eISSN 2500-0632

МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ

Mining Science and Technology

Горные науки и технологии

Vol. Том 10 № 3
2025

https://mst.misis.ru/

https://t.me/MinSciTech

Photo by Mooz L. on Unsplash

ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Mining Science and Technology (Russia)

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

eISSN 2500-0632

2025 Т. 10, № 3

https://mst.misis.ru/

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

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

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

Эпштейн Светлана Абрамовна, д.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Морозов Валерий Валентинович, проф., д.т.н., Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

Разоренов Юрий Иванович, проф., д.т.н., 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, ВИНИТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

OPEN ACCESS Журнал открытого доступа.

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

МИСИС Университет науки и технологий МИСИС

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ

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

КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4
Телефон: +7 (495) 955-00-77
e-mail: send@misis.ru

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

eISSN 2500-0632
2025
Vol. 10, no. 3
https://mst.misis.ru/

Activities of the *Mining Science and Technology (Russia) (Gornye nauki i tekhnologii)* international journal are aimed at developing international scientific and professional cooperation in the field of mining.
The journal target audience comprises researchers, specialists in the field of mining, representatives of academic and professional communities.
The journal publishes original papers describing research findings, experience in the implementation of projects in mining industry, review publications.
The journal seeks to develop interdisciplinary areas that contribute to progress in mining, for example, technological and environmental safety, project organization and management in mining industry, development of territories, legal aspects of natural resource use, and other areas studied by researchers and practitioners. The journal always welcomes new developments. Papers are accepted in English or Russian.

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF
Oleg I. Kazanin, Prof., Dr.Sci.(Eng.), 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., Colledge of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
Mikhail S. Ershov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation
Alexandr N. Evdokimov, Dr.Sci. (Geol. and Min.), Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation
Akper A. Feyzullaev, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Institute of Geology and Geophysics of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan
Ochir Gerel, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Geoscience Center, the Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia
Zoran Gligorić, Prof., Dr.Sci. (Mining-Underground Mining), University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia
Monika Hardygora, Prof., Ph.D., Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland
Nikolae Ilias, Prof., Dr.Sci.(Eng.), University of Petrosani, Petrosani, Romania
Vladislav Kecojevic, Prof., Ph.D., Benjamin M. Statler College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA
Aleksey A. Khoreshok, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation
Vladimir I. Klishin, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Institute of Coal, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation
Vladimir N. Koshelev, Prof., Dr.Sci.(Chem.), National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Gubkin University), Moscow, Russian Federation
Jyant Kumar, Prof., Ph.D-Geotech.Eng., Indian Institute of Science, Bengaluru, India
Vladimir A. Makarov, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation
Sergey I. Malafeev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia
Oleg S. Misnikov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Tver State Technical University, Tver, Russian Federation
Valery V. Morozov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
Igor M. Petrov, Dr.Sci.(Eng.), Infomine Research Group LLC, Moscow, Russian Federation
Bakhadirzhan R. Raimzhanov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), University of Science and Technology MISIS (branch), Almalyk, Uzbekistan
Bayan R. Rakishev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Alma-Ata, Kazakhstan
Oscar Jaime Restrepo Baena, Prof., Ph.D., National University of Colombia, Medellín, Colombia
Alexander N. Shashenko, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National Mining University, Dnipro, Ukraine
Vadim P. Tarasov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
Denis P. Tibilov, Prof., Dr.Sci.(Econ.), Moscow State Institute of International Affairs (University) under the Ministry of Foreign Affairs of Russia, Moscow, Russian Federation
Niyaz G. Valiev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), The Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation
Natalia Zhuravleva, Prof., Dr.Sci.(Eng.), West Siberian Testing Center JSC (WSTCenter JSC), Novokuznetsk, Russian Federation
Vera V. Yurak, Assoc. Prof., Dr. Sci. (Econ.), Ural State Mining University, Yekaterinburg; Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

EDITORIAL COUNCIL
Yuri G. Agafonov, Assoc. Prof., Cand.Sci.(Eng.), University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
Michael R. Filonov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
Leonid A. Plaschansky, Prof., Cand.Sci.(Eng.), University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
Yuri I. Razorenov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

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

QUARTERLY

FOUNDED in 2016

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

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

FOUNDER AND PUBLISHER
MISIS UNIVERSITY
University of Science and Technology MISIS

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

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

ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ
Mining Science and Technology (Russia)
ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
eISSN 2500-0632
2025
Т. 10, № 3
https://mst.misis.ru/

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Изменение содержания полезных компонентов в приконтактной зоне некондиционных руд 205
Б.Р. Ракишев, А.И. Едильбаев, А.А. Орынбай, Т.С. Ибырханов

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Статистический анализ определения коэффициентов пористости пород-коллекторов нефти и газа методами газоволюметрии и рентгеновской томографии 221
В.И. Галкин, О.А. Мелкишев, Я.В. Савицкий

От визуальной диагностики к глубокому обучению: автоматическое определение минералов на фотографиях аншлифов 232
Д.М. Коршунов, А.В. Хвостиков, Г.В. Николаев, Д.В. Сорокин, О.И. Индычко, М.А. Богуславский, А.С. Крылов

Анализ цифровой модели рельефа для решения геологических задач на примере Актогайского рудного поля 245
Н. Сайб, Ю. Белов, Н. Зимановская, Г. Оразбекова, А. Третьякова, А. Муратова, И. Касенов

Геологические и изотопные оценки условий образования медных руд в районе Та Фой, провинция Лао Кай, северо-западный Вьетнам 262
Х.Т. Хунг, Н.С. Дак

ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Применение полистиролсульфонатов для депрессии магнийсодержащих силикатов при флотации медно-никелевых руд 280
А.А. Лавриненко, Г.Ю. Гольберг, И.Н. Кузнецова, О.Г. Лусинян, В.А. Тверской

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Исследование надежности шахтных вентиляторов на основе теории марковских процессов 289
П.В. Вяткин, Н.Г. Валиев, Д.И. Симисинов, Е.Б. Волков

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Цифровые двойники и цифровые технологии: особенности и перспективы в угольной отрасли 298
С.М. Никитенко, Е.В. Гоосен, А.А. Рожков, М.К. Королев

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Оценка горных компаний с проектами на стадии оцененных ресурсов и запасов до этапа строительства предприятия и добычи 306
А.Н. Лопатников, А.Ю. Румянцев

MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (Russia)
Горные науки и технологии
SCIENTIFIC AND PRACTICAL E-JOURNAL
eISSN 2500-0632
2025
Vol. 10, no. 3
https://mst.misis.ru/

CONTENTS

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Variation of ore grades in the boundary zone of subeconomic ore 205
B.R. Rakishev, A.I. Edil'baev, A.A. Orynbay, T.S. Ibyrkhanov

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Statistical analysis of determining porosity factor of oil and gas reservoir rocks using gas volumetry and X-Ray tomography methods 221
V.I. Galkin, O.A. Melkishev, Ya.V. Savitsky

From visual diagnostics to deep learning: automatic mineral identification in polished section images 232
D.M. Korshunov, A.V. Khvostikov, G.V. Nikolaev, D.V. Sorokin, O.I. Indychko, M.A. Boguslavsky, A.S. Krylov

Analysis of a digital terrain model for solving geological problems by the example of Aktogai ore field 245
N. Seib, Yu. Belov, N. Zimanovskaya, G. Orazbekova, A. Tretyakova, A. Muratova, I. Kasenov

Geological and isotopic constraints on the copper ore formation in Ta Phoi area, Lao Cai province, Northwestern Vietnam 262
K.T. Hung, N.X. Dac

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Application of polystyrene sulfonates for the depression of magnesium-containing silicates in copper-nickel ore flotation 280
A.A. Lavrinenko, G.Yu. Golberg, I.N. Kuznetsova, O.G. Lusinyan, V.A. Tverskoy

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Reliability analysis of mine ventilation fans based on Markov process theory 289
P.V. Vyatkin, N.G. Valiev, D.I. Simisinov, E.B. Volkov

DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Digital twins and digital technologies: specific features and prospects in the coal industry 298
S.M. Nikitenko, E.V. Goosen, A.A. Rozhkov, M.K. Korolev

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Valuation of non-producing mining companies 306
A.N. Lopatnikov, A.Y. Rumyantsev

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-395
УДК 622.342

Изменение содержания полезных компонентов в приконтактной зоне некондиционных руд

Б.Р. Ракишев[1], А.И. Едильбаев[2], А.А. Орынбай[1,3]✉, Т.С. Ибырханов[1]

[1] *Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан*

[2] *ТОО «Горное бюро», г. Алматы, Республика Казахстан*

[3] *Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан*

✉ *a.orynbay@aues.kz*

Аннотация

Месторождения руд цветных, благородных и редких металлов в основном являются сложноструктурными. Эти блоки состоят из балансовых (кондиционных) и небалансовых (некондиционных) руд в формате уступов. Границы между двумя типами руд устанавливаются некоторым предельным значением полезного компонента (ПК) в руде. Численное значение содержания ПК в некондиционной части блока предопределяет слой возможного примешивания некоторой доли забалансовых руд к отгружаемым кондиционным рудам. Примешиванием можно достигнуть полного извлечения полезных ископаемых из забоев и получения концентрата требуемого качества. В этих целях были проанализированы данные по разведочным скважинам пяти меднорудных и золоторудных месторождений Казахстана со сложно-структурным строением. По данным разведочных скважин определены уравнения трендов изменения содержания руды в некондиционной части блока. Разработана программа для автоматизации расчета линий трендов и их уравнений. С ее использованием получены новые зависимости для определения содержания ПК в отгружаемой руде α′. В горной науке впервые обоснован новый метод полного извлечения кондиционных руд из сложноструктурных блоков уступов, основанный на примешивании определенного объема некондиционных руд. Такой подход способствует увеличению общего объема извлекаемой руды и повышению выхода полезных компонентов в концентрат. Прирост извлеченных компонентов из отгружаемой руды может достигать 10–15 % от общего объема производства.

Ключевые слова

сложноструктурные блоки уступов, содержание полезных компонентов, кондиционные руды, некондиционные руды, примешиваемые слои некондиционных руд, линия тренда, полное извлечение руд, Казахстан

Финансирование

Статья подготовлена в рамках проекта, финансируемого министерством науки и высшего образования Республики Казахстан 2023/AP19676591 «Разработка инновационных технологий полного извлечения разрозненных кондиционных руд из сложноструктурных блоков уступов».

Для цитирования

Rakishev B.R., Edil'baev A.I., Orynbay A.A., Ibyrkhanov T.S. Variation of ore grades in the boundary zone of subeconomic ore. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(4):205–220. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-395

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research paper

Variation of ore grades in the boundary zone of subeconomic ore

B.R. Rakishev[1], A.I. Edil'baev[2], A.A. Orynbay[1,3]✉, T.S. Ibyrkhanov[1]

[1] *Satbayev University (Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev), Almaty, Republic of Kazakhstan*

[2] *Mining Bureau LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan*

[3] *Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan*

✉ *a.orynbay@aues.kz*

Abstract

Deposits of non-ferrous, precious, and rare metals are predominantly complex-structured. Such bench blocks consist of economic and subeconomic ore. The boundary between the two types is defined by a cut-off ore grade. The numerical value of the ore grade in the subeconomic portion of a block determines the thickness of material that can potentially be admixed with shipped economic ore. Controlled admixing enables complete recovery of minerals from stopes while maintaining concentrate quality. For this purpose, exploration borehole data from five copper and gold deposits in Kazakhstan with complex structures were analyzed. Based

© Ракишев Б. Р., Едильбаев А. И., Орынбай А. А., Ибырханов Т. С., 2025

on borehole data, trend equations were derived to describe ore grade variation in the subeconomic part of a block. A software tool was developed to automate the calculation of trend lines and their equations. Using this program, new dependencies were obtained for determining the ore grade in the shipped ore (α′). For the first time in mining science, a method has been substantiated for the complete recovery of economic ore from complex-structured bench blocks, based on admixing a controlled portion of subeconomic ore. This approach increases total ore extraction and improves valuable component recovery to concentrate. The potential increase in recovered components from shipped ore may reach 10–15% of total production.

Keywords
complex-structured bench blocks, ore grade, economic ore, subeconomic ore, admixed subeconomic ore layers, trend line, complete ore recovery, Kazakhstan

Financing
This article was prepared as part of the project funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, 2023/AP19676591: Development of innovative technologies for the complete extraction of disparate conditioned ores from complex blocks of ledges.

For citation
Rakishev B.R., Edil'baev A.I., Orynbay A.A., Ibyrkhanov T.S. Variation of ore grades in the boundary zone of subeconomic ore. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(4):205–220. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-395

Введение

Подавляющее большинство месторождений руд цветных, благородных и редких металлов на территории Казахстана, равно как и в других регионах мира, обладают сложной структурной организацией [1–3]. Данные месторождения отличаются целым комплексом характерных особенностей, включающих: разнообразие форм рудных тел, значительную вариативность их геометрических параметров, сложное пространственное распределение в пределах разрабатываемого массива, неоднородность распределения полезных компонентов, а также существенные различия физико-механических характеристик вмещающих пород [4–6]. Совокупность перечисленных геологических факторов определяет уровень сложности строения участков месторождений с неоднородной структурой [7, 8]. Следует отметить, что доля таких месторождений в общем объеме добычи цветных металлов в странах СНГ достигает 60–90 %, при этом технологически неизбежные эксплуатационные потери рудной массы могут составлять от 20 до 35 % от общего объема добычи [6, 9, 10].

