stable attachment. The results of flotation tests confirmed the depressing ability of the studied regulating agents in relation to the flotation-responding minerals of kimberlite. Based on the analysis of the data obtained, effective regulating agents have been selected and recommended for testing in industrial froth separation modes, ensuring increased selectivity of apolar collecting agent attachment on the surface of diamonds and kimberlite minerals: NTPA, OEDPA, IS-3, OP-4.

Keywords

diamonds, kimberlite, minerals, collecting agent, oil receptivity, agents, surfactants, work of adhesion, flotation, selectivity

FinancingThis research was funded by a grant No. 25–17–00009 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-17-00009/>**For citation**Chanturiya V.A., Morozov V.V., Chanturiya E.L., Samusev A.L. Regulation of the oil receptivity of the surface of diamonds and kimberlite minerals using various classes of regulating agents. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):379–392. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-454>**Введение**

Актуальной задачей при разработке технологии извлечения слабо и аномально люминесцирующих алмазов в процессах рентгенолюминесцентной сепарации является повышение селективности закрепления люминофорсодержащих реагентов-модификаторов на поверхности алмазов и обоснованный выбор реагентов-регуляторов, обеспечивающих уменьшение закрепления на гидрофобных минералах кимберлита

аполярных коллекторов, входящих в состав применяемых реагентов-модификаторов [1, 2]. Аналогичная задача – повышение селективности закрепления аполярных собирателей на поверхности алмазов – является условием повышения эффективности процессов флотации и пенной сепарации [3, 4]. В обоих случаях для выбора эффективных реагентных режимов необходимо установление закономерностей закрепления органических коллекторов и реагентов-регуляторов



гидрофобности и олеофильности на алмазах и минералах кимберлита [1, 5].

Цель проведенных исследований – обоснованный выбор реагентов для регулирования олеофильности поверхности алмазов и минералов кимберлита в процессах кондиционирования алмазо-кимберлитовых продуктов перед их обогащением пенной сепарацией, флотацией и рентгенолюминесцентной сепарацией с применением люминофорсодержащих реагентов-модификаторов и собирателей, основой состава которых являются аполярные коллекторы.

Задачами исследований являлись:

- определение минералов кимберлита, в наибольшей степени склонных к адгезии на них капель органического коллектора;

- определение влияния реагентов-регуляторов на энергию адгезии аполярного коллектора на поверхности алмазов и олеофильных минералов кимберлита;

- выбор реагентов регуляторов, в наибольшей степени повышающих контрастность флотационной активности алмазов и минералов кимберлита.

Основой для выбора методик исследований и подходов к решению поставленной задачи является анализ современных научно-технических разработок и исследований в области регулирования поверхностных процессов в водоминеральных дисперсных системах [6, 7].

Значительное количество исследований в данном направлении было проведено применительно к процессам пенной сепарации и флотации алмазов из кимберлитов¹ [8, 9]. Наряду с выбором собирателей в представленных работах был рекомендован определенный круг реагентов-регуляторов, задачей которых было подавление флотиремости кимберлита.

Для обоснованного выбора реагентов-регуляторов также были использованы результаты исследований в смежных областях. Близкими по характеру решаемой задачи являются исследования, связанные применением минералов класса слоистых алюмосиликатов в качестве сорбентов тяжелых металлов и нефтепродуктов из сточных вод [10]. Однако в силу обратной конечной задачи (увеличения сорбции загрязнителей) большая часть теоретических и экспериментальных положений этих работ лишь частично описывает процессы гидрофилизации.

Также представляют интерес исследования, изучающие способы повышения нефтеотдачи нефтяных пластов, особенно в части применения реагентов-регуляторов, способствующих снижению гидрофобности пластовых минералов, в т.ч. минералов класса слоистых алюмосиликатов [11]. Однако в силу отличающегося минерального состава вмещающих пород, особенностей органической фазы – нефти, температуры и давления, большая часть теоретических положений и экспериментальных данных лишь ограниченно применима для описания процессов гидрофилизации минералов кимберлитов.

Другим направлением, в котором решается схожая задача уменьшения зарастания рабочих поверхностей солями жесткости, является процесс реагентного кондиционирования водных сред в тепловых агрегатах и установках обратного осмоса [12].

Несмотря на отличия рассмотренных процессов от процессов, протекающих при обработке алмазосодержащих продуктов перед процессами рентгенолюминесцентной и пенной сепарации, схожесть решаемых задач – повышение гидрофильности породных минералов и очистка поверхности рабочих элементов от гидрофилизирующих покрытий – является основанием для выбора номенклатуры реагентов-регуляторов для проводимых исследований.

Для обоснованного выбора реагентов-регуляторов селективности закрепления модификаторов рентгеноспектральных характеристик и собирателей на поверхности алмазов в процессах рентгенолюминесцентной и пенной сепарации использовали комплекс методов физико-химических исследований и термодинамическое моделирование действия реагентов-регуляторов на закрепление органического коллектора на гидрофобных минералах кимберлита в сильноминерализованных водных средах.

Методики исследований

В качестве объектов исследований были выбраны: кристаллы алмаза с полированной поверхностью, кимберлиты различной степени метаморфизма, а также шлифы и пластинки наиболее значимых минералов кимберлита. В качестве коллектора использовали тяжелый газойль каталитического крекинга с добавками дизельной технической фракции (ТГКК и ДТФ) и люминола. Исследования проводили с использованием растворов двенадцати реагентов-регуляторов разных классов в модельной сильноминерализованной воде, близкой по составу к оборотным водам обогатительных фабрик, перерабатывающих алмазосодержащие кимберлиты.

Для предварительной оценки интенсивности закрепления органического коллектора на минералах кимберлита использовали визиометрическую методику [2], которая включала обработку пробы эмульсией люминофорсодержащего органического коллектора, получение и анализ изображений поверхности минералов в ультрафиолетовом освещении. Интенсивность закрепления органического коллектора на поверхности алмазов, отдельных минералов и зерен кимберлита определяли методом анализа изображений по доле поверхности, занимаемой органическим коллектором после обработки минеральных проб. Для измерения доли поверхности, занимаемой коллектором (степени покрытия), фиксировались участки с характерным свечением ($\lambda = 500$ нм), соответствующим излучению смеси ТГКК с ДТФ и люминолом.

Для оценки влияния реагентов-регуляторов на олеофильность минералов кимберлита измеряли краевые углы смачивания в системе минерал – органический коллектор – водная фаза [13]. Методики измерения краевых углов смачивания ранее использовали для оценки восстановления гидрофобности

¹ Юн Р.-Х., Кузнецов Д. Способ выделения алмазов из жильных минералов. Патент РФ 2412901, С2, опубл. 27.02.2011 Бюл. № 6.

природных алмазов различными видами физических и физико-химических воздействий [14]. Для измерений краевых углов смачивания использовали прибор DSA25, оснащенный программным обеспечением для обработки изображений².

Встроенная программа определяла краевой угол смачивания в момент времени стабилизации системы минерал – капля органического коллектора – водная фаза (рис. 1, а).

Поверхность алмаза после каждого измерения очищали с использованием толуола и 1Н раствора соляной кислоты. Для измерений краевого угла смачивания на минералах кимберлита использовали шлифы или пластинки минерала, полученные расщеплением природного образца.

Краевой угол смачивания в системе аполярная жидкость – минерал – водная фаза является информативной количественной характеристикой олеофильности и широко применяется для описания процесса смачивания различных поверхностей в технологических процессах [15]. Для исследования закрепления коллектора на минералах в водной фазе использовали динамическую методику измерения трехфазных краевых углов смачивания [4, 16]. Согласно используемой методике поверхность образца минерала предварительно выдерживали в водной фазе заданного состава, затем снижали уровень водной фазы в кювете до уровня поверхности образца и наносили каплю органического коллектора заданного объема. После нанесения капли коллектора на поверхность образца в кювете увеличивали уровень жидкости. При этом часть капли отрывалась от поверхности образца и распо-

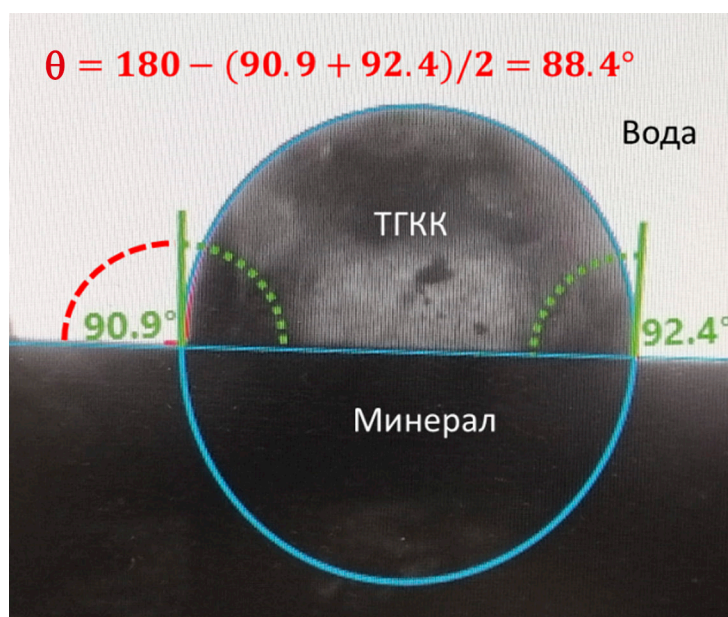
лагалась на границе раздела водная фаза – воздух. Краевые углы на трехфазном периметре смачивания измерялись после установления равновесия без удаления водной фазы. Используемая методика моделирует процесс закрепления аполярного собирателя на минерале в условиях турбулентной внешней среды, характерной для процессов кондиционирования алмазо-кимберлитовых продуктов перед процессами рентгенолюминесцентной и пенной сепарации.

Для расчета энергии адгезии аполярного коллектора на поверхности минералов по уравнению Дюпре–Юнга определяли поверхностное натяжение границы раздела фаз органический коллектор – водная фаза. Измерения проводили с использованием стагмометра СТ-1 путем определения объема всплывающих капель коллектора, отрывающихся от изогнутого капилляра (рис. 1, б), в соответствии со стандартной методикой³. Поверхностное натяжение на границе раздела фаз водная фаза – воздух измеряли путем определения объема падающих капель от прямого капилляра в соответствии с методикой.

Флотацию алмазов, минералов и зерен кимберлита проводили методом беспенной флотации в трубке Халлимонда. Методика эксперимента включала операции подготовки пробы минерала, подготовки жидкой фазы (сильноминерализованной воды), кондиционирования воды с реагентом-регулятором, кондиционирования пробы минерала с собирателем в воде, содержащей реагент-регулятор олеофильности, флотации алмазов, кимберлита или минералов кимберлита, обезвоживания, сушки и взвешивания продуктов флотации [4].

² Drop Shape Analyzer DSA25 Specifications. URL: <https://www.kruss-scientific.com/files/kruss-techdata-dsa25-en.pdf/>

³ ГОСТ Р 50097–92 «Вещества поверхностно-активные. Определение межфазного натяжения. Метод объема капли».



а



б

Рис. 1. Изображение капли органического коллектора – тяжелого газойля каталитического крекинга (ТГКК):
а – на поверхности минерального шлифа с результатами измерения краевого угла смачивания на приборе DSA25;
б – на изогнутом капилляре стагмометра СТ-1

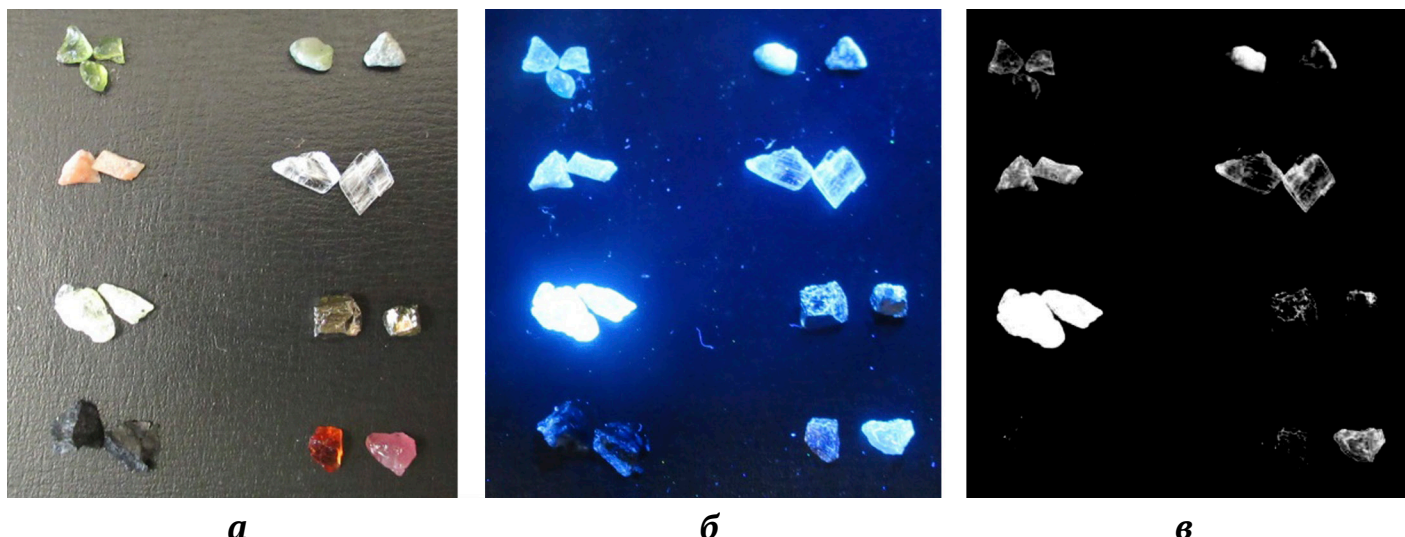


Рис. 2. Изображение и результаты визиометрического анализа закрепления органического коллектора с растворенным люминофором на поверхности минералов кимберлита и попутных минералов: *а* – в дневном освещении; *б* – в УФ-освещении после обработки коллектором; *в* – распределение органического коллектора по образцам минералов. Здесь (справа налево, сверху вниз): оливин, кальцит, целестин, мусковит, тальк, пирит, хромит, пироп

Визиометрический анализ закрепления органического коллектора на образцах минералов-компонентов кимберлита

На начальном этапе исследований был произведен выбор минералов кимберлита, характеризующихся заметной адгезией аполярного коллектора (ТГКК с ДТФ и люминолом) из водных эмульсий. Для исследований были выбраны минералы, наиболее часто встречающиеся в кимберлитах различной степени метаморфизма. Для получения эмульсии коллектора использовали модельную сильноминерализованную воду. Концентрация люминофорсодержащего коллектора в эмульсии составляла 200 мг/л. Время обработки – 1 мин. После обработки и удаления избытка эмульсии пробу минерала промывали оборотной водой в течение 30 с.

Анализ изображений минеральных образцов в ультрафиолетовом освещении показал существенные различия в интенсивности закрепления на их поверхности органического коллектора: от практически полного заполнения (тальк, см. рис. 1) до полного отсутствия закрепления (хромит, рис. 2).

Полученные результаты визиометрических исследований позволили выбрать для дальнейших исследований 7 минералов кимберлита с высокой и средней степенью покрытия аполярным коллектором (табл. 1).

Минералы-спутники алмазов с относительно высокой склонностью к адгезии органического коллектора (целестин, пироп и др.) не исследовали, поскольку их содержание в кимберлите весьма незначительно.

Выбор реагентов-регуляторов олеофильности минералов кимберлита

При выборе начальной номенклатуры реагентов-регуляторов олеофильности минералов кимберлита рассматривались и традиционные, и новые классы органических соединений, применяемых для регулирования свойств минералов при флотации: фосфорсодержащих комплексонов, бифункциональных катионо- и анионоактивных полимеров, гидроксикислот, аминокислот, бифункционально модифицированных производных карбоксиметилцеллюлозы, катионоактивных азотсодержащих олефинов, алифатических аминов, четвертичных аммониевых соединений, катионных полимеров⁴ [8]. Изначально в список для исследования были включены реагенты, используемые в смежных отраслях промышленности. Так, реагенты классов алкиларилфосфонатов, азотсодержащих олефинов, алифатических аминов

Таблица 1
Результаты визиометрического анализа закрепления аполярного коллектора на минералах кимберлита

№	Минерал	Распространенность в кимберлитах, %	Доля покрытия поверхности органическим коллектором, %
1	Алмаз	2–10 карат/т	56–95
Минералы кимберлита			
2	Кальцит	1–40	22–65
3	Мусковит	0,1–5	25–50
4	Тальк	0,1–5	80–93
5	Пирит	0,05–1	35–55
6	Флогопит	0,1–5	15–25
7	Серпентин	1–10	7–10
8	Доломит	0,5–15	7–12

⁴ Юн Р.-Х., Кузнецов Д. Способ выделения алмазов из жильных минералов. Патент РФ 2412901, С2, опубл. 27.02.2011 Бюл. № 6.



эффективно применяют в нефтедобыче для повышения нефтеотдачи за счет снижения гидрофобности пластовых минералов [17, 18]. Критериями отбора являлись требования промышленного производства реагентов перечисленных классов и апробации в процессах флотации и смежных отраслях. В соответствии с этими требованиями для исследований были выбраны 14 реагентов, представленных в табл. 2.

Предварительную оценку эффективности рассматриваемых реагентов-регуляторов проводили путем определения «критической» концентрации, при которой прекращается закрепление органического коллектора. Критерием эффективности реагентов-регуляторов являлась их способность максимально снижать краевой угол смачивания вплоть до удаления капли органического коллектора с поверхности образца минерала при его обработке в растворах реагентов-регуляторов в диапазоне концентраций от 10 до 1000 мг/л. В качестве индикаторного минерала выбран флогопит.

Результаты исследований показали, что существенное снижение краевого угла смачивания и отрыв капли органического коллектора от поверхности флогопита в указанном диапазоне концентраций достигается при применении 13 реагентов-регуляторов (за исключением сульфата аммония), поэтому все эти реагенты были отобраны для последующих экспериментов (табл. 2).

Исследования и термодинамический анализ влияния реагентов-регуляторов на олеофильность минералов кимберлита

Термодинамически обоснованным параметром смачивающей способности органического коллектора и одновременно олеофильности минеральной поверхности является работа (энергия) адгезии. Работа адгезии аполярного коллектора на минеральной поверхности может быть рассчитана по уравнению Дюпре–Юнга [19]:

$$W_{\text{OK-M}} = \sigma_{\text{OK-B}}(1 - \cos \theta), \quad (1)$$

где $W_{\text{OK-M}}$ – работа адгезии коллектора на минерале, Дж/м²; $\sigma_{\text{OK-B}}$ – межфазное натяжение на границе раздела «органический коллектор – водная фаза», Н/м; θ – трехфазный краевой угол смачивания для капли органического коллектора на минеральной поверхности в водной фазе, град.

Для расчета работы адгезии аполярного коллектора на минеральной поверхности на приборе DSA25 были измерены краевые углы смачивания на алмазе и минералах кимберлита (см. табл. 1) в водной фазе (модельной сильноминерализованной воде) с растворенными в ней реагентами-регуляторами в диапазоне концентраций 0–500 мг/л. В качестве органического коллектора использовали смесь ТГКК и ДТФ

Таблица 2

Критические концентрации реагентов-регуляторов для закрепления органического коллектора на флогопите

№	Реагент-регулятор (техническая марка)	Класс органических соединений	«Критическая» концентрация реагента-регулятора, мг/л	
			при частичном отрыве капли коллектора	при полном отрыве капли коллектора
1	Цинковый комплексопат нитрилотриметилфос-фоновой кислоты (НТФК)	Нитрилалкиларифосфонат	130	166
2	Оксиэтилендифосфоновая кислота (ОЭДФ)	Алкилдифосфонат	90	130
3	Этилендиаминтетрауксусная кислота (ЭДТА)	Аминопикарбоновая кислота	130	166
4	Полиэтиленгликоль (ПЭГ-1500)	Катионоактивный полимер	90	130
5	Триполифосфат натрия (ТПФ)	Полифосфат	90	130
6	Полиэтиленгликолевый эфир моноалкилфенолов (Неонол АФ-9-6)	Катионоактивный азотсодержащий полимер	50	70
7	Модифицированная карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ 75-В)	Бифункционально модифицированные производные КМЦ	70	90
8	Антискалант комплексного действия (АКВА-ИСЗ)	Смесь алкилфосфатов, алкилфосфонатов и анионных полимеров	130	170
9	Натрий-карбоксиметилцеллюлоза техническая глиоксилированная (Камцел-600)	Бифункционально модифицированные производные КМЦ	50	70
10	Алкил С8-12-фенол этоксилированный (Эмульгатор ОП-4)	Короткоцепочечный алифатический амин	50	70
11	Алкилдиметиламинооксид C ₁₂ -C ₁₈ (Оксипав А1218.30)	Неионогенный азотсодержащий полимер	70	90
12	Триэтаноламин (ТЭА)	Аминоспирт	500	1000
13	2-гидроксипропановая кислота (Молочная кислота)	Гидроксикислота	330	500
14	Сульфат аммония	Четвертичное аммониевое соединение	–	–

(85 и 15 %). При предварительном смачивании шлифов также использовали сильноминерализованную модельную воду с добавками реагентов-регуляторов. На поверхность смоченного минерального образца шприцом-дозатором установки DSA25 наносили каплю органического коллектора, после чего повышали уровень водной фазы в кювете и получали изображения капли коллектора, закрепившейся на поверхности минерального образца (см. рис. 1, а).

Далее с использованием стагамометра СТ-1 по методике, изложенной в ГОСТ Р 50097–92⁵, были измерены масса и объем десяти капель органического коллектора, отрывающихся от изогнутого капилляра в водной среде. По полученным данным была установлена постоянная ячейки K (по измерениям на керосине) и определено поверхностное натяжение на

⁵ ГОСТ Р 50097–92 (ИСО 9101–87) «Вещества поверхностно-активные. Определение межфазного натяжения. Метод объема капли».

границе раздела фаз органический коллектор – водная фаза ($\sigma_{ок-в}$) для различных реагентов в интервале концентраций 0–500 мг/л:

$$K = \frac{47,5}{V(\rho_{\text{вода}} - \rho_{\text{керосин}})}; \quad (2)$$

$$\sigma_{ок-в} = KV(\rho_{\text{в}} - \rho_{ок}), \quad (3)$$

где V – объем капли, м³; $\rho_{\text{вода}}$ – плотность воды, кг/м³; $\rho_{\text{керосин}}$ – плотность керосина, кг/м³; 47,5 – поверхностное натяжение границы раздела керосин – вода, мН/м; $\rho_{\text{в}}$ – плотность водной фазы, кг/м³; $\rho_{ок}$ – плотность органического коллектора, кг/м³.

Результаты измерения краевого угла смачивания показали, что выбранные реагенты в различной степени влияют на смачиваемость поверхности алмаза, талька, кальцита и мусковита (рис 3, а, б) аполярным коллектором. Установлено, что в наибольшей степени

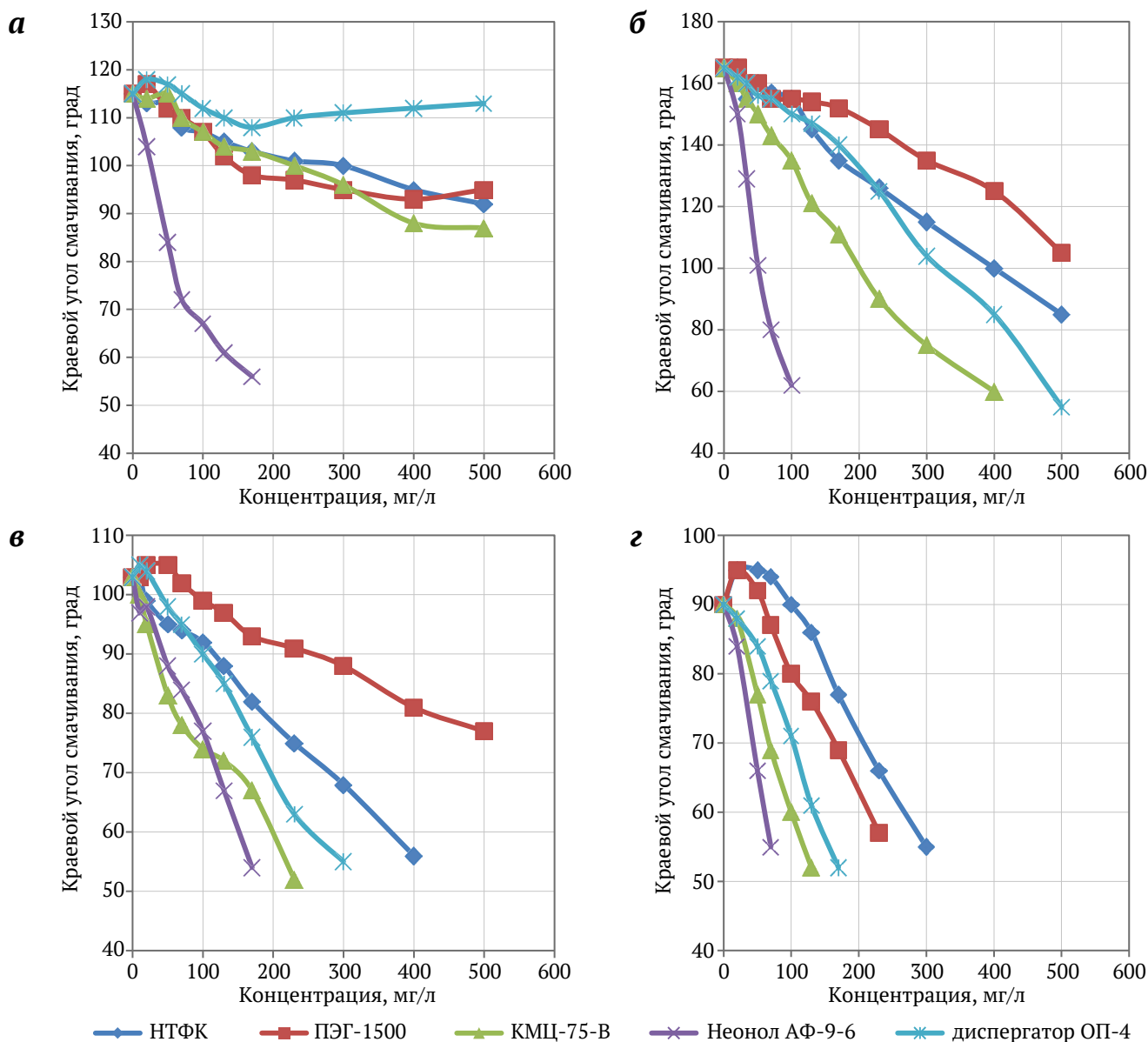


Рис. 3. Влияние реагентов-регуляторов на изменение краевого угла смачивания для трехфазного периметра смачивания минерал – органический коллектор – водная фаза для алмаза (а), талька (б), кальцита (в) и мусковита (г)



снижает краевой угол смачивания минералов кимберлита реагент Неонол АФ-9-6. Однако при использовании этого реагента снижается краевой угол смачивания и на поверхности алмазов. Отличающийся от других реагентов эффект на алмазе отмечается при добавлении эмульгатора ОП-4: после первоначального снижения краевого угла смачивания в диапазоне концентраций 0–130 мг/л наблюдается заметное возрастание измеряемой величины при больших концентрациях (см. рис. 3, а).

Наименьшее снижение краевого угла смачивания на минералах кимберлита наблюдается при добавках алкиларилфосфонатов (на примере НТФК) и алифатических спиртов (на примере ПЭГ-1500). Однако, надо отметить, что уровень снижения величины краевого угла смачивания при использовании этих реагентов существенно выше, чем на алмазах, что говорит о перспективности их применения. Органические полимеры на основе карбоксиметилцеллюлозы обладают свойством эффективного снижения олеофильности минералов кимберлита, однако схожее действие (в меньшем объеме) они оказывают и на закрепление аполярного коллектора на алмазе (см. рис. 3), что допускает возможность их применения при весьма малых концентрациях.

Результаты измерений поверхностного натяжения на границе раздела коллектор – водная фаза, частично представленные в табл. 3, указывают на различия в действии исследуемых реагентов-регуляторов. Реагенты, представляющие классы ионогенных и неионогенных азотсодержащих полимеров (Неонол АФ 9-6 и Оксипав А1218.30) и короткоцепочечный алифатический амин (ОП-4), проявляют свойства ПАВ, снижая поверхностное натяжение на границе раздела фаз органический коллектор – водная фаза в 2,8–3 раза (см. табл. 3).