Проведенный анализ показывает, что основными факторами, приводящими к повышенным показателям потерь и разубоживания руды при открытой разработке сложноструктурных месторождений, выступают:

– недостаточная степень изученности геолого-морфологических особенностей строения структурно-неоднородных блоков уступов;

– несоответствие применяемых технологических решений для выемочно-погрузочных операций реальным горно-геологическим условиям залегания полезных ископаемых как в естественном залегании, так и после проведения буровзрывных и горных работ.

Решение указанных проблем требует разработки принципиально новых методик оценки содержания полезных компонентов в пограничных зонах между кондиционными и некондиционными рудами. Внедрение таких инновационных подходов позволит существенно повысить точность оценки количественных и качественных характеристик добываемого минерального сырья, а также обеспечит эффективный контроль за потерями и разубоживанием руды. Данное направление исследований представляет особую актуальность для современной горнодобывающей промышленности, однако, как показывает анализ предшествующих исследований в этой области, в существующих научных работах эта проблематика освещена недостаточно полно.

Комплексное решение рассматриваемой проблемы требует применения системного подхода, объединяющего:

– современные цифровые технологии и информационные системы;

– традиционные методы оценки качества рудного сырья;

– достоверные данные о геологическом строении и морфологических особенностях месторождений.

Только такой интеграционный подход может обеспечить необходимую точность оценки качества добываемых полезных ископаемых на всех стадиях разработки месторождения.

Как видно из работ [6, 9], совокупность горнотехнических факторов геологического строения, структуры и минерального состава месторождения влияет на выбор не только способа отработки месторождения, но и технологии рудоподготовки и обогащения добываемого сырья. Потери и разубоживание при добыче ПИ, являющиеся основными негативными факторами снижения качества добываемой руды, сильно зависят от корректировки методики эксплуатационного опробования, предварительного оконтуривания рудных тел, соблюдения границ при очистных работах [10]. Кроме того, выявление типов сложноструктурных блоков, определение коэффициента рудонасыщенности и показатель сложности геологического строения являются объективными критериями при оценке полноты добычи [11]. А для обоснования полного извлечения руд из сложноструктурных блоков уступов предложены аналитические зависимости определения содержания полезного компонента в отгружаемой руде α′ [12]. При этом необходимо акцентировать внимание на задачах оценки и регулирования отработки приконтактных зон, анализе влияния сложности контуров рудных тел, а также оценке геометрии этих зон [13].

Как было обосновано ранее, наиболее эффективное решение рассматриваемой проблемы требует комплексного сочетания традиционных методов исследования с передовыми цифровыми технологиями. В последние годы в специализированных научных исследованиях все чаще применяется компьютерное моделирование геологического строения месторождений и пространственного распределения рудных тел. Данный процесс осуществляется с использованием современных горно-геологических информационных систем (ГГИС), представляющих собой специализированное программное обеспечение для трехмерного моделирования и анализа месторождений.

Особого внимания заслуживают исследования, в которых на основе применения указанных ГГИС были разработаны и успешно апробированы инновационные методики оценки качественных характеристик полезных ископаемых. В частности, в работе [5] подробно описаны результаты использования технологий блочного моделирования, которые позволяют с высокой точностью определять пространственное распределение полезных компонентов в рудном теле. Такой подход обеспечивает принципиально новые возможности для анализа морфологических особенностей месторождений и прогнозирования качественных показателей добываемого сырья. Представленная методика блочного моделирования позволяет с высокой достоверностью районировать в карьерном пространстве технологические типы и сорта руд. Также представлена методика геометризации качественных параметров титаномагнетитовых месторождений для построения каркасных моделей рудных тел в замкнутых контурах горных выработок с целью выделения технологических типов полезного ископаемого [14]. Кроме того, продемонстрировано, что компоновка геологических доменов со сложной морфологией различных видов полезных ископаемых и количественная оценка неопределенности, связанной с ней, могут быть осуществлены с помощью геостатистического моделирования [15]. Методы определения границ различных пород на их основе могут быть применены для совершенствования и расширения методики прогнозирования содержания руды в приграничных зонах рудных тел. В более ранних исследованиях предлагается также нейросетевой метод выделения границ литологических разностей для 3D-моделирования рудных тел и вмещающих пород, позволяющий повысить качество и скорость обработки геологической информации на всех этапах освоения месторождений [16]. Однако современные компьютерные модели рудных тел, имеющие очевидные положительные и полезные качества, тем не менее имеют ограничения и недостатки [17]. В частности, блочные модели имеют ограничения при оконтуривании рудных тел и зачастую недостаточно точно выделяют границы балансовых и забалансовых руд.

Применение ГГИС не ограничивается лишь моделированием рудных тел и месторождения в целом, оно является неотъемлемой частью при управлении качеством рудопотоков и процессов контроля. В работах [18, 19] отмечается важность получения информации и прогнозирования содержания руды в разных частях добываемого блока уступа для управления качеством рудопотока, основанного на сочетании разделительного и усреднительного принципов. Это позволило формировать стабильный состав и оптимальные параметры рудной массы, поступающей на обогащение бедных апатит-нефелиновых [18], медно-порфировой руд [19]. Показано, что определение содержания руды на границе и за пределами оконтуренных рудных тел является важной задачей, предопределяющей количество и качество отгружаемой рудной массы. Для повышения эффективности горно-обогатительного комплекса необходимо автоматизированное сопряжение циклов добычи и обогащения с внедрением информационных систем, ориентированных на решение задач – от прогнозирования содержания полезных компонентов в руде до оперативного учета качества и объёмов рудопотоков на всех стадиях производственного процесса [20].

Рассмотренные исследования показывают важность вопросов определения содержания ПК в приконтурной зоне некондиционных руд, в отгружаемой руде, проблем потерь и разубоживания при их выемке. При этом вопрос определения содержания ПК в приконтактной зоне требует целенаправленных исследований для более полного извлечения кондиционных руд за счет частичного примешивания некондиционных руд.

Цель: установление изменения содержания полезных компонентов в приконтактной зоне некондиционных руд по пробам разведочных скважин для ряда месторождений руд цветных, благородных и редких металлов Казахстана.

Задачи:

1. Выявление закономерностей изменения ПК по мере удаления от контура кондиционных руд на месторождениях Коктас-Шарыкты, Каскырказган, Южный-Моинты и Найманжал.
2. Определение толщины примешиваемого слоя руды в приконтурной зоне некондиционных руд, обеспечивающей требуемое содержание ПК в отгружаемой руде.
3. Установление новых закономерностей содержания ПК в отгружаемой руде, обеспечивающего выход концентрата требуемого качества.

Управляя шириной примешиваемого слоя некондиционных руд в пределах, обеспечивающих требуемое качество руды, поступающей на обогатительную фабрику, можно уменьшить потери и увеличить объем добываемых полезных ископаемых. Для научно-технического обоснования этой идеи на конкретных данных рассмотрим несколько реальных месторождений Казахстана.

1. Некоторые месторождения руд цветных, благородных и редких металлов Казахстана

1.1. Южно-Мойынтинская площадь расположена в пределах Северного Прибалхашья, где она занимает участок пересечения трёх значительных тектонических структур регионального масштаба: Токраусского синклинория, Кызыл-Эспинского антиклинория и Западно-Балхашского синклинория. Данная территория отличается исключительно слож-

ным геологическим строением складчато-глыбового типа. Особенностью района является сочетание обширных зон распространения интенсивно дислоцированных рифейских отложений с локальными участками развития более молодых осадочных толщ, относящихся к силурийскому, девонскому и пермскому геологическим периодам.

Геологическая структура района осложнена многочисленными интрузивными телами, среди которых преобладают гранитоидные массивы различного размера и морфологии. Первичная структура залегания горных пород существенно нарушена развитой системой тектонических нарушений, включающей как крупные региональные разломы различной ориентировки, так и многочисленные малоамплитудные разрывные нарушения. Совокупность этих факторов создаёт характерный мозаичный геологический рисунок изучаемой территории.

Проведённые в последние годы поисково-разведочные работы позволили установить важные особенности распределения золоторудной минерализации. Исследования показали, что практически все выявленные жильные зоны и рудные тела характеризуются значительным развитием первичных ореолов рассеяния золота. Ширина этих ореолов на поверхности и их протяжённость по падению (при бортовом содержании ⩾0,01 г/т) в большинстве случаев превышает длину существующих горных выработок. Это означает, что ни одна из пройденных канав или пробуренных скважин не пересекла полностью зону распространения низкосодержащей золотой минерализации.

В пределах изученных участков специалистами были выделены промышленно значимые рудные тела, мощность которых варьирует от 0,1 до 14 м. Содержание золота в отдельных пробах колеблется в значительных пределах – от 0,5 до 126,9 г/т, при этом средние содержания по различным блокам месторождения составляют от 1,38 до 9,73 г/т [21]. Такие показатели свидетельствуют о наличии на территории Южно-Мойынтинской площади перспективных участков с промышленной золоторудной минерализацией.

1.2. На территории месторождения Коктас-Шарыкты были идентифицированы и детально изучены рудные тела с выраженной медной минерализацией. Особенностью их пространственного положения является приуроченность к контактным зонам между грубообломочными осадочными отложениями живетско-франского возраста и субвулканическим массивом андезитовых порфиритов. При этом минерализация отмечается как в непосредственной близости от контакта, так и непосредственно в зоне контакта указанных геологических образований.

Морфологические характеристики рудных тел отличаются значительным разнообразием. Преобладают линзовидные и пластообразные формы, хотя встречаются и образования с неправильными очертаниями (рис. 1). Характерной особенностью является наличие многочисленных раздувов и пережимов, что свидетельствует о сложных условиях формирования рудных тел. Пространственное положение минерализованных зон варьирует – они могут быть локализованы как в массиве порфиритов, так и во вмещающих их терригенных породах, представленных преимущественно конгломератами и в меньшей степени – песчаниками.

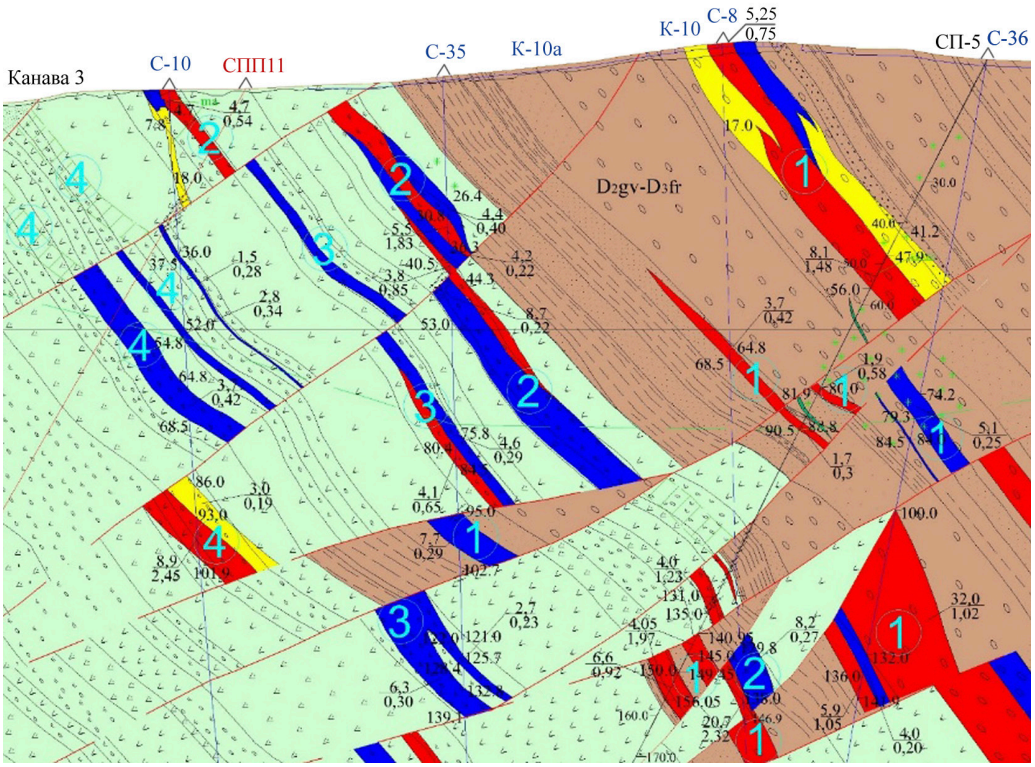


Рис. 1. Участок геологического разреза по профилю III-III месторождения Коктас-Шарыкты

По своим размерам рудные тела, выходящие на поверхность, относительно невелики – их параметры колеблются в пределах от 10×2 до 160×120 м. Особенностью пространственного распределения является группировка сближенных рудных тел в четыре четко выраженные рудные зоны. Все зоны имеют устойчивую северо-западную ориентировку (300–320°), что полностью соответствует простиранию как тела андезитовых порфиритов, так и вмещающих осадочных пород живетско-франского возраста [22].

Детальная характеристика рудных зон

Первая (самая южная) рудная зона: включает два рудных тела размером 10×2 и 130×5–30 м. Первое тело расположено непосредственно в русле реки Шарыкты. Второе тело характеризуется сложной морфологией с ветвлением на юго-восточном окончании, где оно постепенно выклинивается, в то время как на северо-западном фланге погружается под современные рыхлые отложения.

Вторая рудная зона: расположена в 60–70 м к северо-востоку от первой зоны. Состоит из пяти относительно небольших рудных тел, образующих четкую цепочку протяженностью 120 м. Наиболее крупное тело в этой зоне имеет размеры 50×10 м.

Третья рудная зона: находится в 40–50 м к северо-востоку от второй зоны. Все рудные тела залегают исключительно в массиве андезитовых порфиритов. Характеризуется разобщенным расположением тел, образующих цепочку общей протяженностью 440 м. Максимальные размеры наиболее крупного тела составляют 120×20 м.

Четвертая рудная зона: расположена на расстоянии 90–100 м к северо-востоку от третьей зоны. Представлена двумя рудными телами размером 160×15 и 60×10 м. Занимает самое северо-восточное положение среди всех выявленных зон минерализации.

1.3. Медно-молибденовое месторождение Каскырказган входит в Каскырказганскую группу, которая объединяет такие медно-порфировые месторождения, как Кепчам и Кенькудук. Месторождения Каскырказганской группы расположены в центральной части Токрауской интрузивно-тектонической зоны, которая имеет сложное строение, оруденение приурочено к апикальной части штока гранит-порфиров, насыщенной ксенолитами вмещающих пород.

По вещественному составу руды оцениваемых объектов являются комплексными медно-молибденовыми и подразделяются на окисленную и первичную сульфидную части.

Окисленная часть руд развита слабо и прослеживается на глубину до 20 м, редко до 45 м. Основными минералами здесь являются борнит, халькозин, лимонит, гематит, малахит, азурит, хризоколла, куприт, гетит, гидрогетит. Большее значение имеет переходная зона смешанных руд.

Медно-молибденовое оруденение представлено вкрапленно-прожилковым типом в массиве гранодиоритов, тяготеющим к контактам с ксенолитами осадочных пород и кварцевых порфиритов. При этом медная минерализация представлена вкрапленным типом, а молибденовая в основном прожилковым. Выявлена слабая корреляция медного и молибденового оруденения, молибденитовые прожилки зачастую пересекают участки медной вкрапленной минерализации, иногда значительно выходя за ее пределы.

В целом по месторождению отмечается весьма сложный характер оруденения. Рудные интервалы обычно перемежаются с пустыми прослоями, мощности невыдержанные, разброс их наблюдается от десятков метров до десятых долей (рис. 2). При этом вкрапленное оруденение имеет преимущественно не массивный, а вероятно, гнездовой характер, что в разрезах приводит к проявлению «шахматного» рисунка оруденения даже в соседних скважинах в одной разведочной линии. Вкрапленность рудных минералов, проявившаяся в одной скважине, может отсутствовать в следующей скважине, даже на расстоянии 20–50 м, на этом уровне или быть смещенной по вертикали вверх или на глубину [23].

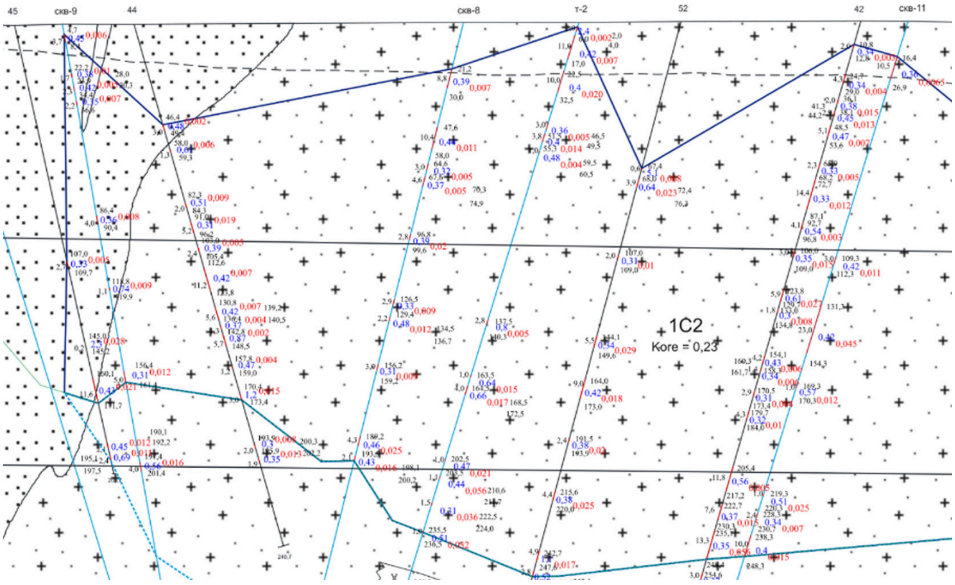


Рис. 2. Участок геолого-подсчетного разреза месторождения Каскырказган

1.4. Найманжальское рудное поле сформировалось в кембро-ордовикский период в условиях островодужной системы, развивавшейся на океанической коре. Вмещающие породы представлены базальт-терригенно-кремнистой формацией, соответствующей начальной стадии вулканической активности в регионе. С данной формацией генетически связано колчеданно-полиметаллическое оруденение, содержащее золото и серебро, наиболее ярко проявленное в пределах Майкаинского рудного поля, которое служит эталонным примером для данного типа минерализации.

Геологическое строение Найманжальского месторождения, занимающего площадь 2,0×0,8 км, характеризуется преобладанием вулканических и вулканогенно-осадочных (вулканомиктовых) пород, относящихся к нижнему и среднему отделам ордовикской системы. Значительно меньшую роль играют терригенные и хемогенные образования. Субвулканические и интрузивные комплексы имеют резко подчиненное значение в геологическом разрезе месторождения.

В пределах Найманжальского месторождения принято выделять минерализованные зоны, внутри которых локализуются собственно рудные тела. Минерализованные зоны могут быть идентифицированы в поверхностных выработках и буровых скважинах по характерным вещественным особенностям и специфическим структурно-текстурным признакам. Однако выделение промышленно значимых рудных тел с установленными бортовыми содержаниями золота (например, 0,5 г/т) требует проведения детального опробования (рис. 3). Центральные части рудных тел, обогащенные золотом и серебром, достаточно четко диагностируются по визуальным признакам, что справедливо как для окисленных и полуокисленных, так и для первичных золотосодержащих руд [24].

Все рассмотренные месторождения характеризуются сложной структурной организацией. Блоки уступов представляют собой сложные сочетания рудных тел и вмещающих пород (некондиционных руд), отличающихся:

– разнообразной конфигурацией;
– широким диапазоном размеров;
– различными физико-техническими параметрами;
– неоднородными геологическими характеристиками.

Особенностью данных месторождений является отсутствие визуально различимых контактов между кондиционными и некондиционными рудами, что определяет вероятностный характер их границ. Существенным недостатком является отсутствие оперативной информации о распределении полезного компонента в различных частях отрабатываемого блока. Однако эту проблему можно решить путем комплексного анализа данных разведочных скважин. Применение методов регрессионного анализа позволяет установить закономерности изменения содержания полезного компонента в приконтактных зонах некондиционных руд, что значительно повышает эффективность геологоразведочных работ.

Для детального исследования особенностей распределения полезных компонентов рекомендуется:

– проведение статистического анализа пробного материала;
– построение регрессионных моделей распределения металлов;
– анализ пространственной изменчивости содержаний;
– выявление закономерностей изменения качества руд в приконтактных зонах.

Такие исследования позволяют существенно повысить достоверность прогнозных оценок и оптимизировать процесс отработки месторождения.

2. Аналитическое определение содержания ПК в приконтактной зоне забалансовых (некондиционных) руд

Решение этой задачи основывается на исходной информации, имеющейся по геологическим скважинам (рис. 4). Данные по разведочным скважинам месторождений Коктас-Шарыкты, Каскырказган и Южный-Моинты приведены в табл. 1. По ним можно выявить закономерности изменения содержания руд в забалансовой (некондиционной) части блока уступа, более точно наметить линии трендов изменения ПК за зоной кондиционных руд.

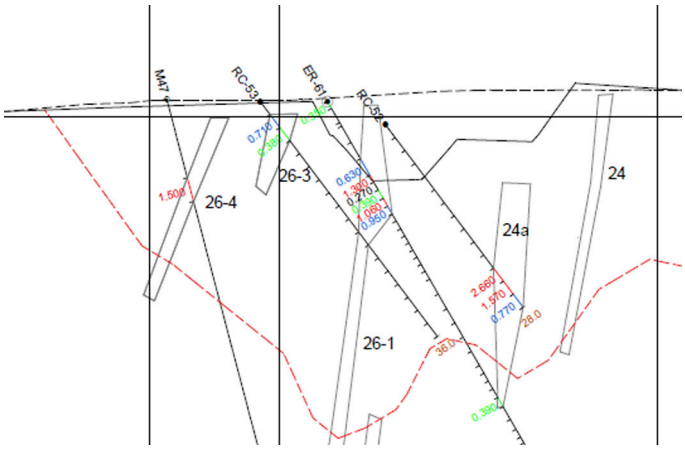
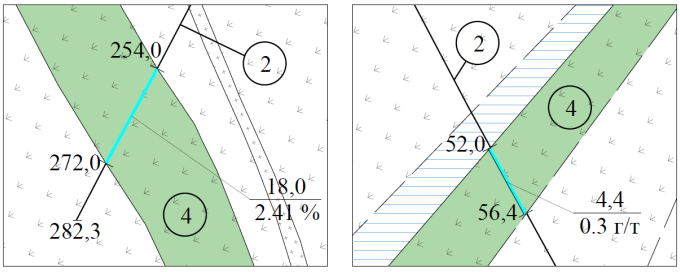


Рис. 3. Участок геолого-подсчетного разреза по профилю 2+25 месторождения Найманжал



а *б*

Рис. 4. Графическое изображение разведочных скважин и рудных участков месторождений:
а — Коктас-Шарыкты; *б* — Южный-Моинты;
2 — разведочная скважина, *4* — рудное тело

Таблица 1

Данные по разведочным скважинам месторождений Коктас-Шарыкты (а), Каскырказган (б) и Южный-Моинты (в)

Место-рождение	Профиль, пикет	Cu, % Au, г/т	Глубина пробы в скважине, м		Длина пробы, м
а	СП-5-155	0,0309	253	254	1
	СП-5-156	0,5738	254	255	1
	СП-5-157	3,2414	255	256	1
	СП-5-158	1,0086	256	257	1
	СП-5-159	3,1540	257	258	1
	СП-5-160	2,3665	258	259	1
	СП-5-161	3,0334	259	260	1
	СП-5-162	2,4180	260	261	1
	СП-5-163	1,5263	261	262	1
	СП-5-164	0.5374	262	263	1
	СП-5-165	0,8430	263	264	1
	СП-5-166	2,5454	264	265	1
	СП-5-167	2,8711	265	266	1
	СП-5-168	1,6061	266	267	1
	СП-5-169	1,0772	267	268	1
	СП-5-170	1,2598	268	269	1
	СП-5-171	1,4031	269	270,4	1,4
	СП-5-172	0,3113	270,4	272	1,6
	СП-5-173	0,0662	272	273	1
б	KAS 2013 72	0,155	71,4	72,4	1
	KAS 2013 73	0,309	72,4	73,4	1
	KAS 2013 74	0,766	73,4	74,4	1
	KAS 2013 75	0,248	74,4	75,4	1
	KAS 2013 76	0,027	75,4	76,4	1
в	UMP35b/55	0,09	51	52	1
	UMP35b/56	0,35	52	52,6	0,6
	UMP35b/57	0,48	52,6	53,2	0,6
	UMP35b/58	0,28	53,2	54	0,8
	UMP35b/59	0,1	54	54,8	0,8
	UMP35b/60	0,49	54,8	55,4	0,6
	UMP35b/61	0,24	55,4	56,4	1
	UMP35b/62	0,05	56,4	57,4	1

Для построения линии тренда и нахождения ее уравнения необходимо выполнить следующие действия. Выбрать две последовательные точки в рудном теле с соответствующим содержанием ПК и одну точку с известным содержанием ПК в некондиционных рудах (см. рис. 4). Расстояния между этими точками определяются по пробам кернов разведочных либо эксплуатационных скважин. Начало отсчета совместить с первой точкой линии тренда в рудном теле (рис. 5, *а*, *б*). Выбранные точки соединить плавной кривой. Тогда первая часть линии тренда (до контура кондиционных руд) будет показывать изменение содержания руды в кондиционной части руды, а вторая часть – изменение ПК в некондиционной части блока. Искомая линия тренда описывается экспоненциальным уравнением:

$$y' = A \cdot e^{kx'}, \tag{1}$$

где y' – содержание ПК в руде на данном отрезке; A и k – искомые коэффициенты; x' – расстояние от первой точки разведочной скважины до рассматриваемой точки, м.

Для нахождения коэффициентов A и k, прологарифмируем обе части уравнения (1). В результате оно преобразуется в линейное уравнение, т.е.:

$$\ln y' = \ln A + kx', \quad Y' = C + kx', \tag{2}$$

где $\ln y' = Y'$, $\ln A = C$ – свободные члены уравнения.

Для определения значений C и k применим метод линейной регрессии, в соответствии с которым производится минимизация суммы квадратов отклонений фактических значений от предполагаемых:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left(Y_i' - (kx_i' + C)\right)^2, \tag{3}$$

где E – сумма квадратов отклонений; n – количество данных; x_i' – абсцисса i-й точки.