Реагенты других классов в существенно меньшей мере проявляют свойства ПАВ, снижая величину поверхностного натяжения при концентрации 300–500 мг/л на 10–25%. Результаты измерений поверхностного натяжения на границе раздела органический коллектор – водная фаза в присутствии реагентов-регуляторов были использованы для расчета энергии адгезии по уравнению (1).

Результаты расчетов энергии адгезии на алмазе, тальке, кальците и мусковите, представленные на рис. 4, показывают, что исследованные реагенты в различной мере снижают энергию адгезии аполярного коллектора на минералах кимберлита.

Энергия адгезии органического коллектора на алмазе при добавках реагентов-регуляторов (за исключением Неанола АФ-9-6) снижается в 1,5–2 раза до значений 17–27,5 Дж/м² (см. рис. 4, а). На минералах кимберлита энергия адгезии органического коллектора снижается в 2,5–6 раз и достигает значений 6–17 кДж/м² (см. рис. 4, б, в, г). Неонол АФ-9-6 обладает аномальной способностью резкого снижения энергии адгезии органического коллектора на всех образцах, включая алмаз.

Для обоснования гидрофилизации минералов при воздействии реагентов-регуляторов представляется целесообразным сравнить энергию адгезии органического коллектора при «предкритических» (перед отрывом капли коллектора) концентрациях реагентов-регуляторов и энергию адгезии водной фазы. Результаты измерений показали, что для мусковита измеренное значение краевого угла смачивания капель модельной воды в воздухе составило 38 град и, соответственно, расчетной энергии адгезии водной фазы – 5,7 Дж/м². Полученная величина близка к энергии адгезии при «предкритических» концентрациях реагентов-регуляторов, находясь в диапазоне от 7 до

Таблица 3

**Результаты измерения и расчета поверхностного натяжения
на границе раздела органический коллектор – водная фаза (модельная сильноминерализованная вода)**

Реагенты-регуляторы	Концентрация, мг/л						
	0	50	100	170	230	300	500
	Поверхностное натяжение, мН/м						
НТФК	30,43	30,08	28,04	27,44	27,04	26,56	26,08
ОЭДФ	30,43	27,43	25,34	22,99	21,65	20,34	20,17
ЭДТА	30,43	30,13	30,01	29,60	29,14	26,33	22,08
ПЭГ-1500	30,43	28,45	27,05	24,83	24,00	24,45	24,60
ТПФ	30,43	26,20	25,24	25,01	24,78	25,12	22,50
Неонол АФ 9-6	30,43	24,21	20,14	16,32	15,91	14,23	12,33
КМЦ 75-В	30,43	28,34	27,77	27,22	26,95	25,45	23,47
ИС-3	30,43	30,01	29,07	28,56	28,34	27,77	27,40
КАМЦЕЛ-600	30,43	28,56	28,13	27,89	27,73	27,10	27,30
ОП-4	30,43	23,11	19,10	16,24	15,22	13,56	11,65
ОКСИПАВ А1218.30	30,43	20,66	14,34	11,01	9,52	9,45	9,04
Триэтаноламин	30,43	28,33	27,40	26,22	26,00	26,04	25,91
Молочная кислота	30,43	28,00	27,25	27,02	26,86	25,34	23,30

10,5 Дж/м² (см. рис. 4, з). Экстраполяция зависимости энергии адгезии от концентрации на «критическую» концентрацию даёт значение энергии адгезии в момент отрыва капли 5–7,5 Дж/м². Такой результат позволяет заключить, что отрыв капли органического коллектора от минеральной поверхности, т.е. её гидрофилизация, происходит при равенстве или близких значениях энергий адгезии на минерале воды и аполярного коллектора.

Исследования влияния реагентов-регуляторов на флотуемость минералов кимберлита аполярным собирателем

Описанные выше общие закономерности влияния реагентов-регуляторов на закрепление органического коллектора подтверждены результатами изучения флотуемости минералов кимберлита и алмазов.

Флотация в лабораторных условиях может быть использована для моделирования промышленного процесса пенной сепарации. При исследовании взаимодействия аполярных собирателей с поверхностью флотируемых минералов наблюдается тесная корреля-

ция уровня закрепления собирателя на минералах с их флотуемостью [20]. Методика мономинеральной флотации в трубке Халлимонда является общепризнанной методикой оценки гидрофобности поверхности минералов и оценки перспективности применения коллекторов в промышленном процессе [21].

Для флотации от измельченной мономинеральной массы методом рассева выделяли фракцию крупностью –250 + 75 мкм, из которой отбирали пробу минерала массой 150 мг. Пробу выдерживали в водной фазе объемом 35 мл в течение 60 мин. Затем в водную фазу добавляли реагент-регулятор, пробу выдерживали 5 мин и добавляли собиратель – мазут флотский Ф-5, операцию кондиционирования с собирателем проводили в течение 1 мин. Расход собирателя составлял 2 мкл (около 1,86 мг) на 35 мл водной фазы, концентрация собирателя при кондиционировании – 52 мг/л. После кондиционирования пробу с водной фазой загружали во флотационную установку, доливали водной фазой и флотировали 4 мин при общем расходе воздуха 50 мл. Температура водной фазы в операциях кондиционирования и флотации составляла 24 °С.

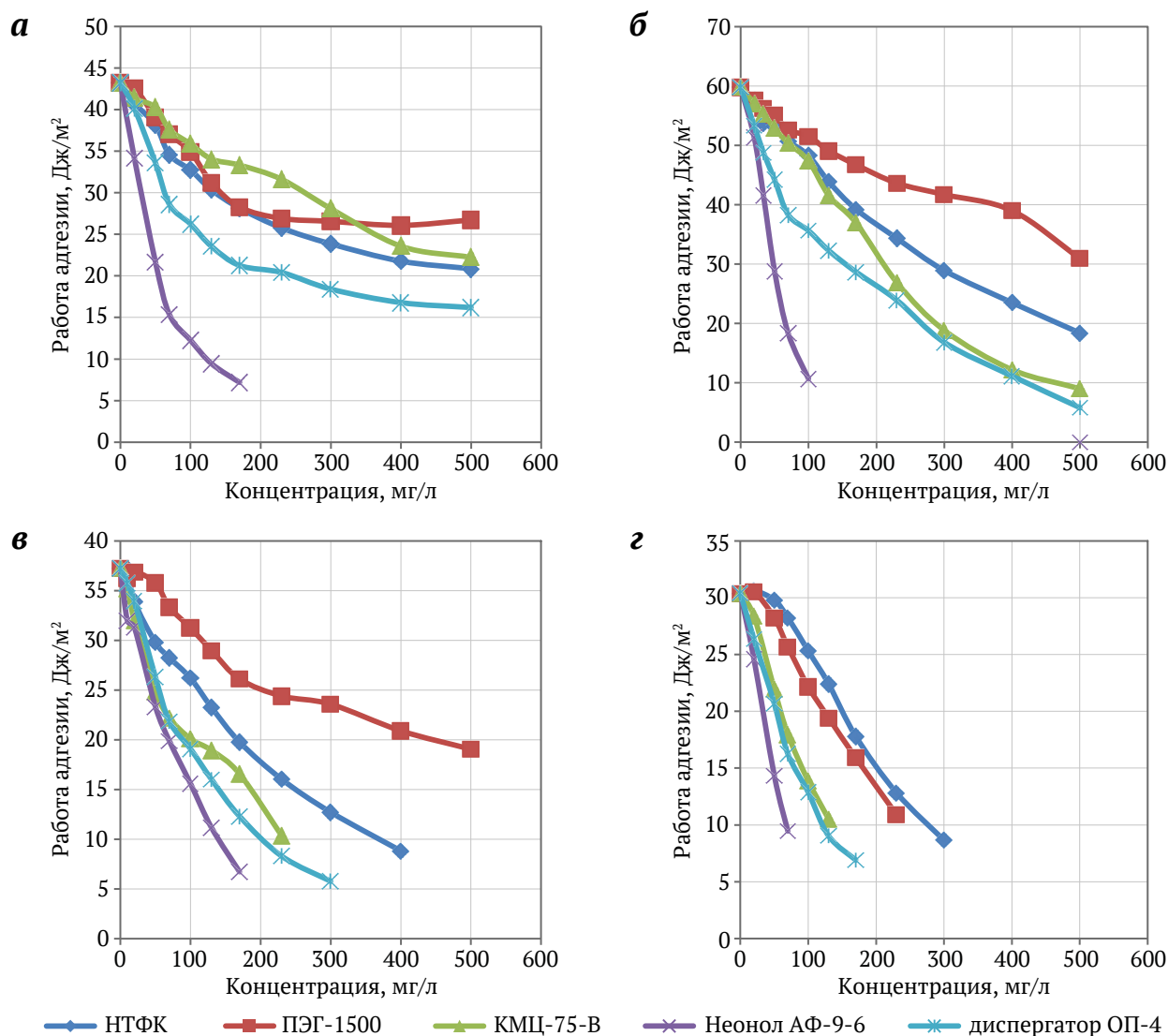


Рис. 4. Влияние реагентов-регуляторов на изменение энергии адгезии аполярного коллектора на алмазе (а), тальке (б), кальците (в) и мусковите (з)



Результаты флотационных опытов показали, что добавки реагентов-регуляторов различных классов по-разному влияют на флотируемость алмазов и минералов кимберлита (рис. 5).

Заметное снижение извлечения алмазов и минералов кимберлита при добавках реагента-регулятора наблюдается для КМЦ-75-В и Неонола АФ-9-6. Характер зависимостей извлечения алмазов и минералов кимберлита от расхода других реагентов-регуляторов заметно отличается. Так, при добавках НТФК извлечение алмаза практически не изменяется, тогда как флотируемость минералов кимберлита заметно снижается. Реагент ПЭГ-1500 не снижает флотируемость алмаза и относительно слабо снижает флотируемость минералов кимберлита. Диспергатор ОП-4 повышает флотируемость алмаза и снижает флотируемость минералов кимберлита.

Дальнейшие исследования проводили на кимберлитах, отличающихся степенью метаморфизма и минеральным составом: кимберлит пробы 1 представлен в большей степени первичными минералами: оливином (55 %), флогопитом и мусковитом (8 %), пироксеном (7 %), кальцитом (арагонитом) (6 %), доломитом (2,2 %), хромитом (2 %), сульфидами железа

(1,2 %), титаномагнетитом (1,0 %), пиропом (0,3 %) и др.; кимберлит пробы 2 представлен кальцитом (арагонитом) (34 %), оливином (22 %), флогопитом и мусковитом (6,5 %), доломитом (6,4 %), пироксеном (4,4 %), хромитом (2 %), тальком (2 %), сульфидами железа (1,1 %), титаномагнетитом (1,0 %), пиропом (0,2 5%) и др.

Перед флотацией пробу кимберлита обесшламливали и на флотацию направляли материал класса крупности –400 +180 мм. Методика подготовки и флотации кимберлита соответствовала методике флотации алмазов и отдельных минералов.

Исходя из анализа данных, полученных при флотации алмаза и отдельных минералов кимберлита, для экспериментов по флотации кимберлита была выбрана концентрация реагентов-регуляторов 200 мг/л (для Неонола АФ-9-6 и Оксипав А1218.30 дополнительно 50 мг/л).

Результаты исследований показали возможность подавления флотируемости кимберлитов при использовании исследованных реагентов-регуляторов. Наиболее интенсивно снижают флотируемость (выход) кимберлитов реагенты Неонол АФ-9-6, Оксипав А1218.30, ИС-3 и Камцелл 600 (табл. 4).

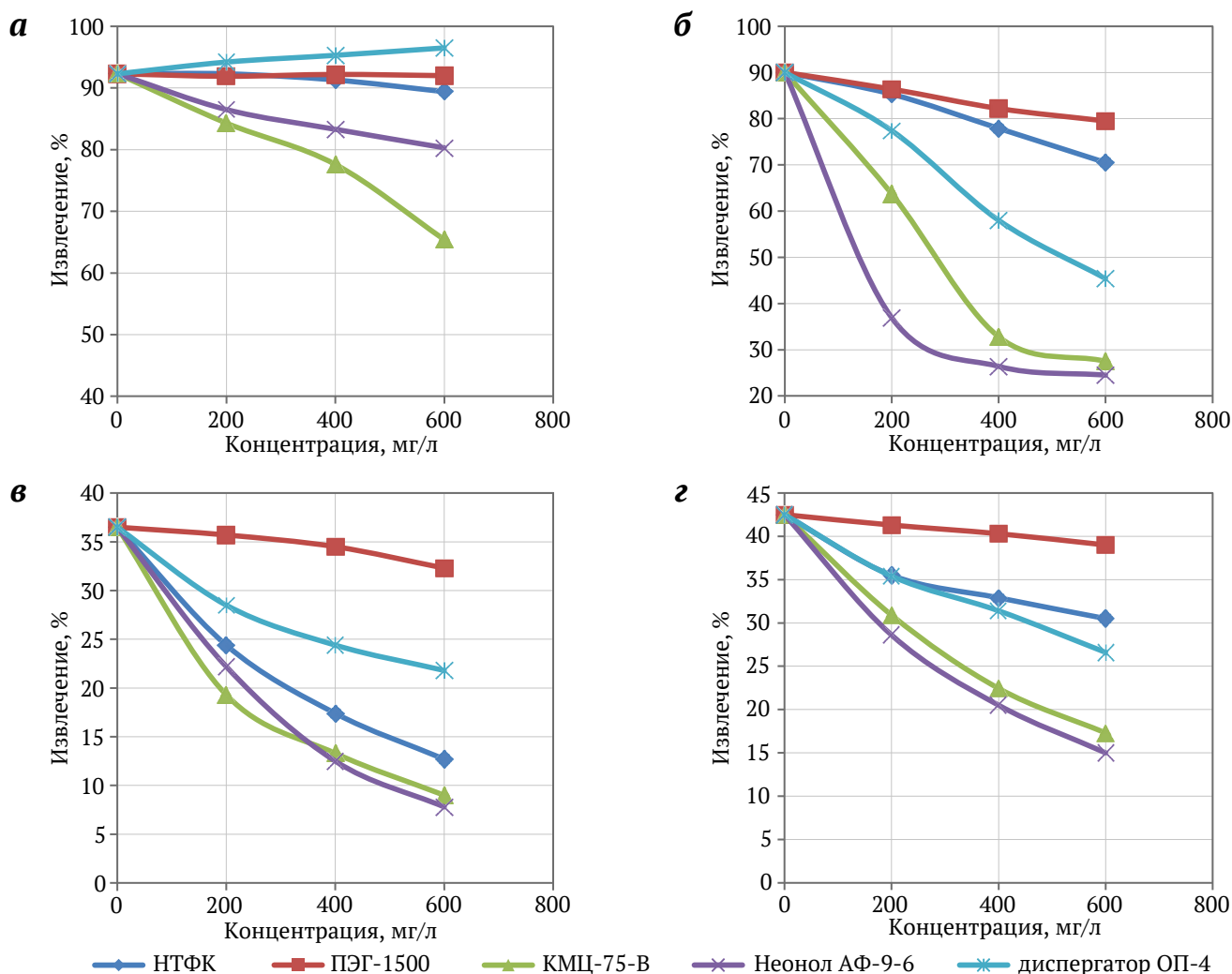


Рис. 5. Влияние реагентов-регуляторов на изменение флотируемости алмаза (а), талька (б), кальцита (в) и мусковита (г)