Коэффициенты k и C определяются по формулам:

$$k = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(x_i'Y_i') - \sum_{i=1}^{n} x_i' \sum_{i=1}^{n} Y_i'}{n\sum_{i=1}^{n}(x_i')^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i'\right)^2}, \quad C = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i' - k\sum_{i=1}^{n} x_i'}{n}. \tag{4}$$

После определения значений k и C можно найти коэффициенты A, k для искомой экспоненциальной зависимости.

Для определения содержания руды в некондиционной части блока y необходимо пользоваться частью общей линии тренда в этой зоне. Для ее выделения начало новой системы координат нужно совместить с контуром рудного тела (рис. 5, *в*, *г*), тогда:

$$y = A \cdot e^{k(x+\lambda)} = A \cdot e^{k\lambda} \cdot e^{kx}, \quad y = A' \cdot e^{kx}, \tag{5}$$

где λ – расстояние от начала первой системы координат до контура рудного тела; $A' = e^{k\lambda}$ – коэффициент уравнения тренда в зоне некондиционных руд (рис. 6).

Таким образом, по уравнению (5) можно вычислить содержание полезного компонента y в зоне некондиционных руд. Для его автоматизированного расчета была разработана программа построения зависимости содержания руды в приконтурной зоне, определения коэффициентов экспоненциального уравнения. Программа написана в среде Visual Studio 2022 на языке C# (см. рис. 6). Для работы с программой необходимо загрузить *.csv файл с данными содержания руды разведочной или эксплуатационной скважины на конкретном интересующем участке (см. табл. 1).

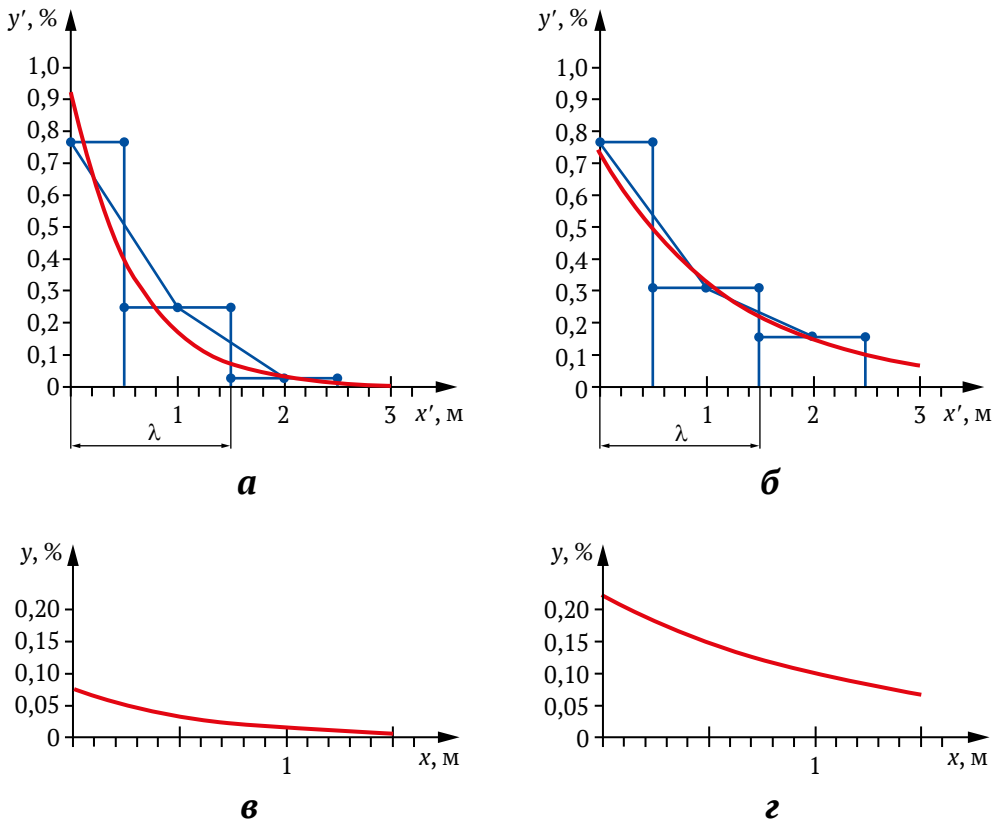


Рис. 5. Общие линии трендов содержания ПК в приконтурной зоне кондиционных и некондиционных руд по данным разведочной скважины KAS 2013 72-76 месторождения Каскырказган:
а – для правого контура рудного тела; *б* – для левого контура рудного тела;
линии трендов в зоне некондиционных руд соответственно: *в* – для правого крыла; *г* – для левого крыла

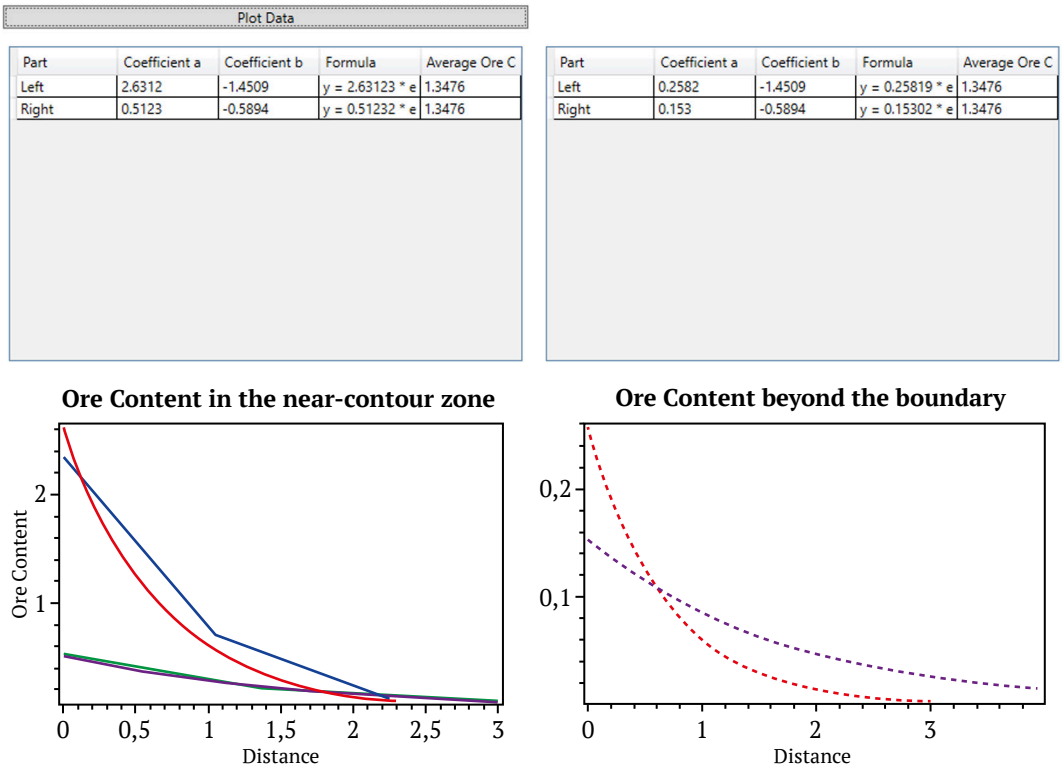


Рис. 6. Интерфейс программы для расчета уравнений содержания ПК в приконтурной зоне некондиционных руд (Coefficient $a = A'$)

Далее по нажатию кнопки «Plot Data» воспроизводится алгоритм регрессионного анализа согласно вышеприведенной методике и, как видно на рис. 6, отображаются две таблицы с коэффициентами кривой изменения содержания ПК левого и правого контура в первичных координатах слева и в новой системе координат справа. Соответственно на нижеприведенных графиках показаны кривые изменения содержания ПК левого и правого контура рудного участка в старой и новой координатной системах.

3. Технологическое обоснование полного извлечения руд из сложноструктурных блоков с примешиванием некоторого слоя некондиционных руд

Для технологического обоснования полного извлечения рудной массы из сложноструктурных блоков с минимальными потерями и разубоживанием необходимо учитывать ряд ключевых показателей обогатительного процесса. К ним можно отнести:

– содержание полезного компонента в получаемом концентрате β;

– содержание полезного компонента в отходах обогащения δ;

– среднее содержание полезного компонента в исходной руде α;

– выход готового концентрата $\gamma_к$;

– выход хвостов обогащения $\gamma_х$;

– степень извлечения полезного компонента в концентрат $\varepsilon_к$;

– степень извлечения полезного компонента в хвосты $\varepsilon_х$.

Эти параметры, как правило, определяются экспериментальным путем в ходе лабораторных и промышленных испытаний [25–27]. Для их теоретического расчета могут быть использованы математические зависимости, выведенные в наших предыдущих исследованиях [25]:

$$\gamma_c = \frac{M_c}{M_o} = \frac{\alpha-\delta}{\beta-\delta}, \quad \gamma_t = \frac{M_t}{M_o} = \frac{\beta-\alpha}{\beta-\delta},$$
$$\varepsilon_c = \frac{M_c\beta}{M_o\alpha} = \frac{\alpha-\delta}{\beta-\delta}\cdot\frac{\beta}{\alpha}, \quad \varepsilon_t = \frac{M_t\delta}{M_o\alpha} = \frac{\beta-\alpha}{\beta-\delta}\cdot\frac{\delta}{\alpha}. \tag{6}$$

Учитывая, что массы исходной руды M_o, получаемого концентрата M_c и образующихся хвостов M_t поддаются точному измерению, значения извлечения и выхода продуктов обогащения могут быть рассчитаны с высокой точностью по приведенным формулам (6).

Взаимосвязь между показателями извлечения полезного компонента и выходами продуктов обогащения выражается следующими соотношениями:

$$\varepsilon_c = \gamma_c\frac{\beta}{\alpha}, \quad \varepsilon_t = \gamma_t\frac{\delta}{\alpha}. \tag{7}$$

Принципы оконтуривания промышленных руд

При решении поставленной задачи особое внимание следует уделить методологии определения границ кондиционных руд. Этот процесс основывается на установлении технологически и экономически обоснованного минимально допустимого содержания полезных компонентов (ПК) в руде α. Объемы рудной массы с содержанием ПК ниже этого предела ($<\alpha$) классифицируются как некондиционные и относятся к категории вмещающих пород.

Как показали исследования, уменьшение содержания полезных компонентов при удалении от контура рудного тела происходит постепенно. В приконтурной зоне некондиционных руд, непосредственно примыкающей к промышленным рудам, содержание ПК соответствует его бортовому значению [12]. По мере удаления от этой границы среднее содержание полезного компонента в общей отгружаемой рудной массе α' снижается.

Для количественной оценки этого процесса в двумерном представлении (рис. 7) используется следующая формула:

$$\alpha' = \frac{S_{eo}\cdot\alpha + S_{so}\cdot\alpha''}{S_{eo}+S_{so}}, \tag{8}$$

где S_{eo} – площадь слоя кондиционной руды, м^2; S_{so} – площадь примешиваемого слоя некондиционной руды, м^2; α'' – содержание ПК в примешиваемом слое некондиционных руд.

Приведенные математические зависимости позволяют:

– точнее определять границы промышленных рудных тел;

– рассчитывать оптимальные параметры выемки;

– строить алгоритмы для минимизации потерь полезных компонентов;

– снижать степень разубоживания руды;

– обосновывать экономическую целесообразность отработки пограничных зон.

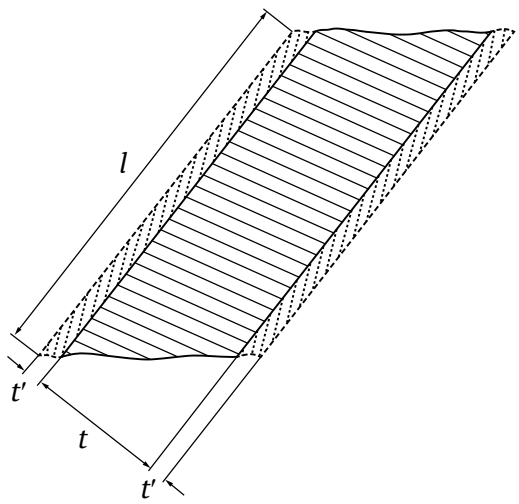


Рис. 7. Схема к определению содержания ПК в отгружаемой руде: – кондиционная руда; – некондиционная руда

Применение данной методики особенно актуально для сложноструктурных месторождений с нечеткими границами рудных тел, где традиционные подходы к оконтуриванию часто оказываются недостаточно эффективными.

Для расчета $\alpha'' = y$ в примешиваемом слое некондиционных руд можно пользоваться полученной зависимостью (5), откуда:

$$\alpha'' = \frac{1}{t}\int_0^{t'} y(x)\,dx = \frac{1}{t'}\int_0^{t'} A'e^{kx}\,dx = \frac{A'}{kt'}(e^{kx}-1), \qquad (9)$$

где t' – ширина слоя примешиваемой некондиционной руды. Результаты вычислений α'' приведены в табл. 2, 3.

Чтобы определить содержание ПК в отгружаемой руде, необходимо выполнить действия согласно следующему алгоритму:

1. Определяется изучаемый сложноструктурный блок уступа.

2. Приводятся данные по содержанию руды в приконтактной зоне кондиционных и некондиционных руд по результатам проб разведочных или эксплуатационных скважин.