Таблица 4

Влияние реагентов-регуляторов на селективность флотации алмазов и кимберлита

Реагент-регулятор	Извлечение алмазов, %	Выход кимберлита в пенный продукт, %		Критерий селективности S, %	
		Проба 1	Проба 2	Проба 1	Проба 2
Без добавок	92,3	3,77	4,94	87,40	85,88
НТФК	92,5	2,04	2,51	89,85	89,24
ОЭДФ	92,3	2,57	2,56	88,96	88,97
ЭДТА	90,5	2,44	2,82	87,33	86,83
ПЭГ-1500	91,9	5,65	4,86	84,56	85,58
ТПФ	88,3	2,31	3,69	85,30	83,50
Неонол АФ 9-6	86,3	0,67	1,92	85,43	83,80
Неонол АФ 9-6 (50 мг/л)	90,5	2,12	2,66	87,74	87,04
КМЦ 75-В	88,5	2,16	1,79	85,69	86,17
ИС-3	90,4	1,36	2,44	88,63	87,23
КАМЦЕЛ-600	88,8	1,97	2,43	86,24	85,64
ОП-4	94,2	2,44	5,12	91,03	87,54
Окспав А1218.30	84,3	1,33	1,48	82,57	82,38
Окспав А1218.30 (50 мг/л)	88,3	1,15	1,22	86,81	86,71
Триэтаноламин	88,3	3,4	3,87	83,88	83,27
Молочная кислота	89,2	3,2	3,99	85,04	84,01

Однако, поскольку при использовании добавок некоторых реагентов наблюдается снижение извлечения алмазов, оценка их эффективности и возможности использования требует применения специализированных критериев, например, критерия селективности. Оценку селективности проводили с использованием уравнения, предложенного в работе [1] для процесса пенной сепарации:

$$S = \varepsilon - 1,3\gamma, \quad (4)$$

где S – критерий селективности; ε – извлечение алмазов; γ – выход (извлечение) кимберлита в концентрат.

Анализ данных расчета критерия селективности показал, что наиболее высокая селективность флотации алмазов достигнута при использовании реагентов-регуляторов НТФК, ОЭДФ, ИС-3, ОП-4 (см. табл. 4).

Тем не менее подтверждена возможность применения и некоторых других исследованных реагентов-регуляторов для повышения селективности флотационного извлечения алмазов из кимберлитов различного генезиса.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена возможность снижения флотуемости минералов кимберлита и частиц породы кимберлита и повышения технологических показателей флотации алмазосодержащих кимберлитов с использованием реагентов-регуляторов классов алкиларилфосфонатов, короткоцепочечных алифатических аминов, комплексных реагентов. Применение реагентов с сильным проявлением свойств ПАВ (ионогенных и неионогенных азотсодержащих короткоцепочечных полимеров) даст положительный результат при варьировании их расходов исходя из данных экспериментов со сниженным расходом реагентов-регуляторов Неонол АФ-9-8 и Окспав А1218.30.

Основные выводы

На основе анализа комплексных физико-химических исследований взаимодействия аполярных коллекторов и реагентов-регуляторов различных классов с поверхностью минералов алмазосодержащих кимберлитов и результатов флотационных исследований обоснованы и выбраны реагенты-регуляторы, обеспечивающие повышение селективности процессов обогащения алмазосодержащих кимберлитов пенной и рентгенолюминесцентной сепарацией.

Визиометрическим анализом определено, что из минералов кимберлита наибольшей адгезионной активностью по отношению к аполярному коллектору (олеофильностью) и флотоактивностью обладают тальк, кальцит, мусковит, пирит, флогопит.

По данным измерения краевого угла смачивания выявлена четкая тенденция снижения адгезионной активности флотоактивных минералов кимберлита по отношению к аполярному коллектору при использовании реагентов-регуляторов классов алкиларилфосфонатов (НТФК; ОЭДФ), алифатических спиртов (ПЭГ-1500); бифункционально модифицированных производных КМЦ (КМЦ-75-В; Камцел 600), ионогенных и неионогенных азотсодержащих полимеров (Неонол АФ-9-6, Окспав А1218.30); короткоцепочечных алифатических аминов (диспергатор ОП-4), комплексных реагентов (реагент ИС-3),

Расчеты с использованием уравнения Дюпре–Юнга (на основе полученных экспериментально значений краевого угла смачивания и поверхностного натяжения на границе раздела фаз органический коллектор – водная фаза) показали, что при добавлении реагентов-регуляторов энергия адгезии аполярного коллектора на минералах кимберлита, за исключением талька, снижается в 2,5–6 раз и достигает значений 6–15 Дж/м², сопо-



ставимых с энергией адгезии водной фазы (5,7 Дж/м²). При этом на алмазах энергия адгезии коллектора в аналогичных условиях снижается до значений 17–27,5 Дж/м², что обуславливает устойчивое закрепление на нем аполярного коллектора. Этот факт предопределяет усиление контрастности флотационной активности минералов кимберлита и алмазов реагентами-регуляторами и обосновывает возможность повышения селективности флотации алмазов из кимберлитов.

Результаты флотационных исследований на алмазах и кимберлитах различной степени метаморфизма подтвердили возможность повышения селективности флотации алмазов при использовании реагентов-регуляторов НТФК, ОЭДФ, ИС-3, ОП-4. Перечисленные реагенты-регуляторы рекомендованы для испытаний в промышленных процессах пенной сепарации в схемах обогащения алмазосодержащих кимберлитов.

Список литературы / References

1. Чантурия В.А., Морозов В.В., Двойченкова Г.П. и др. Оптимизация состава и условий применения средств для модификации спектральных характеристик алмазов при рентгенолюминесцентном разделении. *Горные науки и технологии*. 2023;8(4):313–326. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-154>
Chanturiya V.A., Morozov V.V., Dvoichenkova G.P., et al. Optimizing composition and application conditions of agents for modifying spectral characteristics of diamonds in X-ray luminescence separation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(4):313–326. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-09-154>
2. Morozov V.V., Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., Chanturia E.L. Hydrophobic interactions in the diamond–organic liquid–inorganic luminophore system in modification of spectral and kinetic characteristics of diamonds. *Journal of Mining Science*. 2022;58(2):257–266. <https://doi.org/10.1134/S1062739122020090>
3. Коваленко Е.Г., Бабушкина А.Д., Чуть-Ды В.А. Применение многокомпонентных собирателей и выбор температурных режимов в пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов. *Горный журнал*. 2023;(12):51–62. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.12>
Kovalenko E.G., Babushkina A.L., Chut-Dy V.A. Application of multi-component collectors and selection of temperature modes for frother separation of diamond-bearing kimberlites. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(12):51–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.12>
4. Морозов В.В., Коваленко Е.Г., Двойченкова Г.П. и др. Современные направления повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов. *Горные науки и технологии*. 2024;9(2):134–145. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-07-136>
Morozov V.V., Kovalenko E.G., Dvoychenkova G.P., et al. Current trends of improving the efficiency of froth separation of diamond-bearing kimberlites. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):134–145. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-07-136>
5. Morozov V.V., Chanturia V.A., Dvoichenkova G.P., et al. Selecting organic collectors for luminophore-bearing modifying agents to extract weakly fluorescent diamonds. *Journal of Mining Science*. 2023;59(2):292–301. <https://doi.org/10.1134/S1062739123020126>
6. Nguyen A.V., Schulze H.J. *Colloidal science of flotation*. New York: Marcel Dekker; 92004. 850 p.
7. Кондратьев С.А. Термодинамические условия нахождения физически сорбируемых собирателей на минеральной поверхности в элементарном акте флотации. *Цветные металлы*. 2024;(7):118–136. <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.07.02>
Kondratyev S.A. Thermodynamic conditions for the presence of physically sorbed collectors on a mineral surface in an elementary act of flotation. *Tsvetnye Metally*. 2024;(7):118–136. <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.07.02>
8. Zhang J., Kouznetsov D.L., Yu M., et al. Improving the separation of diamond from gangue minerals. *Minerals Engineering*. 2012;36–38:168–171. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.015>
9. Верхотуров М.В., Амелин С.А., Коннова Н.И. Обогащение алмазов. *Международный журнал экспериментального образования*. 2012;(2):61.
Verkhoturov M.V., Amelin S.A., Konnova N.I. Diamond beneficiation. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Eksperimental'nogo Obrazovaniya*. 2012;(2):61. (In Russ.)
10. Сергиенко В.И., Перфильев А.В., Ксеник Т.В., Юдаков А.А. Получение и применение гидрофобных сорбентов из алюмосиликатов. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2015;(5):108–112.
Sergienko V.I., Perfilov A.V., Ksenik T.V., Yudakov A.A. Obtaining and application of hydrophobic adsorbents on the basis of aluminosilicates. *Proceedings of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2015;(5):108–112. (In Russ.)
11. Земцов Ю.В., Мазаев В.В. *Современное состояние физико-химических методов увеличения нефтеотдачи: литературно-патентный обзор*. Екатеринбург: ООО «Издательские решения»; 2021. 239 с.
Zemtsov Yu.V., Mazaev V.V. *Current state of physicochemical enhanced oil recovery methods: a literature and patent review*. Yekaterinburg: LLC «Izdatel'skie resheniya»; 2021. 239 p. (In Russ.)
12. Попов К.И., Ковалева Н.Е., Рузакова Г.Я. и др. Современное состояние разработок биоразлагаемых ингибиторов солеотложений для различных систем водопользования. *Теплоэнергетика*. 2016;(2):46–53. <https://doi.org/10.1134/S0040363616010094> (Перев. вер.: Popov K.I., Kovaleva N.E., Rudakova G.Y.,



- et al. Recent state-of-the-art of biodegradable scale inhibitors for cooling-water treatment applications (review). *Thermal Engineering*. 2016;63(2):122–129. <https://doi.org/10.1134/S0040601516010092>
- Popov K.I., Kovaleva N.E., Rudakova G.Y., et al. Recent state-of-the-art of biodegradable scale inhibitors for cooling-water treatment applications (review). *Thermal Engineering*. 2016;63(2):122–129. <https://doi.org/10.1134/S0040601516010092> (Orig. ver.: Popov K.I., Kovaleva N.E., Rudakova G.Y., et al. Recent state-of-the-art of biodegradable scale inhibitors for cooling-water treatment applications (review). *Teploenergetika*. 2016;(2):46–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0040363616010094>)
13. Siddiqui M.A. Q., et al. Current understanding of shale wettability: A review on contact angle measurements. *Earth-Science Reviews*. 2018;181:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.04.002>
14. Двойченкова Г.П., Коваленко Е.Г., Тимофеев А.С., Подкаменный Ю.А. Повышение эффективности пенной сепарации алмазосодержащего материала за счет комбинированной очистки поверхности алмазов от шламовых гидрофилизирующих покрытий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(10):20–38. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_10_0_20
- Dvoichenkova G.P., Kovalenko E.G., Timofeev A.S., Podkamennyi Yu.A. Enhanced efficiency of diamond foam separation after complex removal of hydrophilic slime coats from diamond surface. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2022;(10):20–38. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_10_0_20
15. Богатов М.В., Юдин П.Е., Веревкин А.Г., Берков Д.В. Влияние гидрофильности, олеофобности на образование асфальтосмолопарафиновых отложений. *Нефтегазовое дело*. 2022;20(6):117–126. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-114-123>
- Bogatov M.V., Yudin P.E., Verevkin A.G., Berkov D.V. Effect of hydrophilicity, oleficity on formation of asphalt resin paraffin deposits. *Petroleum Engineering*. 2022;20(6):117–126. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-114-123>
16. Samara H., Jaeger P. Experimental determination of wetting behavior under non-atmospheric conditions relevant to reservoirs: a practical guide. *SN Applied Sciences*. 2022;4:85. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-04963-8>
17. Belhaj A.F., Elraies K.A., Mahmood S.M., et al. The effect of surfactant concentration, salinity, temperature, and pH on surfactant adsorption for chemical enhanced oil recovery: a review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2020;10(1):125–137. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0685-y9>
18. Третьяков Н.Ю., Паничева Л.П., Турнаева Е.А. и др. Синтез и изучение свойств алкилфосфатов как поверхностноактивных компонентов щелочно-ПАВ-полимерного состава для повышения нефтеотдачи пласта. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2021;11(1):147–158. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-147-158>
- Tret'yakov N.Yu., Panicheva L.P., Turnaeva E.A., et al. Synthesis of alkyl phosphates and investigation of their surface-active properties in an alkaline surfactant polymer system for enhanced oil recovery. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(1):147–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-147-158>
19. Дерябин В.А., Фарафонтובה Е.П. *Физическая химия дисперсных систем*. М.: Юрайт; 2018. 86 с.
- Deryabin V.A., Farafontova E.P. *Physical chemistry of disperse systems*. Moscow: Yurayt; 2018. 86 p. (In Russ.)
20. Кондратьев С.А. Обоснование механизма работы физически сорбированного собирателя в элементарном акте флотации. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021;(1):118–136. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210112> (Перев. вер.: Kondrat'ev S.A. Action of physisorbed collector in particle–bubble attachment. *Journal of Mining Science*. 2021;57(1):106–122. <https://doi.org/10.1134/S1062739121010129>)
- Kondrat'ev S.A. Action of physisorbed collector in particle–bubble attachment. *Journal of Mining Science*. 2021;57(1):106–122. <https://doi.org/10.1134/S1062739121010129> (Orig. ver.: Kondrat'ev S.A. Action of physisorbed collector in particle–bubble attachment. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2021;(1):118–136. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210112>)
21. Błaszczak A., Ratajczak T., Szyszka D. Flotation of hydrophobic minerals in Hallimond tube. *Mining Science*. 2024;31:219–227. <https://doi.org/10.37190/msc243112>

Информация об авторах

Валентин Алексеевич Чантурия – доктор технических наук, профессор, академик РАН, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-4410-8182, Scopus ID 7004497128, ResearcherID J-9712-2014; e-mail vchan@mail.ru

Валерий Валентинович Морозов – доктор технических наук, профессор кафедры общей и неорганической химии, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-4105-944X, Scopus ID 7402759618; e-mail dchmggu@mail.ru

Елена Леонидовна Чантурия – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-5757-4799, Scopus ID 57196009376, ResearcherID J-4214-2014; e-mail elenachan@mail.ru



Андрей Леонидович Самусев – кандидат технических наук, заведующий лабораторией теории разделения минеральных компонентов, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7324-0353](#), Scopus ID [54894913500](#); e-mail samusev_a@ipkonran.ru

Information about the authors

Valentin A. Chanturiya – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4410-8182](#), Scopus ID [7004497128](#), ResearcherID [J-9712-2014](#); e-mail vchan@mail.ru

Valeriy V. Morozov – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4105-944X](#), Scopus ID [7402759618](#); e-mail dchmggu@mail.ru

Elena L. Chanturiya – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Enrichment and Processing of Mineral Resources and Technogenic Raw Materials, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5757-4799](#), Scopus ID [57196009376](#), ResearcherID [J-4214-2014](#); e-mail elenachan@mail.ru

Andrey L. Samusev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Theory of Mineral Components Separation, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7324-0353](#), Scopus ID [54894913500](#); e-mail samusev_a@ipkonran.ru

Поступила в редакцию	01.09.2025	Received	01.09.2025
Поступила после рецензирования	30.09.2025	Revised	30.09.2025
Принята к публикации	01.10.2025	Accepted	01.10.2025




ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-461>

УДК 622:621.311

**Интеграция цифровых технологий в процесс проектирования систем электроснабжения горнопромышленных предприятий**В.Л. Петров¹  , Е.К. Бурматова², А.В. Пичуев¹   ¹ Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация² ООО «Промстрой Инжиниринг», г. Москва, Российская Федерация allexstone@mail.ru**Аннотация**

Исследование направлено на разработку интегрированного программного решения для автоматизации проектирования систем электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий. Актуальность работы обусловлена наличием системных проблем в существующих программных комплексах, таких как: фрагментированность процессов проектирования, необходимость многократного ручного переноса данных между различными платформами, зависимость от оборудования конкретных производителей и отсутствие универсальных решений для подбора компонентов. В ходе исследования выполнен комплексный анализ современных подходов к проектированию СЭС, разработаны новые методики автоматизации, созданы алгоритмы расчета электрических нагрузок и подбора оборудования. Методологическую основу составили положения нормативных документов и принципы модульной архитектуры, реализованные на языке C# с обеспечением интеграции с BIM-платформами (*nanoCAD*) и табличными процессорами (*Excel*). Ключевым результатом стало создание цифрового программного обеспечения, автоматизирующего сбор исходных данных из BIM-моделей, расчет электрических нагрузок, токов короткого замыкания и подбор элементов СЭС. Практическая апробация на проекте электроснабжения золотоизвлекающей фабрики «Кумроч» продемонстрировала сокращение ручных операций до 80 %, повышение точности расчетов и обеспечение независимости от производителей оборудования. Разработанное программное решение эффективно устраняет основные недостатки существующих аналогов, обеспечивая сквозной автоматизированный процесс проектирования, что позволяет существенно повысить производительность, качество и гибкость проектных работ в контексте реализации стратегии цифровизации энергетики.

Ключевые слова


горнопромышленные предприятия, цифровые технологии, электротехнические системы, системы электроснабжения, проектирование, цифровизация, программное обеспечение, цифровая трансформация, автоматизация проектирования

Для цитирования

Petrov V.L., Burmatova E.K., Pichuev A.V. Integration of digital technologies into the design process of power supply systems for mining enterprises. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):393–403. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-461>

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Integration of digital technologies into the design process of power supply systems for mining enterprisesV.L. Petrov¹  , E.K. Burmatova², A.V. Pichuev¹   ¹ University of Science and Technology MISIS, Moscow Russian Federation² Promstroy Engineering LLC, Moscow, Russian Federation allexstone@mail.ru**Abstract**

The study focuses on the development of an integrated software solution for the automation of power supply system (PSS) design for industrial enterprises. The relevance of this work arises from systemic issues observed in existing software packages, such as fragmented design processes, the need for repeated manual data transfer between different platforms, dependence on specific manufacturers' equipment, and the



lack of universal component selection tools. The research included a comprehensive analysis of current approaches to PSS design, the development of new automation methods, and the creation of algorithms for calculating electrical loads and selecting equipment. The methodological framework was based on regulatory standards and the principles of modular architecture, implemented in C# with integration into BIM platforms (*nanoCAD*) and spreadsheet processors (*Excel*). The key result is the creation of digital software that automates data collection from BIM models, calculation of electrical loads and short-circuit currents, and selection of PSS components. Practical testing on the power supply project of the Kumroch gold processing plant demonstrated an 80% reduction in manual operations, improved calculation accuracy, and independence from specific equipment manufacturers. The developed software solution effectively eliminates the main shortcomings of existing analogues by providing an end-to-end automated design process, which significantly enhances the efficiency, accuracy, and flexibility of design activities in the context of power sector digitalization.

Keywords

mining enterprises, digital technologies, electrical systems, power supply systems, design, digitalization, software, digital transformation, design automation

For citation

Petrov V.L., Burmatova E.K., Pichuev A.V. Integration of digital technologies into the design process of power supply systems for mining enterprises. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(4):393–403. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-09-461>

Введение

Электротехнические комплексы горнопромышленных предприятий должны отвечать особым требованиям, которые обусловлены не только необходимостью обеспечения эффективности и безопасности, но и сложностью технологических процессов добычи и переработки минерального сырья [1]. К числу таких ключевых требований относятся надежность, устойчивость, безопасность, качество электроэнергии, экономичность, удобство эксплуатации и гибкость с возможностью модернизации. Однако разработка систем электроснабжения (СЭС), удовлетворяющих этим критериям, сопряжена с решением комплекса уникальных задач, не имеющих универсальных решений. Это связано с совокупностью факторов, включающих многообразие геотехнологий, вариативность технологических цепочек, а также геологическую и географическую уникальность месторождений, что в целом исключает возможность создания инвариантных подходов [2–4]. Поэтому формализация новых методик проектирования, адаптирующихся к специфике конкретного объекта и интегрирующих современные цифровые инструменты, представляется актуальной научно-практической задачей.

Современные цифровые технологии проектирования систем электроснабжения объектов промышленности представляют собой комплекс специализированных программ (СП) в составе программного обеспечения (ПО), которые используют компьютерные методы для создания, изменения, анализа и оптимизации проектных решений. Тем самым обеспечивается разработка более точных моделей СЭС, улучшается взаимодействие между участниками процесса проектирования и реализуется возможность визуализации проектов.

Для цифровых технологий проектирования используют специализированные программы: *BIM*-системы (*Revit*, *nanoCAD BIM*, *ArchiCAD*); системы автоматизированного проектирования (*AutoCAD*,

nanoCAD, *SketchUp*); инструменты визуализации (*Lumion*, *V-Ray*) и т.д.¹.

В целях выявления ключевых особенностей процесса ведения проектирования электроснабжения промышленных предприятий, его сильных и слабых сторон, обоснования актуальности данной темы и определения степени ее проработки был проведен анализ современных исследований [5–7], отражающих основные подходы к автоматизации инженерных расчетов в области проектирования электроснабжения [7–9]:

- релевантность тематики проекта (расчет нагрузок, подбор оборудования, САПР) [7];
- практическая направленность (используемые инструменты, архитектура, языки программирования) [8–10];
- нормативная база (соответствие ГОСТ, ПУЭ и СП);
- ориентация на актуальные технологии (*BIM*, интеграция с *Excel*, *nanoCAD*) [11–13].

Проанализированные материалы охватывают широкий спектр решений – от узкоспециализированных расчетных программ для сетей напряжением 6–10 кВ до *BIM*-интегрированных платформ общего проектирования. Большинство из них направлены на повышение точности и скорости инженерных расчетов за счет автоматизации и формализации методик, регламентированных нормативными документами [14–16].

Основные направления развития в области цифровизации, совершенствования и практической реализации ПО на основе интеграции цифровых технологий в процесс проектирования электротехнических систем промышленных предприятий включают в себя следующие позиции [17–19]:

1. Автоматизация расчетов электрических нагрузок и токов короткого замыкания. Это базовый функ-

¹ Проект электрики: цифровые технологии и их роль в современном строительстве. Energy-systems; Российские BIM-технологии: проектирование систем электроснабжения в Model Studio CS. Хабр. URL: <https://habr.com/ru/companies/nanosoft/articles/581434/>



ционал почти всех рассматриваемых систем. Во многих случаях реализован в средах, поддерживающих простую интеграцию с *Excel* или другими табличными форматами² [18, 19].

2. Подбор оборудования (кабелей, автоматов, трансформаторов). Подходы варьируются: от ручного подбора по табличным данным до полуавтоматических модулей, завязанных на продукцию конкретных производителей. Универсальных и независимых решений – крайне мало.

3. Разработка интерфейсов и обеспечение совместимости. Значительное внимание уделяется взаимодействию с альтернативными средами, в особенности – с *nanoCAD*. Некоторые проекты реализуют интеграцию через *Excel* (как универсальный формат), другие – через *API BIM*-платформы. Простота и доступность интерфейса – важнейшие факторы практического применения.

4. Способность представления систем в модульной архитектуре и возможность их масштабируемости. Наиболее продвинутые решения строятся по принципу расширяемых модулей, что позволяет поэтапно внедрять новые функции и адаптироваться под задачи заказчика.

5. Разработка нового программного обеспечения с учетом развития языков программирования. Встречаются как устаревшие среды (например, C++ в связке с *Access*), так и современные подходы на C#. Налицо разрыв между академическими разработками и рыночными решениями: первые часто тяжеловесны и неудобны для внедрения, вторые – закрытые и монобрендовые.

Исследования демонстрируют устойчивый интерес к автоматизации процессов проектирования, однако в большинстве решений прослеживается ряд ограничений:

- зависимость от производителя. Многие разработки ориентированы на использование оборудования конкретных брендов (*Schneider*, *SIEMENS*, *ABB* и др.), что ограничивает их применение в проектных организациях, где применяются компоненты от разных поставщиков;

- сложность или избыточность интерфейса. Некоторые продукты, такие как *Eplan*, обладают чрезмерно сложной архитектурой, требующей обучения, в то время как основная потребность – быстрое выполнение типовых расчётов без глубокой адаптации;

- отсутствие независимого модуля подбора оборудования. Во многих случаях подбор кабелей и аппаратов осуществляется вручную или полуавтоматически с применением ограниченных баз данных. В проекте, разрабатываемом в рамках стартапа, планируется реализовать автоматизированный подбор по обобщённым характеристикам, что повышает гибкость и точность расчётов;

- слабая адаптация под *BIM*-среду. Несмотря на актуальность различных софтов для *BIM*-моделирова-

ния в инженерной практике лишь малая часть решений поддерживает интеграцию с этими платформами напрямую. Проект, в рамках которого проводится НИР, предлагает экспорт данных в *Excel*, полученных из *nanoCAD*, что существенно упрощает связку расчётов с моделями;

- ограниченное распространение открытых решений. Академические разработки часто не доводятся до рабочего прототипа, не сопровождаются документацией и не масштабируются.

На данный момент в существующем комплексе проектирования СЭС промышленных и горнопромышленных предприятий несмотря на современный уровень развития технологий остаются процессы, требующие продолжительной, монотонной работы человека. В основном причина этой проблемы – необходимость вручную переносить одни и те же данные между различными ПО, а зачастую не по одному разу, т.к. проектирование неразрывно связано с внесением множества изменений, созданием нескольких итераций и т.д. Такие этапы в процессе проектирования не только усложняют работу человека, требуют высоких трудозатрат и большого количества времени, но и ввиду своей монотонности и часто больших объемов приводят к огромному числу ошибок при многократном переносе данных.

Большая часть существующих ПО выпущена производителями электротехнического оборудования, что лишает расчеты объективности и привязывает пользователя к бренду. При этом, как правило, компании-заказчики имеют свои бренд-листы и требуют использования в проектах оборудования и материалов определенных производителей.

Программы-аналоги часто имеют сложную структуру, непонятный интуитивно интерфейс, требуют неоправданного вложения сил и времени для ознакомления с ними.

Цифровизация открывает широкий спектр в реализации инновационных решений и оптимизации непосредственно процесса проектирования, что позволяет добиться более точных расчётов, уменьшить количество ошибок и улучшить эффективность проектов. Это особенно важно в условиях, когда скорость строительства и экономия ресурсов играют ключевую роль.

Цифровые технологии в проектировании СЭС не только улучшают качество работ, но и существенно влияют на общие бюджеты проектов. Применение автоматизированных систем и программ сокращает временные издержки на разработку проекта до 30 %.

Кроме того, снижение количества ошибок и переделок благодаря более точным расчётам и моделированию снижает риск дополнительных затрат. Это оставляет гораздо больше простора для манёвра в пределах установленного бюджета и может использоваться для внедрения ещё более эффективных технологических решений.

Перспективным направлением в области внедрения цифровых технологий в процесс проектирования СЭС промышленных предприятий является сочетание искусственного интеллекта и больших данных, кото-

² Руководящий технический материал «Указания по расчету электрических нагрузок» от 30.07.1992 № РТМ 36.18.32.4–92. ВНИПИ ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ; 1992.