3. Вносятся данные содержания ПК в приконтактной зоне в разработанную программу и с ее помощью определяются коэффициенты A', k для экспоненциальной зависимости (5) изменения содержания руды в забалансовых рудах.

4. По найденным коэффициентам устанавливается содержание руды в примешиваемом слое некондиционных руд по зависимости (9).

5. Подставив найденное значение α'' в (8), определить содержание ПК в общей отгружаемой руде.

Для практической проверки эффективности предложенного алгоритма были детально проанализированы три различных варианта комплексной выемки запасов полезных ископаемых, предусматривающих совместную отработку кондиционных руд с прилегающими слоями некондиционной минерализации в пределах сложноструктурных блоков. Исследуемые рудные тела характеризовались значительным варьированием мощности – от 4 до 30 м, что позволило оценить работу алгоритма в различных геологических условиях.

Таблица 2

Данные по медным месторождениям Каскырказган (а) и Коктас-Шарыктинской площади (б)

Место-рождение	№ рудного тела	Среднее содержание ПК в рудном теле α, %	Мощность рудного тела, м	A'	k	Содержание руды α″ в приконтурном слое некондиционных руд, м		
						0–0,3	0–0,7	0–1,0
а	1	0,30	13,7	0,10	−1,15	0,085	0,069	0,059
	2	0,33	9,8	0,19	−0,74	0,170	0,148	0,134
	3	0,35	6,5	0,23	−0,32	0,219	0,206	0,197
	4	0,39	6,8	0,20	−0,65	0,182	0,161	0,147
	5	0,43	6	0,19	−1,00	0,164	0,137	0,120
б	1	0,30	16,5	0,13	−0,50	0,121	0,110	0,102
	2	0,38	13,5	0,11	−0,46	0,103	0,094	0,088
	3	0,53	6	0,18	−1,94	0,136	0,098	0,079
	4	0,74	13	0,21	−0,78	0,187	0,162	0,146
	5	0,97	8,37	0,15	−1,34	0,124	0,097	0,083

Таблица 3

Данные по золотоносным месторождениям Южно-Мойынтинской площади (а) и Найманжал (б)

Место-рождение	№ рудного тела	Среднее содержание ПК в рудном теле α, %	Мощность рудного тела, м	A'	k	Содержание руды α″ в приконтурном слое некондиционных руд, м		
						0–0,3	0–0,7	0–1,0
а	1	0,30	6,4	0,15	−1,25	0,125	0,100	0,086
	2	0,35	16,2	0,12	−1,87	0,092	0,067	0,054
	3	0,43	5,1	0,13	−1,39	0,106	0,083	0,070
	4	0,48	6,5	0,12	−1,06	0,103	0,085	0,074
	5	0,65	10,9	0,36	−0,91	0,315	0,266	0,236
б	1	0,31	9,9	0,10	−0,45	0,094	0,086	0,081
	2	0,47	4	0,18	−2,19	0,132	0,092	0,073
	3	0.67	12	0,20	−0,84	0,177	0,151	0,135
	4	0.76	30	0,20	−0,80	0,178	0,153	0,138
	5	1.00	6	0,30	−1,25	0,250	0,200	0,171

Параметры исследования для медных руд:

Первый вариант: толщина включаемого слоя некондиционных руд t' = 0,3 м; содержание ПК в примешиваемом слое α'' варьировалось в диапазоне 0,008–0,02.

Второй вариант: толщина включаемого слоя t' = 0,7 м; содержание ПК в примешиваемом слое α'' = 0,034–0,101.

Третий вариант: толщина включаемого слоя t' = 1,0 м; содержание ПК в примешиваемом слое α'' = 0,059–0,197.

Параметры исследования для золотоносных руд:

Первый вариант: толщина включаемого слоя t' = 0,3 м; содержание ПК в примешиваемом слое α'' = 0,008–0,028.

Второй вариант: толщина включаемого слоя t' = 0,7 м; содержание ПК в примешиваемом слое α'' = 0,033–0,13.

Третий вариант: толщина включаемого слоя t' = 1,0 м; содержание ПК в примешиваемом слое α'' = 0,054–0,236.

Характеристики качества рудного сырья и продуктов обогащения:

Исходное содержание полезных компонентов в рудах варьировалось в следующих пределах: для медных руд: α_{Cu} = 0,3–1,0 %; для золотоносных руд: α_{Au} = 0,00005–0,0002 % (что эквивалентно 0,5–2,0 г/т).

Качество получаемых концентратов соответствовало: медный концентрат: β_{Cu} = 20,0%; золотосодержащий концентрат: β_{Au} = 0,04 % (40,0 г/т).

Содержание полезных компонентов в хвостах обогащения составляло: для медных руд: δ_{Cu} = 0,06%; для золотоносных руд: δ_{Au} = 0,00001 % (0,1 г/т).

Результаты эксперимента

Полученные численные значения содержания полезных компонентов в отгружаемой рудной массе и степени их извлечения в концентраты для медных и золотоносных руд систематизированы в табл. 4 и 5 соответственно. Анализ относительных отклонений этих показателей представлен в табл. 6 и 7, что позволяет оценить стабильность работы алгоритма при различных исходных условиях.

Проведенные исследования демонстрируют эффективность предложенного подхода к отработке сложноструктурных рудных блоков, обеспечивающего:

– повышение уровня извлечения полезных ископаемых;

– контролируемое включение некондиционных руд в отработку;

– возможность оптимизации технологических параметров процесса;

– снижение потерь ценных компонентов;

– снижение степени разубоживания добываемой рудной массы.

Результаты апробации подтверждают универсальность разработанного алгоритма для различных типов рудного сырья и широкого диапазона горно-геологических условий.

Как следует из данных, представленных в табл. 4 и 5, наблюдается четкая зависимость содержания полезных компонентов (ПК) в отгружаемой рудной массе от двух ключевых факторов. Во-первых, отмечается прямая корреляционная связь между содержанием ПК в кондиционной руде и его концентрацией в отгружаемом сырье. Во-вторых, прослеживается обратная зависимость от расстояния до контура рудного тела – по мере удаления от границы промышленного оруденения содержание ценных компонентов закономерно снижается. Подобная закономерность в полной мере характерна как для медных, так и для золотоносных руд, причем она проявляется во всех без исключения рассмотренных вариантах отработки. Примечательно, что аналогичная тенденция, хотя и в несколько менее выраженной форме, наблюдается и для показателей извлечения меди и золота в получаемый концентрат. Однако в данном случае амплитуда колебаний значений оказывается значительно меньше, что свидетельствует об относительно стабильном характере процесса обогащения.

Таблица 4

Содержание ПК в отгружаемой руде и их извлечение в концентрат при различных размерах примешиваемых слоев некондиционных руд на месторождениях Каскырказган (а) и Коктас-Шарыктинской площади (б)

Месторождение	Варианты							
	Исходные		I		II		III	
	α	$\varepsilon_к$	α'	$\varepsilon_к$	α'	$\varepsilon_к$	α'	$\varepsilon_к$
а	0,30	80,24	0,291	79,62	0,279	78,72	0,270	78,03
	0,33	82,06	0,321	81,54	0,307	80,72	0,297	80,04
	0,35	83,11	0,339	82,54	0,324	81,72	0,314	81,12
	0,39	84,87	0,373	84,16	0,351	83,14	0,334	82,29
	0,43	86,31	0,406	85,47	0,375	84,27	0,355	83,34
б	0,30	80,24	0,294	79,80	0,285	79,18	0,278	78,67
	0,33	84,46	0,368	83,96	0,353	83,26	0,343	82,74
	0,35	88,95	0,493	88,10	0,447	86,83	0,415	85,79
	0,39	92,17	0,716	91,89	0,684	91,50	0,661	91,20
	0,43	94,10	0,913	93,71	0,844	93,17	0,798	92,76

Для более детальной оценки степени влияния указанных изменений на конечный технологический результат – показатель извлечения полезного компонента в концентрат, необходимо провести сравнительный анализ величины этих отклонений для всех трех рассматриваемых случаев. Такой подход позволит: установить степень чувствительности технологического процесса к вариациям исходного содержания ПК; определить влияние расстояния от контура рудного тела на эффективность обогащения; определить параметры отработки для каждого типа рудного сырья; оценить стабильность работы обогатительного оборудования при изменяющихся условиях; разработать корректирующие мероприятия для минимизации негативного влияния выявленных факторов.

Согласно данным, представленным в табл. 6 и 7, можно выявить следующие закономерности в изменении содержания полезных компонентов в отгружаемой руде:

Для медных руд: в первом варианте отработки максимальное относительное отклонение не превышает 6 %; во втором варианте этот показатель достигает 16 %; в третьем варианте отклонения увеличиваются до 22 %.

Для золотоносных руд: в первом варианте максимальное отклонение составляет 10 %; во втором варианте возрастает до 24 %; в третьем варианте достигает 31 %.

Таблица 5

Содержание ПК в отгружаемой руде и их извлечение в концентрат при различных размерах примешиваемых слоев некондиционных руд на месторождениях Южно-Мойынтинской площади (а) и Найманжал (б)

Месторождение	Варианты							
	Исходные		I		II		III	
	α	$\varepsilon_к$	α'	$\varepsilon_к$	α'	$\varepsilon_к$	α'	$\varepsilon_к$
а	0,3	80,24	0,285	79,15	0,263	77,45	0,248	76,02
	0,35	83,11	0,341	82,63	0,327	81,92	0,317	81,33
	0,43	86,31	0,396	85,11	0,356	83,39	0,329	82,03
	0,48	87,76	0,448	86,88	0,410	85,63	0,385	84,67
	0,65	91,04	0,633	90,80	0,610	90,44	0,593	90,14
б	0,31	80,89	0,298	80,08	0,278	78,66	0,266	77,65
	0,47	87,50	0,426	86,17	0,359	83,54	0,324	81,74
	0,67	91,32	0,646	90,99	0,610	90,43	0,586	90,03
	0,76	92,38	0,749	92,26	0,731	92,07	0,719	91,93
	1	94,28	0,931	93,84	0,824	93,00	0,765	9,43

Таблица 6

Относительные отклонения исследуемых показателей от требуемых при различных размерах примешиваемых слоев некондиционных руд месторождений Каскырказган (а) и Коктас-Шарыктинской площади (б)

Место-рождение	I		II		III	
	$\Delta\alpha'$	$\Delta\varepsilon_к$	$\Delta\alpha'$	$\Delta\varepsilon_к$	$\Delta\alpha'$	$\Delta\varepsilon_к$
а	3,02	0,78	7,05	1,90	9,94	2,76
	2,77	0,63	6,88	1,64	10,00	2,47
	3,21	0,69	7,44	1,66	10,35	2,39
	4,38	0,83	10,07	2,04	14,32	3,04
	5,64	0,97	12,68	2,35	17,50	3,44
б	2,14	0,55	5,01	1,32	7,24	1,95
	3,06	0,59	7,05	1,42	9,81	2,04
	6,91	0,95	15,70	2,38	21,75	3,55
	3,31	0,30	7,58	0,72	10,67	1,05
	5,89	0,41	13,04	0,99	17,74	1,42

Таблица 7

Относительные отклонения исследуемых показателей от требуемых при различных размерах примешиваемых слоев некондиционных руд месторождений Южно-Мойынтинской площади (а) и Найманжал (б)

Место-рождение	I		II		III	
	$\Delta\alpha'$	$\Delta\varepsilon_к$	$\Delta\alpha'$	$\Delta\varepsilon_к$	$\Delta\alpha'$	$\Delta\varepsilon_к$
а	5,14	1,36	12,21	3,48	17,38	5,26
	2,68	0,57	6,44	1,42	9,34	2,13
	7,89	1,39	17,23	3,38	23,38	4,95
	6,59	1,01	14,53	2,43	19,76	3,52
	2,56	0,27	6,15	0,67	8,84	0,99
б	4,00	1,00	10,28	2,75	14,29	4,00
	9,39	1,52	23,59	4,52	31,00	6,57
	3,52	0,36	8,99	0,97	12,57	1,41
	1,49	0,13	3,79	0,34	5,37	0,49
	6,91	0,47	17,59	1,36	23,50	1,96

Анализ показателей извлечения ПК в концентрат демонстрирует следующую динамику:

Для медных руд: первый вариант – колебания от 0,3 до 0,97 %; второй вариант – диапазон от 0,72 до 2,38 %; третий вариант – вариация от 1,05 до 3,55 %.

Для золотоносных руд: первый вариант – отклонения от 0,13 до 1,52 %; второй вариант – от 0,34 до 4,52 %; третий вариант – от 0,49 до 6,57 %.

Все зафиксированные отклонения показателей извлечения ПК находятся в пределах технологически допустимых значений, что подтверждает эффективность предлагаемого метода.

Применение новых технологических решений по извлечению балансовых руд из сложноструктурных блоков с включением части забалансовых руд позволяет: обеспечить требуемое качество отгружаемой рудной массы; значительно увеличить объем добываемого сырья; повысить общую эффективность эксплуатации месторождения.

Внедрение новой технологии разработки сложноструктурных блоков приводит к следующим изменениям:

– часть некондиционных руд, ранее считавшихся разубоживающей породой, переходит в категорию промышленных запасов;

– существенно возрастает объем извлекаемой рудной массы;

– увеличивается процент извлечения полезных компонентов в конечный концентрат.

4. Экономический эффект

Применительно к конкретным производственным условиям медного карьера с годовым объемом добычи 6–7 млн т руды, при среднем содержании меди 0,45 % и доле сложноструктурных блоков 50–60 % от общего объема дополнительное извлечение полезных компонентов может составить от 10,0 до 15,0 % от общего объема производства;

Таким образом, предлагаемая технология обеспечивает значительный технологический и экономический эффект при сохранении требуемых качественных характеристик добываемой рудной массы.

Заключение

1. На основе анализа данных разведочных скважин по пяти месторождениям медных и золотоносных руд Казахстана (Каскырказган, Коктас-Шарыкты, Южный-Мойынты, Найманжал и др.) установлены закономерности изменения содержания ПК в приконтурной зоне некондиционных руд. Выявлено, что содержание ПК изменяется по экспоненциальной зависимости вида $y = A' \cdot e^{kx}$, где A' и k варьируют: для медных руд – A′ = 0,10–0,23, k = −0,32–−1,94, для золотоносных руд – A′ = 0,10–0,36, k = −0,45–−2,19.

2. Разработана автоматизированная программа в среде Visual Studio 2022 на языке C# для расчета уравнений экспоненциальных кривых изменения содержания ПК, определения коэффициентов A′ и k и прогнозирования содержания ПК в примешиваемом слое некондиционных руд.

3. С использованием указанной программы проведены расчеты содержания ПК в отгружаемой руде α' при примешивании различных по толщине слоев некондиционных руд (t' = 0,3, 0,7 и 1,0 м). Установлено, что: для медных руд содержание α' изменялось от 0,406 до 0,270 %, извлечение в концентрат $\varepsilon_к$ – от 94,10 до 78,03 %; для золотоносных руд содержание α' изменялось от 0,931 до 0,248 г/т, извлечение в концентрат $\varepsilon_к$ – от 94,28 до 76,02 %.

4. Для первого случая примешивания некондиционной руды с t' = 0,3 м при относительных отклонениях содержания ПК в отгружаемой медной руде 2,14–6,91 % и золотоносных рудах 1,49–9,39 % относительное отклонение извлечения в концентрат составило: для меди – 0,3–0,97 %; для золота – 1,49–9,39 %, что укладывается в допустимые технологические нормы.

5. Предложенный способ полного извлечения кондиционных руд за счёт примешивания приконтурных некондиционных руд позволяет обеспечить требуемое качество отгружаемой рудной массы и повысить объем извлекаемых запасов. Это подтверждено расчетами для различных слоев примешиваемой руды.

6. Впервые в горной науке теоретически обоснована возможность перевода разубоживающей части некондиционных руд в категорию извлекаемых запасов. Это ведет к увеличению объема отгружаемой руды и извлечения полезных компонентов в концентрат без ухудшения его качества.

Полученные результаты имеют важное практическое значение. При разработке месторождения производительностью 6–7 млн т/год, со средним содержанием меди 0,45 % и долей сложноструктурных блоков 50–60 % прирост извлечения меди может составлять 10–15 % от общего объема производства. В денежном выражении это соответствует дополнительной прибыли около $ 15,3 млн/год при рыночной цене меди $ 8500 за тонну.

Список литературы / References

1. Шабаров А.Н., Куранов А.Д. Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горнотехнических условиях ведения горных работ. *Горный журнал*. 2023;(5):5–10. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.01
Shabarov A.N., Kuranov A.D. Basic development trends in mining sector in complicating geotechnical conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(5):5–10. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.01
2. Трубецкой К.Н., Пешков А.А., Мацко Н.А. Определение области применения способов разработки крутопадающих залежей с использованием заранее сформированного выработанного пространства. *Горный журнал*. 1994;(1):51–59.
Trubetskoy K.N., Peshkov A.A., Matsko N.A. Determination of application scope for steeply dipping deposit mining methods using pre-formed worked-out space. *Gornyi Zhurnal*. 1994;(1):51–59. (In Russ.)

3. Трушко В.Л., Протосеня А.Г. Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада. *Записки Горного института*. 2019;236:162–166. https://doi.org/10.31897/pmi.2019.2.162
Trushko V.L., Protosenya A.G. Prospects of geomechanics development in the context of new technological paradigm. *Journal of Mining Institute*. 2019;236:162–166. https://doi.org/10.31897/pmi.2019.2.162
4. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Под ред. член-корр. РАН В.Л. Яковлева. Екатеринбург: УрО РАН; 2018. 360 с.
Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V. *Innovative basis for the strategy of integrated mineral resource development*. Ed. by corresponding member of RAS V. L. Yakovlev. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS; 2018. 360 p. (In Russ.)
5. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых. Известия высших учебных заведений. *Горный журнал*. 2021;(1):63–73.
Kantemirov V., Iakovlev A., Titov R. Applying geoinformation technologies of block modelling to improve the methods of assessing quality indicators of minerals. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):63–73. (In Russ.)
6. Чебан А.Ю., Секисов Г.В. Сложноструктурные рудные блоки и их систематизация. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2020;26(6):43–53. https://doi.org/10.21209/2227-9245-2020-26-6-43-53
Cheban A., Sekisov G. Complex structural ore blocks and their systematization. *Transbaikal State University Journal*. 2020;26(6):43–53. (In Russ.) https://doi.org/10.21209/2227-9245-2020-26-6-43-53
7. Боярко Г.Ю., Болсуновская Л.М. Минерально-сырьевая база кобальта России: состояние, возможности развития. *Горные науки и технологии*. 2025;10(2):118–147. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-368
Boyarko G.Yu., Bolsunovskaya L.M. Mineral resource base of Russia's cobalt: current state and development prospects. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(2):118–147. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-02-368
8. Кирсанов А.К. Обзор современного состояния горнодобывающей промышленности Китая. *Горные науки и технологии*. 2023;8(2):115–127. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-35
Kirsanov A.K. Chinese mining industry: state of the art review. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2023;8(2):115–127. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-11-35
9. Лобынцев А.К., Фомин С.И. Оценка степени влияния горнотехнических факторов на норматив готовых к выемке запасов при проектировании открытой разработки сложноструктурных рудных месторождений. *Рациональное освоение недр*. 2021;(5):40–43.
Lobyntsev A.K., Fomin S.I. Assessment of the influence of mining factors degree on the standard of prepared reserves when designing open-pit mining of complexstructure ore deposits. *Ratsionalnoe Osvoenie Nedr*. 2021;(5):40–43. (In Russ.)
10. Кушнарев П.И. Скрытые потери и разубоживание. *Золото и технологии*. 2017;(3):82–87.
Kushnarev P.I. Hidden losses and ore dilution. *Zoloto i Tekhnologii*. 2017;(3):82–87. (In Russ.)
11. Rakishev B.R. Mining and geological models of virtual complex ore blocks of the bench. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023;(4):11–17. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/011
12. Ракишев Б.Р. Полное извлечение кондиционных руд из сложноструктурных блоков за счет частичного примешивания некондиционных руд. *Записки Горного института*. 2024;270:919–930.
Rakishev B.R. Complete extraction of conditioned ores from complex-structured blocks due to partial admixture of substandard ores. *Journal of Mining Institute*. 2024;270:919–930.
13. Нуржумин Е.К., Толеубекова Ж.З., Камаров Р.К. и др. Отработка приконтурных участков залежей сложноструктурных месторождений и способы ее оценки. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2014;2(4):23–30.
Nurzhumin E.K., Toleubekova Ja.Z., Kamarov R.K., et al. Mining in marginal areas of complicated-structure ore bodies and the ore body structure complexity evaluation. *Interexpo GEO-Siberia*. 2014;2(4):23–30. (In Russ.)
14. Яковлев А.М. Планирование горных работ в режиме управления качеством сырья на основе геоинформационного моделирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5–1):258–268. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_258
Yakovlev I.M. Planning of mining operations in the quality management mode based on geoinformation modeling. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5–1):258–268. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_258
15. Veliz V., Maleki M., Madani N. et al. Plurigaussian modeling of non-stationary geological domains to assess geological uncertainty in a porphyry copper deposit. *Ore Geology Reviews*. 2023;162:105707. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105707
16. Мельниченко И.А., Кириченко Ю.В. Пространственное районирование месторождений полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(4):46–56. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_46
Melnichenko I.A., Kirichenko Yu.V. Spatial zoning of mineral deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(4):46–56. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_46

17. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., Тимохин А.В. Совершенствование методов рудоподготовки минерального сырья при освоении сложноструктурных месторождений. *Горная промышленность*. 2022;(1S):63–70. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1s-63-70
Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S., Timokhin A.V. Improvement of mineral processing methods in mining structurally-complex deposits. *Mining Industry Journal*. 2022;(1S):63–70. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1s-63-70
18. Павлишина Д.Н., Терещенко С.В. Анализ систем управления качеством бедных апатит-нефелиновых руд в процессе их переработки. *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2014;17(2):254–258.
Pavlishina D.N., Tereshchenko S.V. Analysis of systems of quality management of low-grade apatite-nepheline ores during their processing. *Vestnik of MSTU*. 2014;17(2):254–258. (In Russ.)
19. Maleki M., Mery N., Soltani-Mohammadi S., et al. Geological Control for in-situ and recoverable resources assessment: a case study on Sarcheshmeh Porphyry Copper Deposit, Iran. *Ore Geology Reviews*. 2022;150:105133. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105133
20. Каплунов Д.Р., Рыльников А.Г. Обобщение современных подходов к управлению качеством рудопотоков в условиях действующих рудников на всех этапах освоения месторождения. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2020;(4):40–53.
Kaplunov D.R., Rylnikov A.G. Generalization of modern approaches to quality management technology at opera ting mines. *Izvestija Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(4):40–53. (In Russ.)
21. Глухов А.М. и др. *Отчет по поисковым работам на золото на Южно-Мойынтинской площади в Карагандинской области в 2015–2016 гг*. Листы L-43-40-A, Б. Караганда: Центркaзнедра; 2016. 350 с.
Glukhov A.M., et al. *Report on gold exploration works at the Yuzhno-Moyyntinskaya area in Karaganda Region (2015–2016)*. Sheets L-43-40-A, B. Karaganda: Tsentrkaznedra; 2016. 350 p. (In Russ.)
22. Кацюба Е.А. и др. *Отчет по поисково-оценочным работам на медь, золото и попутные компоненты на Коктас-Шарыктинской площади в пределах Спасской меднорудной зоны в 2014–2015 гг*. Караганда: Центркaзнедра; 2015. 154 с.
Katsyuba E.A., et al. *Report on exploration and evaluation works for copper, gold, and associated components at the Koktas-Sharyktinskaya area within the Spasskaya Copper Ore Zone* (2014–2015). Karaganda: Tsentrkaznedra; 2015. 154 p. (In Russ.)
23. Ниценко П.А. и др. *Отчет о проведенных поисково-оценочных работах на участке Каскырказган в Карагандинской области с подсчетом запасов меди и молибдена по категории С2 по состоянию на 01.10.2014 г*. Караганда: Центркaзнедра; 2014. 144 с.
Nitsenko P.A., et al. *Report on exploration and evaluation works at the Kaskyrkazgan Site in Karaganda Region with calculation of copper and molybdenum reserves under C2 category as of 01.10.2014*. Karaganda: Tsentrkaznedra; 2014. 144 p. (In Russ.)
24. Данилов В.И. и др. *Повариантный подсчет запасов и технико-экономическое обоснование кондиций на руды месторождения Найманжал*. Алматы: Центркaзнедра; 2007. 135 с.
Danilov V.I., et al. *Multi-variant reserve estimation and technical-economic substantiation of cut-off grades for ores of the Naimanjal Deposit*. Almaty: Tsentrkaznedra; 2007. 135 p. (In Russ.)
25. Rakishev B.R. Technological resources for improving the quality and completeness of use of the mineral raw materials. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2017;2(422):116–124.
26. Пелих В.В., Салов В.М., Бурдонов А.Е., Лукьянов Н.Д. Модель извлечения бадделеита из отвальных продуктов апатито-бадделеитовой обогатительной фабрики на концентраторе CVD6. *Записки Горного института*. 2021;248:281–289. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.2.12
Pelikh V.V., Salov V.M., Burdonov A.E., Lukyanov N.D. Model of baddeleyite recovery from dump products of an apatite-baddeleyite processing plant using a CVD6 concentrator. *Journal of Mining Institute*. 2021;248:281–289. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.2.12
27. Муталова М.А., Хакимова Д.Ю. Исследование извлечения полезных компонентов из шлаков методом флотации. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*. 2020;1(2):26–30.
Mutalova M.A., Khakimova D.Yu. Investigation of the recovery of useful components from slags by the flotation method. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*. 2020;1(2):26–30. (In Russ.)