рые позволят реализовать автоматизацию корректировок проектов в реальном времени и интеграцию с новыми источниками энергии, такими как солнечные панели и ветрогенераторы, для более эффективного использования возобновляемых источников.

Цели и задачи исследования

Целью исследования является разработка архитектурных и методических решений для интеграции цифровых технологий в процесс проектирования электротехнических систем горнопромышленных предприятий на основе адаптации программного обеспечения для расчета электрических нагрузок и подбора элементов системы электроснабжения.

Основные методы исследования: сравнительный анализ (оценка функциональности и ограничений современных программных комплексов: BIM, САПР, расчетные системы); математическое моделирование (разработка алгоритмов расчета нагрузок и токов КЗ по нормативной методике); алгоритмизация и программирование (создание на C# модульного ПО для автоматизации расчетов, подбора оборудования и интеграции с Excel/nanoCAD); экспериментальная апробация (тестирование ПО на реальных данных проекта электроснабжения золотоизвлекательной фабрики «Кумроч»); системный подход (оптимизация процесса проектирования как единого цикла с исключением ручных операций и интеграцией этапов).

В процессе разработки ПО необходимо решить следующие задачи.

1. Выявление системных проблем, ограничений и оценка функциональности современных программных комплексов.

2. Формализация и алгоритмизация методики расчета электрических нагрузок и токов короткого замыкания в соответствии с нормативной базой, а также разработка алгоритмов подбора элементов СЭС.

3. Реализация на языке C# интегрированного программного комплекса, обеспечивающего автоматизацию расчетов, подбор оборудования и двусторон-

нюю интеграцию с платформами (nanoCAD, Excel) для исключения ручного переноса данных.

4. Апробация элементов ПО на реальных данных проекта электроснабжения горнопромышленного предприятия.

Ожидаемый результат – программный комплекс, позволяющий на основании исходных данных в виде таблицы Excel получить расчет нагрузок и автоматически подобрать рекомендуемые параметры оборудования с учетом нагрузок, токов коротких замыканий и конфигурации системы.

Областью применения продукта являются горнопромышленные компании на этапе разработки или технического перевооружения. Потенциальные потребители – проектные организации, занимающиеся проектированием СЭС предприятий горнопромышленного комплекса.

Архитектура комплекса проектирования СЭС

Рассмотрим процесс проектирования на примере схемы, представленной на рис. 1.

Исходные данные поступают, как правило, в виде перечня электроприемников с указанием: типа; номинальной электрической (или механической) мощности; номинального напряжения питания; коэффициента полезного действия; коэффициента мощности; режима работы; места управления; категории надежности электроснабжения по ПУЭ; числа часов работы в год; местоположения.

На этапе 1 технические характеристики используются для расчета нагрузок. Расчет осуществляется на базе Microsoft Excel по методу коэффициента максимума и использования номинальной мощности. Хотя использование ПО позволяет автоматизировать расчет, все же необходимо участие человека: вручную производится, во-первых, распределение потребителей по распределительным щитам; во-вторых, подбор коэффициента расчетной нагрузки (коэффициента максимума) по коэффициенту использования и эффективному числу электроприемников из таблицы.

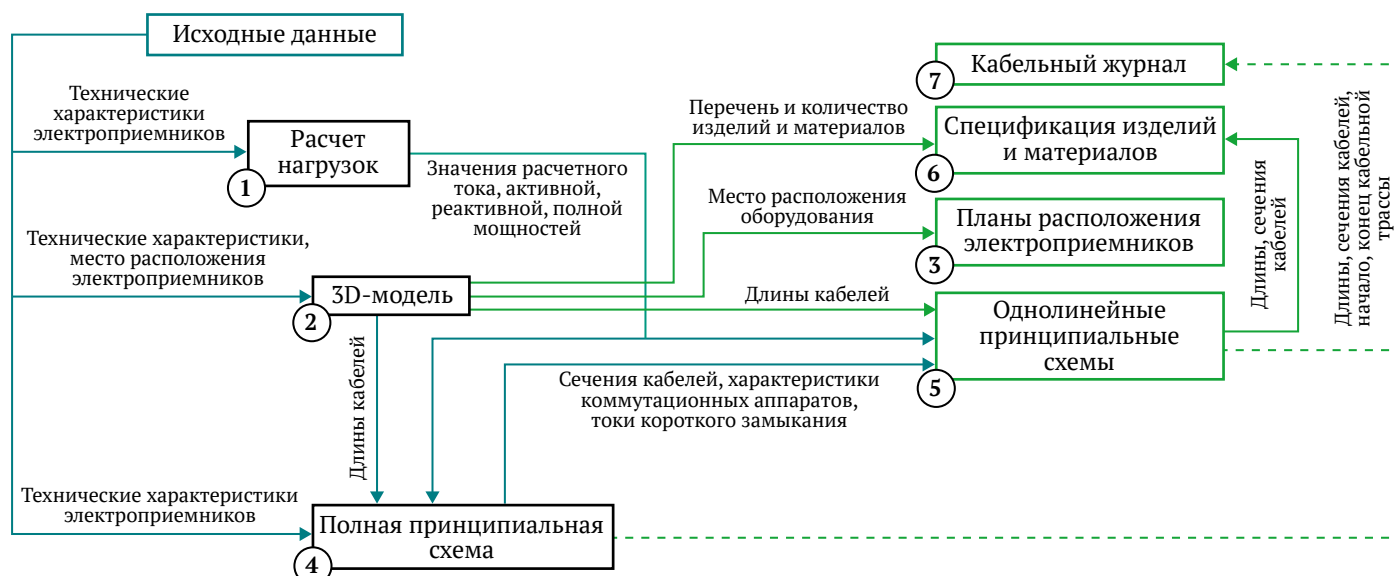


Рис. 1. Структурная схема текущего комплекса проектирования электротехнической части

На этапе 2 с использованием исходных данных потребители вручную добавляются в трехмерную модель производственного комплекса на базе *BIM*-платформы. Затем в модели вручную для каждого электроприемника назначается источник. Траектории кабельных трасс создаются также автоматически, поэтому в некоторых случаях требуют корректировки человеком.

На этапе 3 подготавливаются планы расположения электрооборудования. Это происходит полуавтоматически: человек настраивает секущие диапазоны для отображения каждой части производственного комплекса на отдельном плане.

На этапе 4 исходные данные используются для создания полной принципиальной однолинейной схемы электроснабжения. Схема вручную составляется из отдельных блоков (электроприемников, кабельных линий, секций шин, коммутационных аппаратов и т.д.), записываются технические характеристики приемников, а также длины кабелей, рассчитанные на этапе 2, а коэффициенты подбираются таким образом, чтобы привести расчетные значения в соответствие с расчетом нагрузок, выполненным на этапе 1.

На этапе 5 собираются однолинейные принципиальные схемы для каждого распределительного щита. Длины кабелей от щита до приемника вставляются в схемы автоматически на основе расположения электрооборудования в модели. Также программа осуществляет подбор сечения кабеля и номинального тока автоматических выключателей. К сожалению, многие ПО не отображают для пользователя расчет токов КЗ, из-за чего приходится прибегать либо к иным программам для подбора кабеля и коммутационной аппаратуры, либо выполнять его вручную. В рассматриваемой схеме это происходит на этапе 4. В схемах в ручном режиме прописываются корректные параметры аппаратов, сечения кабелей; для щита добавляются параметры, рассчитанные на этапе 1: значения расчетных активной, реактивной, полной мощностей, расчетного тока, коэффициента мощности, коэффициента использования.

На этапе 6 с помощью встроенных функций *BIM*-платформы подготавливается спецификация изделий и материалов.

На этапе 7 составляется кабельный журнал с помощью *BIM*-платформы.

Таким образом, существующая схема проектирования требует многократного повторения одинаковых монотонных действий по переносу информации из одного ПО в другое и приведению ее в соответствие между ними. Это не только усложняет труд, но и приводит к многочисленным ошибкам, допущенным вследствие неизбежного влияния человеческого фактора.

Очевидно, что организация процесса требует оптимизации. По результатам проведенного анализа можно сделать вывод, что одним из наиболее целесообразных вариантов упрощения процесса будет совмещение этапов 1 и 4 с помощью сторонней программы. Структурная схема процесса проектирования в таком случае примет вид, показанный на рис. 2.

Ключевые изменения:

- исключены этапы 1 и 4 исходной схемы за счет их автоматизации;
- данные передаются между *Excel* и ПО *BIM*-моделирования без ручного вмешательства;
- расчет токов КЗ и подбор оборудования интегрированы в единый алгоритм.

Такое преобразование значительно сократит объем работ, требующих участия человека, упростит процесс проектирования, снизит вероятность появления ошибки при передаче больших объемов данных.

Рассмотрим подробнее технологический процесс, осуществляемый в ПО (рис. 3).

Блок-схема отражает структуру программы для автоматизации расчета электрических нагрузок и подбора оборудования в соответствии с нормативными требованиями. Она объединяет этапы ввода данных, расчета параметров, выбора аппаратуры и формирования отчетности, что соответствует целям НИР: минимизация ручного труда, повышение точности и интеграция с существующими инструментами.

Вводные данные для программы – таблица в формате *Excel*-файла, содержащая данные об электрических параметрах потребителей, источнике питания, длине питающего кабеля, которая автоматически собирается по данным, занесенным в ПО *BIM*-моделирования.

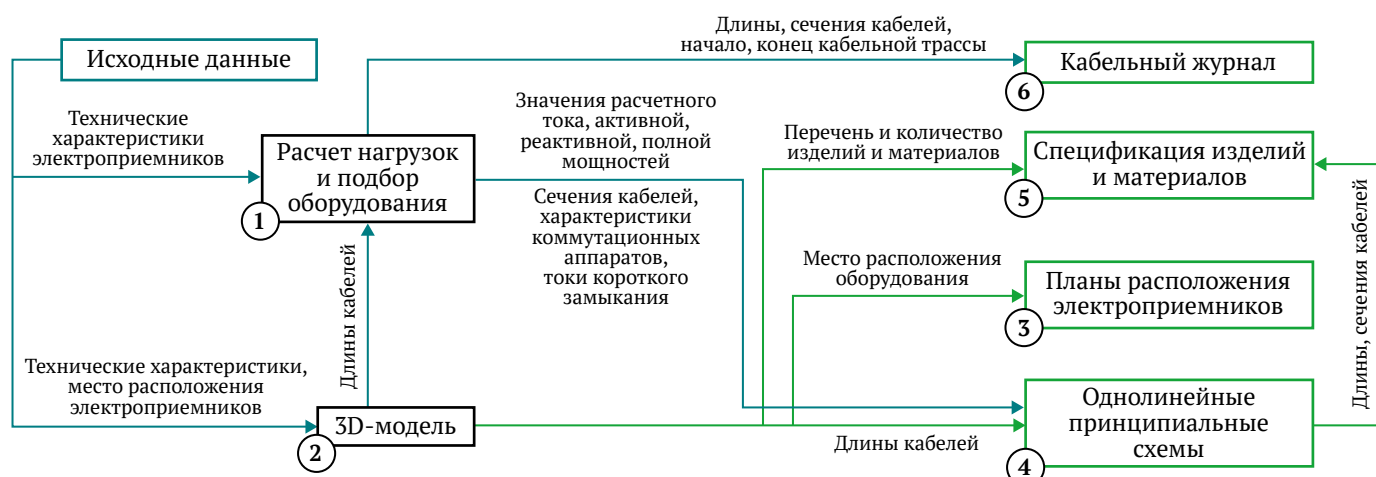


Рис. 2. Структурная схема оптимизированного комплекса проектирования электротехнической части



Далее активируется модуль расчета электрических нагрузок. В нем выполняется расчет по методике, соответствующей нормативу РТМ 36.18.32.4-92, с учетом классификации потребителей (группы электроприемников, РУНН и щиты), расчетных коэффициентов, типов мощностей (активной, реактивной, полной) и токов. На этом же этапе осуществляются расчет мощности компенсирующих устройств и выбор мощности трансформаторов.

Следующий модуль системы отвечает за подбор коммутационной аппаратуры. На основе расчетных данных и токов короткого замыкания (КЗ) программа определяет сечения кабелей по таблицам ПУЭ и производит выбор номинальных параметров защитных устройств. Все расчеты проходят встроенную проверку на соответствие заданным параметрам, после чего формируются выходные данные.

Выходные данные в формате *Excel*-файла: расчет электрических нагрузок по форме Ф636-92; кабельный журнал по ГОСТ 21.613-2014; потребность

кабелей и проводов по ГОСТ 21.613-2014; перечень необходимого электротехнического оборудования с подобранными характеристиками.

Выбор языка программирования C# обусловлен его широкими возможностями для реализации инженерного ПО: развитой поддержкой работы с табличными данными (в частности, *Excel*), удобными средствами построения пользовательских интерфейсов и интеграцией с платформой Windows, являющейся стандартом в инженерной среде. C# обеспечивает надёжность расчётов за счёт строгой типизации и контроля ошибок на этапе компиляции, а также позволяет создавать масштабируемую архитектуру с модульной структурой, необходимую для дальнейшего расширения функционала. Это делает его оптимальным инструментом для разработки цифрового программного обеспечения (ЦПО), предназначенного для автоматизации расчётов и подбора оборудования в проектировании систем электроснабжения.