Информация об авторах

Баян Ракишевич Ракишев – академик НАН Республики Казахстан, доктор технических наук, профессор кафедры горного дела, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; ORCID 0000-0001-5445-070X, Scopus ID 6603178936; e-mail b.rakishev@mail.ru

Абдраман Ибрагимович Едильбаев – доктор технических наук, генеральный директор, ТОО «Горное бюро», г. Алматы, Республика Казахстан; ORCID 0000-0001-8498-7049, Scopus ID 23396734100; e-mail byedilbayev@gmail.com

Асфандияр Айтказыулы Орынбай – PhD (горное дело), доцент кафедры электронной инженерии, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан; ведущий научный сотрудник кафедры горного дела, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; ORCID 0000-0002-3720-7625, Scopus ID 57204864631; e-mail a.orynbay@aues.kz

Темирлан Сакенович Ибырханов – докторант кафедры горного дела, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; ORCID 0009-0001-6344-8270; e-mail ibir.tem@mail.ru

Information about the authors

Bayan R. Rakishev – Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Department of Mining Engineering, Satbayev University (Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev), Almaty, Republic of Kazakhstan; ORCID 0000-0001-5445-070X, Scopus ID 6603178936; e-mail b.rakishev@mail.ru

Abdraman I. Edil'baev – Dr. Sci. (Eng.), General Director, Mining Bureau LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; ORCID 0000-0001-8498-7049, Scopus ID 23396734100; e-mail byedilbayev@gmail.com

Asfandyar A. Orynbay – PhD (Mining Eng.), Associate Professor of the Department of Electronic Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Republic of Kazakhstan; Senior Research of the Department of Mining Engineering, Satbayev University (Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev), Almaty, Republic of Kazakhstan; ORCID 0000-0002-3720-7625, Scopus ID 57204864631; e-mail a.orynbay@aues.kz

Temirlan S. Ibyrkhanov – PhD-Candidate of the Department of Mining Engineering, Satbayev University (Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev), Almaty, Republic of Kazakhstan; ORCID 0009-0001-6344-8270; e-mail ibir.tem@mail.ru

Поступила в редакцию	21.04.2025	**Received**	21.04.2025
Поступила после рецензирования	24.06.2025	**Revised**	24.06.2025
Принята к публикации	27.06.2025	**Accepted**	27.06.2025

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-299
УДК 550.837:553.98

Статистический анализ определения коэффициентов пористости пород-коллекторов нефти и газа методами газоволюметрии и рентгеновской томографии

В.И. Галкин, О.А. Мелкишев, Я.В. Савицкий ✉
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация
✉ *yansavitsky@yandex.ru*

Аннотация
Для решения актуальных задач в нефтяной отрасли, связанных с моделированием структуры порового пространства в 3D-модели керна и оценкой фильтрационно-емкостных свойств («Цифровой керн»), необходимо получение представительной характеристики пустотного пространства. Аналогичная характеристика требуется для решения задач геомеханики, связанных с моделированием и оценкой прочностных свойств неоднородных горных пород. Кроме того, она важна для исследований капиллярных процессов в пористых средах. Статья посвящена сравнительному анализу значений пористости пород-коллекторов нефти и газа, полученных методами газоволюметрии и рентгеновской компьютерной томографии. Целью работы является разработка статистических моделей для оценки расхождения определения коэффициента пористости $K_п$ по данным компьютерной томографии (КТ) с более достоверными данными лабораторной петрофизики для двух литологических типов пород – терригенных и карбонатных. Задачи исследования включают: оценку влияния литологического состава пород на оценку $K_п$ разными методами (петрофизика и КТ); рассмотрение и оценку влияния диапазона варьирования пористости пород коллекторов на сходимость результатов этих двух методов для разных литологических типов пород; построение статистических моделей для корректировки значений $K_п$ по результатам КТ для разных литологических типов пород. Решение данных задач основывается на проведении детального статистического анализа исследований терригенных и карбонатных пород нефтяных месторождений Пермского края. Измерение пористости проводилось на автоматизированном порозиметре-пермеаметре АР-608 и системе рентгеновской томографии Nikon XT H 225. Описаны методики измерения объемов пор образцов газоволюметрическим методом, бинаризации изображений и расчета пористости по методу рентгеновской томографии. Результаты анализа показали, что изучаемые методы дают различающиеся значения коэффициентов пористости в зависимости от литологического состава пород. Для карбонатных пород характерно большее соответствие оценки коэффициента пористости, полученных различными методами, что обусловлено структурными особенностями порового пространства. В терригенных породах установлены значительные различия, объясняемые ограниченной разрешающей способностью рентгеновской томографии. По итогам анализа получены статистические модели для оценки и корректировки данных $K_п$, полученных методом рентгеновской томографии для терригенных и карбонатных пород в различных диапазонах значений $K_п$. Результаты исследования могут быть использованы при петрофизическом обосновании фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов месторождений нефти и газа.

Ключевые слова
пористость, керн, терригенные коллекторы, карбонатные коллекторы, петрофизика, рентгеновская томография, газоволюметрия, статистический анализ

Для цитирования
Galkin V.I., Melkishev O.A., Savitsky Ya.V. Statistical Analysis of determining porosity factor of oil and gas reservoir rocks using gas volumetry and X-Ray tomography methods. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):221–231. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-299

© Галкин В. И., Мелкишев О. А., Савицкий Я. В., 2025

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

Statistical analysis of determining porosity factor of oil and gas reservoir rocks using gas volumetry and X-Ray tomography methods

V.I. Galkin, O.A. Melkishev, Ya.V. Savitsky ✉
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
✉ *yansavitsky@yandex.ru*

Abstract
To address the current challenges in oil industry related to modeling a pore space structure in a 3D core model and evaluating permeability and porosity ("Digital Core"), it is necessary to obtain representative characteristics of the void space. A similar characteristic is required to solve geotechnical problems related to modeling and evaluating the strength properties of heterogeneous rocks. In addition, it is also important for research on capillary processes in porous media. The paper is devoted to the comparative analysis of the values of porosity of oil and gas reservoir rocks obtained by gas volumetry and X-ray computer tomography methods. The aim of this work is to develop statistical models for assessing the discrepancy between the porosity factor K_p determined using computer tomography (CT) data and more reliable laboratory petrophysical data for two lithological rock types: terrigenous and carbonate. The research objectives include: assessing the impact of lithology on the K_p evaluation using various methods (petrophysics and CT); examining and evaluating the impact of the reservoir rocks porosity factor range on the convergence of the results from these two methods for different lithological rock types; building statistical models to adjust the K_p values based on CT results for different lithological rock types. The solution to these problems is based on a detailed statistical analysis of the studies of terrigenous and carbonates rocks in oil fields in the Perm region. Porosity measurement was carried out on a AP-608 automated porosimeter-permeameter and a Nikon XT H 225 X-ray tomography system. The techniques for measuring the volume of pores in samples using the gas volumetry method, image binarization, and porosity calculation using the X-ray tomography method are described. The results of the analysis showed that the studied methods give different values of porosity factors depending on the lithology. For carbonate rocks, a greater correspondence of the porosity factor estimates obtained by different methods is characteristic that is due to the structural features of the pore space. Significant differences were found for terrigenous rocks, which are explained by the limited resolution of X-ray tomography. The analysis resulted in statistical models for evaluating and correcting K_p data obtained by X-ray tomography for terrigenous and carbonate rocks in various K_p value ranges. The results of the study can be used for petrophysical substantiation of the permeability and porosity of reservoir rocks in oil and gas fields.

Keywords
porosity, core, terrigenous reservoirs, carbonate reservoirs, petrophysics, X-ray tomography, gas volumetry, statistical analysis

For citation
Galkin V.I., Melkishev O.A., Savitsky Ya.V. Statistical Analysis of determining porosity factor of oil and gas reservoir rocks using gas volumetry and X-Ray tomography methods. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):221–231. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-299

Введение

Одной из важнейших характеристик, позволяющих проводить подсчет запасов и учитываемых при поисках, разведке и разработке месторождений нефти и газа, является коэффициент пористости $K_п$. Несмотря на существование проблемы масштабирования физических характеристик между коллектором и отдельными образцами [1, 2], наиболее доступными и надежными методами изучения являются непосредственные лабораторные петрофизические исследования образцов керна, среди которых оценка коэффициента пористости является одной из самых точных и достоверных.

За последние два десятилетия появилось значительное количество публикаций с результатами томографических исследований керна. В работах зарубежных и отечественных исследователей приведены данные для образцов различного размера и литологического состава. Так, работы [3, 4] посвящены обзору возможностей метода в обширных видах геологических исследований, в том числе и в изучении карбонатных пород-коллекторов. Статьи [5, 6] посвящены исследованиям кернов морских осадков, при этом хотя в работе [6] статистический анализ пористости терригенных и карбонатных отложений и проводится, однако, к сожалению, он относится только к полноразмерным образцам, которым и посвящена работа. Статьи [7, 8] также являются обзорными, в них даны лишь общие описания принципов томографии и приведены примеры использования метода без их статистического анализа. В статье [9] приводится опыт исследования пористости керна, однако вследствие невысокой разрешающей способности авторы ограничиваются расчетом каверновой пористости. Авто-

ры работы [10] провели сопоставление результатов измерения пористости по томографии и газволюметрии, сравнение по литотипам, однако исследовано было лишь 14 образцов, кроме того, для томографии образцы обрезались до цилиндров со стороной 5–20 мм, что значительно повлияло на результаты. Таким образом, полноценного статистического сравнения определения пористости образцов стандартных размеров методами рентгеновской томографии и другими методами с учетом особенностей литологии изучаемых коллекторов проведено не было, хотя некоторые исследователи признают необходимость такого сопоставления [11].

Для решения актуальных задач в нефтяной отрасли, связанных с моделированием структуры порового пространства в 3D-модели керна и оценкой фильтрационно-емкостных свойств («Цифровой керн»), необходимо получение представительной характеристики пустотного пространства. Аналогичная характеристика требуется для решения задач геомеханики, связанных с моделированием и оценкой прочностных свойств неоднородных горных пород. Кроме того, она важна для исследований капиллярных процессов в пористых средах.

Лабораторные петрофизические исследования образцов керна позволяют оценивать только единственную интегральную характеристику образца керна – коэффициенты открытой и общей пористости образца. Однако для компьютерного 3D-моделирования различных процессов в керне горных пород таких интегральных значений недостаточно, что вызывает необходимость применения неразрушающих объемных методов исследования образцов керна, таких как рентгеновская компьютерная томография (КТ), которая позволяет изучать внутреннюю неоднородность образцов керна в объеме. Применение КТ, несмотря на современность и технологичность, имеет ряд проблем, связанных с разрешающей способностью метода для оценки неоднородности горной породы в области малых по физическому размеру неоднородностей (мелких пор), то есть микропористости.

С целью приведения оценок пористости, определяемых разными методами, к единым величинам, в работе проведен статистический анализ значений коэффициентов пористости, полученных по стандартным лабораторным петрофизическим исследованиям образцов керна и по результатам КТ керна.

Целью работы является разработка статистических моделей для оценки расхождения определения коэффициента пористости по КТ с более достоверными данными лабораторной петрофизики для терригенных и карбонатных горных пород. Оценка данного расхождения позволит оценивать долю микропористости в компьютерных 3D-моделях керна по результатам КТ. Рассмотрение терригенных и карбонатных пород раздельно связано с существенными отличиями минерального состава, структурно-текстурных особенностей отложений, структуры порового пространства этих двух основных литологических типов осадочных горных пород.

Задачи исследования включают:

– оценку влияния литологического состава пород на оценку $K_п$ разными методами (петрофизика и КТ);

– оценку влияния диапазона варьирования $K_п$ на сходимость результатов двух методов (петрофизика и КТ) для разных литологических типов пород;

– построение моделей для корректировки значений $K_п$ по результатам КТ для разных литологических типов пород.

Решение данных задач основывается на проведении детального статистического анализа.

Теория

Существует два типа стандартных способов определения коэффициента пористости, широко применяемых в петрофизической практике, которые различаются по применяемой фазе: определение пористости жидкостенасыщением и определение пористости по газу (газоволюметрия). Данные способы измеряют не весь объем пор, а лишь те поры, которые связаны с поверхностью образца и между собой, составляющие, по классификации [12], открытую пористость. При этом использование жидкости либо газа позволяет заполнить их и с достаточной степенью точности измерить весь объем этих открытых и связанных пор. Разумеется, имеется также и способ, измеряющий полную и закрытую пористость (оценка $K_п$ через минералогическую плотность), однако он применяется реже, поскольку требует разрушения образцов [13].

Вместе с тем в последние годы все большее распространение в практике петрофизических исследований получает сравнительно новый метод изучения порового пространства – компьютерная рентгеновская томография. Данный метод позволяет визуализировать поровое пространство внутри образца, что дает возможность качественно оценить пористость и установить взаимосвязь между ее распределением и литологической характеристикой исследуемого образца. При этом главным недостатком применения метода рентгеновской компьютерной томографии в стандартном петрофизическом комплексе исследований является низкая разрешающая способность. Данный метод позволяет визуализировать лишь поры, имеющие размеры до первых микрон, что приводит к существенной недооценке объема порового пространства, в результате чего коэффициент пористости, рассчитанный с помощью метода рентгеновской томографии, получается меньше, чем измеренный стандартными методами жидкостенасыщения и газоволюметрии.

Можно предположить, что степень близости значений коэффициентов пористости, рассчитанных по методам газоволюметрии-жидкостенасыщения и методу рентгеновской томографии, будет существенно зависеть от доминирующих размеров и количественного соотношения отдельных типов пор в исследуемом образце керна: открытых и закрытых, связанных и изолированных, крупных и мелких. По мнению авторов данной статьи, в основном это будет определяться литологическим составом образцов. Среди исследуемых типов горных пород-коллекторов струк-

тура порового пространства будет наиболее сильно отличаться для карбонатных и терригенных пород.