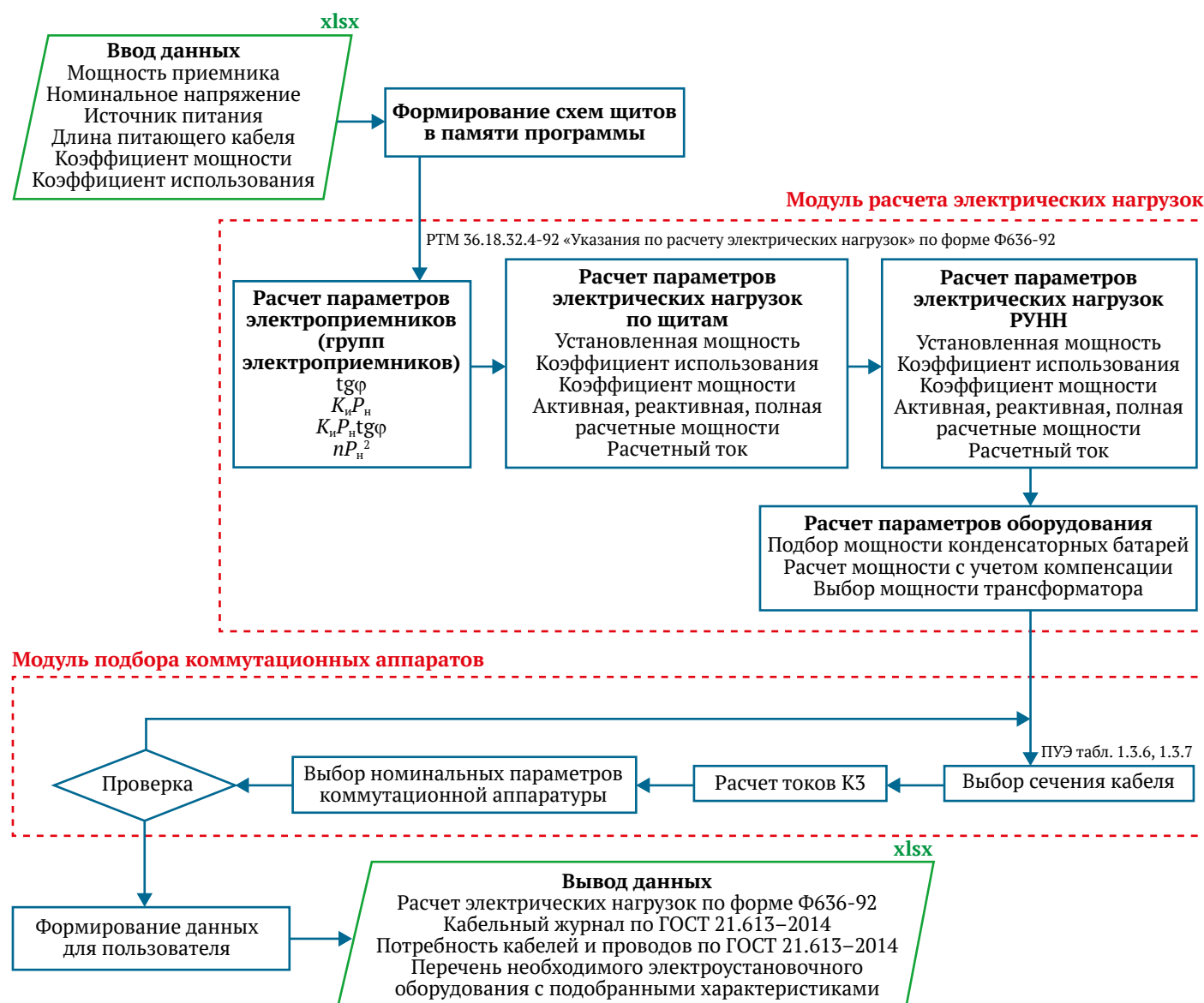


Рис. 3. Обобщённая блок-схема алгоритма расчетной программы



Использование *Excel* и *nanoCAD* в рамках данного проекта обусловлено как технологическими, так и практическими соображениями, связанными с требованиями инженерной среды проектирования и стандартами современной САПР-инфраструктуры. *Excel* выбран в качестве основного инструмента для ввода, хранения и структурирования исходных данных, так как он представляет собой универсальный,

гибкий и общепринятый формат табличной информации, легко адаптируемый к различным этапам проектирования. Благодаря встроенным функциям обработки данных *Excel* позволяет реализовать двустороннюю связь между расчетным модулем и инженерной моделью, исключая необходимость ручного переноса информации и тем самым снижая вероятность ошибок.

Исходные данные								Расчетные величины				Эффек- тивное число ЭП	К _р К _{эфф.} расчетной нагрузки	Расчетная мощность			Расчет- ный ток, А
по заданию технологов					по справочным данным			K _н P _н	K _н P _н tgφ	nP _н ²	n ₃ = (ΣP _н) ² /ΣnP _н ²	активная, кВт		реактив- ная, квар**	полная, кВА		
Наименование ЭП	Обозначение ЭП	Колич. ЭП, шт.* л	Номинальная (установленная) мощность, кВт*		К _{эфф.} исп.-я, K _н	К _{эфф.} реактивной мощности						P _р = K _р ΣK _н P _н		Q _р = 1,1ΣK _н P _н tgφ при n ₃ ≤ 10; Q _р = ΣK _н P _н tgφ при n ₃ > 10	S _р = √P _р ² + Q _р ²	I _р = S _р / (√3U _н)	
1	2	3	4	5		6	7	8	9	10	11		12				13
ТП-1, площадка ЗИФ																	
Участок рудоподготовки ККД																	
Оборудование мобиль- ного комплекса с щеко- вой дробилкой																	
Установка с щековой дробилкой на гусеничном ходу СМС96:	1110-TJC-001																
Колосниковый питатель	1110-GFS-001	1	15	15,00	0,6	0,82	0,70	9,000	6,282	225			9,00	6,28	10,98		
Дробилка щековая	1110-CRJ-001	1	90	90,00	0,6	0,87	0,57	54,000	30,603	8100			54,00	30,60	62,07		
Главный конвейер	1110-CVR-001	1	11	11,00	0,6	0,84	0,65	6,600	4,263	121			6,60	4,26	7,86		
Вытяжной вентилятор	B1	1	0,07	0,07	0,7	0,8	0,75	0,049	0,037	0,0049			0,05	0,04	0,06		
Обогреватель электрический	O1	3	0,80	2,40	0,6	0,95	0,33	1,440	0,473	1,92			1,44	0,47	1,52		
Рабочее место оператора	APM	1	0,75	0,75	1	0,8	0,75	0,750	0,563	0,5625			0,75	0,56	0,94		
Охранный шкаф ККД-ШОС (ШПС-12 исп.12)	ККД-ШОС	1	0,7	0,70	1	1	0,00	0,700	0,000	0,49			0,70	0,00	0,70		
Шкаф серверный ККД ТШ-СС	ККД ТШ-СС	1	3,5	3,50	1	1	0,00	3,500	0,000	12,25			3,50	0,00	3,50		
Участок рудоподготовки СКДР (Оборудование узла загрузки дроблёной руды с подземным тоннелем дробления)																	
Питатель пластинчатый	1120-FDA-001+002	2	15	30,00	0,6	0,82	0,70	18,000	12,564	450			18,00	12,56	21,95		
Железоотделитель	1120-MGT-001	1	4	4,00	0,6	0,82	0,70	2,400	1,675	16			2,40	1,68	2,93		
Металлодетектор	1120-MGT-002	1	0,2	0,20	0,6	0,85	0,62	0,120	0,074	0,04			0,12	0,07	0,14		
Вибропитатель	1120-FDA-003	1	5	5,00	0,1	0,85	0,62	0,500	0,310	25			0,50	0,31	0,59		
Аварийный душ		6	6,5	39,00	0,4	0,9	0,48	15,600	7,555	253,5			15,60	7,56	17,33		
...																	
Участок приготовления известкового молока																	
Емкость приготовления 10%-ного раствора известкового молока	1840-TNK-002 1840-AGI-002	1	22	22,00	0,75	0,83	0,67	16,500	11,088	484			16,50	11,09	19,88		
Насос химический	1840-PUM-004	1	15	15,00	0,75	0,82	0,70	11,250	7,853	225			11,25	7,85	13,72		
Емкость расходная раствора известкового молока	1840-TNK-003 1840-AGI-003	1	32	32,00	0,75	0,85	0,62	24,000	14,874	1024			24,00	14,87	28,24		
Емкость аварийная V=50 м³	1840-TNK-001 1840-AGI-001	1	22	22,00	0,75	0,83	0,67	16,500	11,088	484			16,50	11,09	19,88		
Итого по ТП-1		755	2677	3137	0,68	0,91	0,46	2128	982	280790	35	0,85	1808,85	981,70	2058,08	2970,58	
Итого (с учетом потерь в трансформаторах)																2160,98	3119,10
Коэффициент загрузки трансформатора Кз 1Т1,1Т2 2х2500 кВА																Кз=	0,43
Нагрузки, не учитываемые в расчете																	
Таль электрическая г/п 2 т	1210-HST-002	1	8	8,00	0,3	0,5	1,73	2,400	4,157	64			2,40	4,16	4,80		
Таль электрическая г/п 2 т	1120-HST-001+002	2	5	10,00	0,1	0,85	0,62	1,000	0,620	50			1,00	0,62	1,18		
Насос скруббера	1210-PUM-006	1	30	30,00	0,75	0,85	0,62	22,500	13,944	900			22,50	13,94	26,47		
...																	
Воздушный компрессор	8000-CMP-006	1	315	315,00	0,7	0,95	0,33	220,500	72,475	99225			220,50	72,47	232,11		
Насос питания грохота	1210-PUM-002	1	22	22,00	0,7	0,75	0,88	15,400	13,582	484			15,40	13,58	20,53		
Итого по ТП-1 нагрузки, не учитываемые в расчете																1502,8	
Итого по ТП-1 установленная мощность																4639,6	

Примечания:

* Резервные ЭП, а также ЭП, работающие кратковременно, в расчете не учитываются.

Указания не распространяются на определение электрических нагрузок электроприемников с резкопеременным графиком нагрузки (электроприводов прокатных станков, дуговых электропечей, контактной электросварки и т. п.), промышленного электрического транспорта, жилых и общественных зданий, а также электроприемников, с известным графиком нагрузки.

Рис. 4. Фрагмент расчета электрических нагрузок ТП-1



Программное обеспечение *napoCAD* используется в качестве среды ВМ-моделирования, что соответствует требованиям современных проектных организаций и позволяет поддерживать сквозную информационную модель здания или производственного объекта. Выбор *софта* обоснован его возможностью хранения геометрической и параметрической информации об оборудовании, пространственном расположении кабельных трасс и точках подключения, что делает его незаменимым при комплексном проектировании электрических сетей в рамках общей строительной модели. Кроме того, наличие открытого *API* дает возможность интеграции с внешними расчетными алгоритмами и позволяет автоматизировать процессы, связанные с трассировкой кабелей, генерацией спецификаций и формированием схем. Таким образом, связка *Excel* и *napoCAD* обеспечивает эффективное сопряжение между расчетной и графической частью проекта, позволяет сократить количество рутинных операций, повысить точность инженерных решений и обеспечить соответствие требованиям нормативной документации.

Таким образом, представленное ЦПО демонстрирует целостный алгоритм проектирования, охватывающий все ключевые этапы от ввода данных до получения расчетных и технических характеристик

оборудования. Оно обеспечивает автоматизацию рутинных операций, снижает влияние человеческого фактора и обеспечивает соответствие требованиям нормативных документов. Внедрение данной схемы в программный комплекс существенно упрощает процесс проектирования электрических сетей, повышая его точность, надежность и скорость.

Практическая реализация на примере проекта электроснабжения золотоизвлекающей фабрики

Рассмотрим практическую реализацию проекта на примере проекта электроснабжения золотоизвлекающей фабрики (ЗИФ) «Кумроч». Основным источником электроснабжения для объектов ЗИФ является автономная дизельная теплоэлектростанция (АТЭС) контейнерно-модульного исполнения напряжением 6,3 кВ с системами утилизации, рекуперации тепла.

ЦПО получает данные о сформированных цепях из 3D-модели и формирует таблицы расчета нагрузок для каждого распределительного пункта на каждом из уровней. Фрагмент таблицы расчета электрических нагрузок для одной из трансформаторных подстанций приведен на рис. 4.

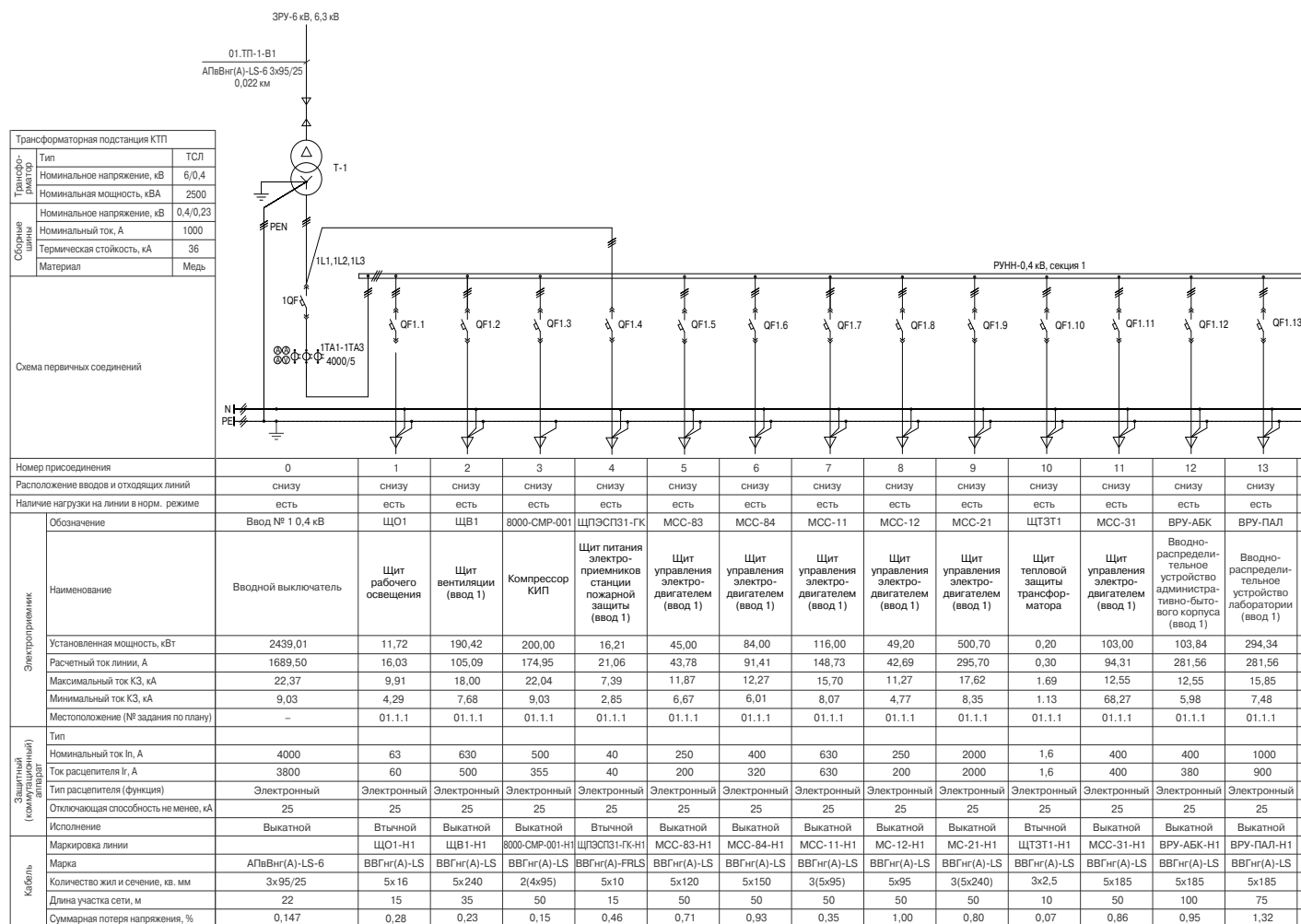


Рис. 5. Фрагмент электрической принципиальной однолинейной схемы ТП-1



Расчет ведется согласно руководящему техническому материалу «Указания по расчету электрических нагрузок» РТМ 36.18.32.4-92 [18], а его результаты оформляются по установленной форме Ф636-92³.

После формирования расчета нагрузок ЦПО одновременно ведет расчет токов коротких замыканий на всех уровнях системы электроснабжения и подбирает параметры кабельных линий и коммутационной аппаратуры с учетом селективности. Такой метод обеспечивает точность и высокую скорость вычислений. Результаты вычислений ЦПО сводятся в таблицу, удобную для дальнейшей работы проектировщика. Используя рассчитанные с помощью ЦПО параметры, пользователь может легко подобрать оборудование выбранного производителя. Фрагмент результатов подбора оборудования приведен на принципиальной схеме (рис. 5).

Поскольку расчет в программе происходит автоматически и практически не требует дополнительных действий от проектировщика, при необходимости возможно с минимальными трудозатратами многократно обновлять его результаты в случае корректировки исходных данных. Это повышает гибкость процесса проектирования и адаптирует ЦПО к условиям постоянных изменений компонентов системы в течение проработки решений по электроснабжению.

Основываясь на результатах расчета системы электроснабжения ЗИФ «Кумроч», в работе [20] авторы привели оценку эффективности возможного применения альтернативных источников питания в системах автономного электроснабжения [21].

Выводы

Цифровое программное обеспечение позволяет в значительной степени сократить количество этапов ручного переноса данных (до 80 %), не привязывает пользователя к необходимости выбора оборудования

из ограниченных каталогов (библиотек), требует минимального вмешательства в процесс со стороны человека, для работы в программе пользователь практически не нуждается в отдельном обучении.

ЦПО автоматизирует процесс проектирования систем электроснабжения (упрощает и ускоряет процесс работы), сводит к минимуму вероятность ошибки ввиду человеческого фактора, повышает точность расчетов. Это – необходимые условия для компании (проектного института), которая хочет сохранять востребованность у клиентов, поддерживать конкурентоспособность и соответствовать уровню развития технологий.

Данное ЦПО имеет преимущество перед существующими программными комплексами, поскольку за счет удобного формата вводных и выводных данных в виде таблиц в формате *Excel* минимизирует необходимость переноса данных вручную. Это, в свою очередь, упрощает, ускоряет работу и повышает точность выполняемых расчетов.

В отличие от похожих программ считывание данных автоматизировано, ЦПО подразумевает минимальное вмешательство со стороны человека, что избавляет от необходимости дополнительного обучения по работе с программой, а также активного технического обслуживания и консультаций.

Также в сравнении с аналогами разрабатываемое ЦПО не привязано к производителю электрооборудования, поэтому предоставляет пользователю данные для подбора оборудования, оставляя право выбора бренда за проектировщиком или заказчиком.

Решение обладает значительным потенциалом для внедрения в проектных организациях, так как соответствует стратегии цифровизации энергетики и отвечает потребностям рынка в гибких, независимых и масштабируемых инструментах проектирования.

Перспективы развития связаны с интеграцией искусственного интеллекта для автоматической корректировки проектов в реальном времени и возможностью подключения расчетов для альтернативных источников энергии.

³ Табл. 4. Руководящий технический материал «Указания по расчету электрических нагрузок» от 30.07.1992 № РТМ 36.18.32.4-92. ВНИПИ ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ; 1992.

Список литературы / References

1. Пичуев А.В., Петуров В.И., Суворов И.Ф. Влияние нестационарных режимов на электробезопасность при эксплуатации электрооборудования горных предприятий. Монография. М.: Горная книга; 2011. 326 с.
Pichuev A. V., Peturov V. I., Suvorov I. F. *Impact of non-stationary modes on electrical safety during the operation of mining enterprises' electrical equipment*. Monograph. Moscow: Gornaya Kniga; 2011. 326 p. (In Russ.)
2. Ключев Р.В. Разработки методики расчета качаний в электрической системе. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(3):1205–1213. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1205-1213>
Klyuev R. V. Development of a methodology for calculating swings in an electrical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):1205–1213. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1205-1213>
3. Петров В.Л., Пичуев А.В. Оценка эффективности средств повышения качества электроэнергии в системе частотно-регулируемого электропривода скребковых конвейеров. *Горные науки и технологии*. 2024;9(1):60–69. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-198>
Petrov V. L., Pichuev A. V. Assessing the efficiency of measures to enhance electric power quality in variable-frequency drive for scraper conveyors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(1):60–69. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-198>



4. Ключев Р.В. Обоснование решений по совершенствованию вентиляторных установок и подъемных машин на основе оценки энергоэффективности их работы в условиях реконструкции рудника «Молибден». *Горные науки и технологии*. 2025;10(1):84–94. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-362>
Klyuev R.V. Assessment of energy efficiency improvement strategies for ventilation and hoisting systems during the reconstruction of the Molibden mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):84–94. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-362>
5. Шеметов А.Н., Ильина Е.А., Кондрашова Ю.Н. Обработка информации в системе автоматизированного проектирования электроснабжения жилого микрорайона для определения электрических нагрузок. *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*. 2021;9(2):29–37. <https://doi.org/10.18503/2306-2053-2021-9-2-29-38>
Shemetov A.N., Ilina E.A., Kondrashova Yu.N. Information processing in the automated power supply system of a residential microdistrict for determining electric loads. *Software of Systems in the Industrial and Social Fields*. 2021;9(2):29–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/2306-2053-2021-9-2-29-38>
6. Степанов В.М., Косырихин В.С. Применение программно-методического комплекса для расчёта и проектирования электроснабжения. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018;(12):180–186.
Stepanov V.M., Kosyrikhin V.S. Application of the program-methodical complex for calculation and design of electrical supply. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2018;(12):180–186. (In Russ.)
7. Ляшан И.К., Парфенов Я.А., Голованова К.А. Проектирование схемы внутреннего электроснабжения. *Вестник науки*. 2024;3(3):614–622.
Lyashan I.K., Parfenov Ya.A., Golovanova K.A. Design of internal power supply scheme. *Vestnik Nauki*. 2024;3(3):614–622. (In Russ.)
8. Дмитриев А.А., Герасимов В.Е., Плосков А.Н. Применение современных программных возможностей в процессе проектирования систем электроснабжения. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2019;15(1):20–25. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-1-20-25>
Dmitriev A.A., Gerasimov V.E., Ploskov A.N. Application of modern software capabilities in the design of power supply systems. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2019;15(1):20–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-1-20-25>
9. Ключкова Н.Н., Обухова А.В. Автоматизация проектирования систем электроснабжения 6–10 кВ промышленных объектов. *Научный альманах*. 2024;(7–2):49–51.
Klochkova N.N., Obukhova A.V. Automation of design of 6–10 kV power supply systems for industrial facilities. *Nauchnyi Almanakh*. 2024;(7–2):49–51. (In Russ.)
10. Баширов М.Г., Юсупова И.Г., Биткулов Р.Д. Способ разработки программно-вычислительных комплексов для проектирования систем электроснабжения. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2021;13(1):37–51.
Bashirov M., Yusupova I., Bitkulov R. Comparative analysis of software and computing systems for the design of power supply systems. *Vestnik of Kazan State Power Engineering University*. 2021;13(1):37–51. (In Russ.)
11. Трунов С.С., Крупнов А.В. Оптимальное проектирование систем электроснабжения на ЭВМ с учетом критериев надежности и экономичности. *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии*. 2024;(1):57–74. <https://doi.org/10.46573/2658-7459-2024-1-57-74>
Trunov S.S., Krupnov A.V. CAD with independent design of power supply systems, taking into account the criteria of reliability and efficiency. *Vestnik of Tver State Technical University. Series "Building. Electrical Engineering and Chemical Technology"*. 2024;(1):57–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.46573/2658-7459-2024-1-57-74>
12. Анищенко В.А., Кирспу А.Ю. Учет неопределенности исходной информации при проектировании систем электроснабжения. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. 2005;(3):25–29.
Anishchenko V.A., Kirspu A.Yu. Accounting for the uncertainty of initial information in the design of power supply systems. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo*. 2005;(3):25–29. (In Russ.)
13. Федоса Д.В. Оптимальное проектирование систем электроснабжения. *Электротехника и электроэнергетика*. 2012;(1):57–61.
Fedosha D.V. Optimal design of power system. *Elektrotehnika i Elektroenergetika*. 2012;(1):57–61. (In Russ.)
14. Степанов В.М., Косырихин В.С. Методология расчёта и проектирования электрических сетей системы промышленного электроснабжения. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2014;(8):215–222.
Stepanov V.M., Kosyrikhin V.S. Methodology of calculation and design of electric networks of system of industrial power supply. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2014;(8):215–222. (In Russ.)
15. Romanova V.V. The program for determining the optimal location for installation of symmetry facilities in 0.4 kV power supply systems with a motor-drive load. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2020;13(5):643–651. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0253>



16. Яковкина Т.Н., Стародубцев А.А., Чеховский С.Н. Проектирование системы электроснабжения отдела разложения сульфатного мыла филиала АО «Группа «ИЛИМ» в г. Братске. *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки*. 2018;2:68–72.
Yakovkina T.N., Starodubtsev A.A., Chekhovskiy S.N. Designing the power supply system for the sulfate soap decomposition department of the “ILIM” Group Branch in Bratsk. *Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*. 2018;2:68–72. (In Russ.)
17. Добродей А.О., Воронович А.А. Автоматизация расчетов при проектировании систем электроснабжения жилых домов. *Агротехника и энергообеспечение*. 2018;(1):35–46.
Dobrodey A.O., Voronovich A.A. Automation of calculations in the designing of power supply systems of residential buildings. *Agrotekhnika i Energoobespechenie*. 2018;(1):35–46. (In Russ.)
18. Савчук И.В., Смолин Н.И., Серов А.И. Автоматизация расчетов токов короткого замыкания и потерь напряжения в системах электроснабжения и интеграция в CAD систему. *АгроЭкоИнфо*. 2023;(5). <https://doi.org/10.51419/202135539>
Savchuk I.V., Smolin N.I., Serov A.I. Automation of short-circuit current and voltage loss calculations in power supply systems and integration into a CAD system. *AgroEkoInfo*. 2023;(5). (In Russ.) <https://doi.org/10.51419/202135539>
19. Волков Н.А. Внедрение БИМ-технологий в процесс проектирования сетей электроснабжения. *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. 2024;2:19–23.
Volkov N.A. The introduction of BIM technologies in the process of designing power supply networks. *Scientificallly Technical and Economical Cooperation in Asia-Pacific Countries in the 21st Century*. 2024;2:19–23. (In Russ.)
20. Пичуев А.В., Грибкова О.С., Бурматова Е.К. Оценка энергоэффективности применения альтернативных источников питания в системах автономного электроснабжения горно-обогатительных комбинатов. *Энергобезопасность и энергоснабжение*. 2024;(4):43–49.
Pichuev A.V., Gribkova O.S., Burmatova E.K. Assessment of energy efficiency of alternative power sources in independent power supply systems of mining and processing plants. *Energy Safety and Energy Economy*. 2024;(4):43–49. (In Russ.)
21. Софронов М.А., Петров В.Л. Перспективы применения солнечных электростанций в системах электроснабжения горных предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(10):152–165. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_10_0_152
Sofronov M.A., Petrov V.L. Prospects for solar power plants in electricity supply systems in mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(10):152–165. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_10_0_152

Информация об авторах

Вадим Леонидович Петров – доктор технических наук, проректор, профессор кафедры энергетики и энергоэффективности горной промышленности, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-6474-5349](https://orcid.org/0000-0002-6474-5349), Scopus ID [8919065900](https://scopus.com/authorid/8919065900), ResearcherID [P-9984-2015](https://orcid.org/P-9984-2015); e-mail petrovv@misis.ru

Елизавета Константиновна Бурматова – инженер-проектировщик электротехнического отдела, ООО «Промстрой Инжиниринг», г. Москва, Российская Федерация; e-mail burmatova.elz@gmail.com

Александр Вадимович Пичуев – доктор технических наук, профессор кафедры энергетики и энергоэффективности горной промышленности, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7457-5702](https://orcid.org/0000-0001-7457-5702), Scopus ID [57209798580](https://scopus.com/authorid/57209798580); e-mail allexstone@mail.ru

Information about the authors

Vadim L. Petrov – Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector, Professor of the Department of Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-6474-5349](https://orcid.org/0000-0002-6474-5349), Scopus ID [8919065900](https://scopus.com/authorid/8919065900), ResearcherID [P-9984-2015](https://orcid.org/P-9984-2015); e-mail petrovv@misis.ru

Elizaveta K. Burmatova – Design Engineer of the Electrical Engineering Department, Promstroy Engineering LLC, Moscow, Russian Federation; e-mail: burmatova.elz@gmail.com

Alexander V. Pichuev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7457-5702](https://orcid.org/0000-0001-7457-5702), Scopus ID [57209798580](https://scopus.com/authorid/57209798580); e-mail allexstone@mail.ru

Поступила в редакцию

02.09.2025

Received

02.09.2025

Поступила после рецензирования

11.10.2025

Revised

11.10.2025

Принята к публикации

17.10.2025

Accepted

17.10.2025