Для карбонатных коллекторов, как известно, характерна крайне неоднородная структура порового пространства, представленная и межзерновыми, и внутриформенными порами, кавернами и трещинами. Зачастую в некоторых типах карбонатных коллекторов, например, в известняках структурного типа грейнстоунов [14], большая часть емкостного пространства может быть представлена крупными кавернами и трещинами, что делает его хорошо визуализируемым с помощью метода рентгеновской томографии. Вместе с тем характер структуры емкостного пространства карбонатов не исключает наличия в образце некоторой доли закрытых пор, которые могут быть не обнаружены методами газоволюметрии и жидкостенасыщения, способных измерять только открытую пористость. Поэтому можно ожидать, что коэффициенты пористости карбонатных пород, определенные стандартными методами и методом рентгеновской томографии, могут быть близки по значениям друг к другу, но при этом быть сложены различными объемами.

Емкостное пространство терригенных пород-коллекторов характеризуется большей однородностью и степенью связности в силу преимущественно межзернового характера. Породы подобного состава образуют коллекторы гранулярного типа, близко описываемые моделью Слихтера, проницаемость в которой определяется пористостью и диаметром частиц [15]. Вместе с тем размеры отдельных элементов пустотного пространства этого типа пород обладают размерами, находящимися ниже границы разрешающей способности метода рентгеновской томографии. При этом, стоит отметить, что, несмотря на существование высокоразрешающих методов микро- и нанотомографии, данные методы возможно использовать лишь для отдельно изготовленных образцов миллиметровых размеров, как показано в работе [16], что исключает сравнение с определением коэффициента пористости с помощью стандартных методов, проводимых на цилиндрических образцах стандартным диаметром 30 или 25 мм.

Таким образом, в данной работе проводится сравнение оценок коэффициентов пористости, полученных разными методами на одних и тех же образцах стандартного размера карбонатного и терригенного состава.

Материалы и методы

Исследуемые образцы керна нефтяных месторождений Пермского края представлены выпиленными из полноразмерного керна цилиндрами стандартного диаметра и высотой 30 мм. Образцы относились к двум литологическим группам пород: терригенным и карбонатным.

Терригенные образцы представлены преимущественно песчаниками, алевритистыми песчаниками по составу кварцевыми и полевошпатово-кварцевыми; серыми, темно-серыми, бурыми и коричневыми; мелкозернистыми, среднемелкозернистыми и крупнозернистыми; разной степени сортированности; конформные либо цементированные глинистым, кальцитовым или железистым цементом; крепкие либо средней крепости, с минеральными включениями слюд, рудных минералов, пирита.

Карбонатные образцы представлены известняками, доломитами и доломитизированными известняками светло-серыми, серыми, темно-серыми; органогенными, детритовыми, органогенно-детритовыми, комковато-детритовыми, комковато-водорослевыми, водорослевыми; иногда слабоглинистыми и глинистыми; пористыми, пористо-кавернозными и кавернозными; крепкими с частым присутствием стилолитовых швов и трещин, иногда выполненных кристаллами кальцита.

Для выполнения исследования проводилось измерение пористости газоволюметрическим методом ($K_п$, %) и с помощью метода рентгеновской компьютерной томографии ($K_п^т$, %).

Газоволюметрический метод выбран авторами по нескольким причинам: во-первых, данный метод является достаточно быстрым (на измерение одного образца в среднем требуется не более часа) и сравнительно простым и, как следствие, он наиболее часто применяется в петрофизических лабораториях; во-вторых, использование химически инертного газа вместо жидкости позволяет гарантированно исключить изменение образцов, вызванное, например, случайным нарушением технологии промывания и сушки образца после эксперимента по насыщению либо химического взаимодействия между жидкостью и минеральным скелетом образца.

Измерения пористости выполнялись на автоматизированном порозиметре-пермеаметре AP-608 (Coretest Systems, США). Принцип действия данной установки осуществляется методом нестационарной фильтрации [17].

Суть метода заключается в измерении порового объема с использованием принципа расширения гелия по закону Бойля, который гласит, что давление P какого-либо идеального газа, умноженное на его объем V, дает постоянное значение при постоянной температуре. Применительно к анализу керна закон Бойля заключается в способности определять неизвестный объем по расширению газа с известными значениями давления и температуры в пустое пространство и в использовании полученного давления для расчета неизвестного объема. Следовательно, зная P_1, P_2 и V_2, можно рассчитать V_1:

$$V_1 = \frac{P_2 \cdot V_2}{P_1}. \quad (1)$$

При этом в порозиметре-пермеаметре AP-608 закачка гелия осуществляется с обоих концов образца. Диапазон проницаемости образцов, доступных для измерения на данной установке, составляет от 0,001 мД (породы с подобной проницаемостью не относятся к коллекторам) до 5000 мД. Соответственно, измеряемый диапазон пористости составляет от 0,1 до 40 %, что также перекрывает диапазоны, свойственные терригенным и карбонатным коллекторам.

Методика подготовки и измерения образцов соответствует ГОСТ[1] и заключалась в предварительном высушивании тщательно экстрагированных в спиртобензольной смеси образцов с помощью сушильного шкафа. Время и температура сушки образцов составляли не менее 8 ч и 105 °C для карбонатных пород и не менее 12 ч и 80 °C для терригенных пород. После сушки образцы остужались в эксикаторе, их геометрические характеристики измерялись с помощью электронного штангенциркуля, а далее проводилось определение коэффициента пористости с помощью установки АР-608. Все измерения проводились не менее пяти раз, по результатам всех пяти измерений рассчитывалось среднее арифметическое, которое и является определенным значением для каждого образца.

Вторым анализируемым в статье методом является компьютерная рентгеновская томография керна. Метод был разработан А. Кормаком и Г. Хаунсфилдом [18] и основан на преобразованиях Радона [19]. Суть метода заключается в создании серии рентгеновских снимков, получаемых при прохождении рентгеновского излучения через вращающийся вдоль одной оси образец. Полученные рентгеновские снимки преобразуются через обратное преобразование интеграла от функции прямой, направленной перпендикулярно вектору, который направлен вдоль направления излучения на определенном и измеренном вдоль него расстоянии.

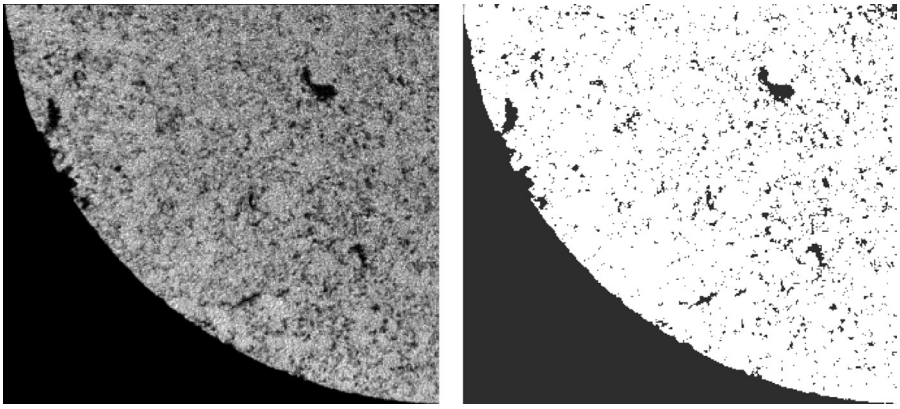
В нашем исследовании для проведения рентгеновской томографии применялась система рентгеновского контроля с функцией компьютерной томографии Nikon XT H 225 (Nikon Metrology, Великобритания). Данная система имеет конструкцию, состоящую из стационарного источника рентгеновского излучения, образующего фокальное пятно размером 3 мкм, трехпозиционного вращающегося столика и детектора 2048×1408 пк, с физическим размером пикселя 142 мкм. Система позволяет изучать образцы стандартного диаметра 30 мм с разрешением до 20 мкм.

Съемка образцов проводилась на напряжениях источника излучения от 150 до 180 кВ, силе тока от 100 до 150 мА, с применением медного фильтра толщиной 0,5 мм, экспозиции 0,5 с, количеством снимков не менее 3000. Все образцы располагались так, чтобы разрешение получаемой реконструкции составляло не менее 25 мкм. Неоднородности размером менее 1 вокселя (25 мкм) относятся к так называемой микропористости, которую, в отличие от более крупной макропористости, невозможно различить с высокой точностью и напрямую геометрически выделить в образце. На практике для выделения такой пористости в образцах применяют ряд допущений. Например, о том, что микропоры располагаются по поверхности крупных пор, или микропоры могут быть локализованы в областях контакта зерен минералов, или же они распределены достаточно равномерно по объему минерального скелета. Однако для всех этих допущений необходимо оценивать долю этой микропористости.

Реконструкция объемного изображения производилась с помощью проприетарного программного обеспечения CT Pro 3D (Nikon Metrology, Великобритания), использующего для процедуры реконструкции усовершенствованную версию одного из наиболее распространенных алгоритмов FDK [20]. Реконструированные изображения обрабатывались в программе Avizo Fire (Visualization Science Group, Франция).

Методика обработки изображений образцов с целью получения объема порового пространства проводилась следующим образом. В исходной реконструкции – 32-битном черно-белом трехмерном изображении, где наиболее светлые участки соответствуют областям максимальной плотности (минеральному скелету), а наиболее темные – пустотному пространству, – была выполнена процедура бинаризации. Суть процедуры бинаризации заключается в том, что весь диапазон оттенков серого разделяется на два объема со значениями 0 и 1, соответствующими объемам пор и скелета (рис. 1).

[1] ГОСТ 26450.0-85–ГОСТ 26450.2-85. Породы горные. Методы определения коллекторских свойств. М.: Издательство стандартов; 1985. 16 с.



а *б*

Рис. 1. Выделение на фрагменте черно-белого изображения горной породы:
а – реконструированное изображение сечения образца в оттенках серого, пропорционального поглощению материала (черный – не поглощает, белый – поглощает); *б* – выделение на фрагменте черно-белого изображения горной породы пустотного пространства (черный – воздух в порах и вокруг образца; белый – минеральный скелет)

Данные объемы, в свою очередь, уже могут быть измерены программными инструментами.

Расчет коэффициента пористости образца по томографии $K_п^т$ производился с помощью стандартной формулы расчета пористости:

$$K_п^т = \frac{V_{por}}{V_{vol}} \cdot 100, \quad (2)$$

где V_{por} – объем бинаризованной модели порового пространства образца, мм³; V_{vol} – объем бинаризованной модели всего пространства образца, мм³.

Результаты и анализ полученных данных

В данной части рассмотрены вопросы статистического анализа значений коэффициентов пористости, полученных описанными выше способами. На рис. 2 приведено сопоставление значений коэффициентов пористости, полученных газоволюметрическим методом ($K_п$, %) и методом рентгеновской томографии ($K_п^т$, %) для терригенных и карбонатных пород.

Для терригенных пород средние значения пористости для $K_п^т$ и $K_п$ равны 8,71 и 10,76 % соответственно при среднеквадратических отклонениях 6,17 и 5,82 %.

Для карбонатных пород средние значения пористости для $K_п^т$ и $K_п$ равны 21,43 и 22,00 % соответственно при среднеквадратических отклонениях 5,51 и 5,43 %.

Анализ приведенных корреляционных полей показывает, что соотношения значений $K_п$ и $K_п^т$ для изучаемых пород располагаются в различных диапазонах. Для терригенных пород значения $K_п$ и $K_п^т$ более низкие, чем для карбонатных. Сравнения средних значений по $K_п$ и $K_п^т$ для изучаемых пород выполнены по t-критерию Стьюдента и приведены в табл. 1.

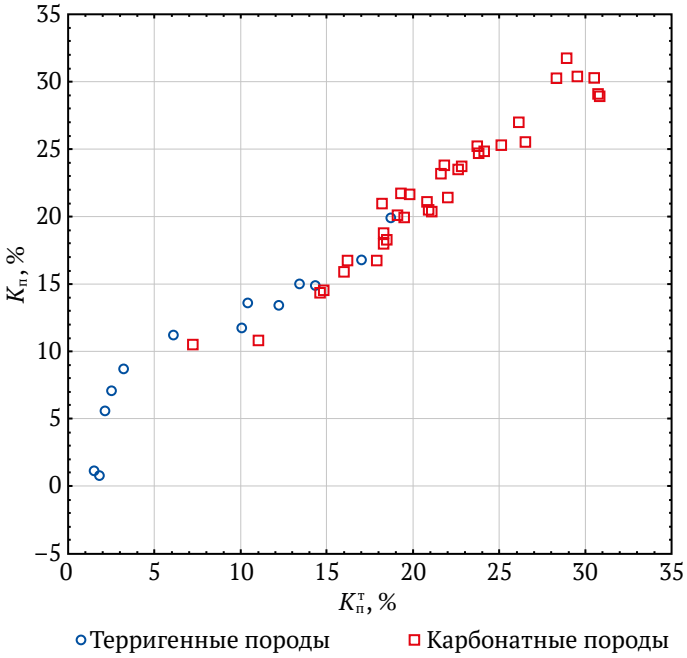


Рис. 2. Поля корреляции между $K_п$ и $K_п^т$ для различных пород

Таблица 1

Сравнение средних значений $K_п$ и $K_п^т$ для различных типов пород

Породы	Средние значение ± стандартное отклонение		Критерии $\frac{t}{p}$
	$K_п$, %	$K_п^т$, %	
Терригенные	10,76±5,82	8,71±6,17	$\frac{0,866}{0,395}$
Карбонатные	22,00±5,43	21,43±5,51	$\frac{0,431}{0,668}$

Отсюда видно, что средние значения коэффициентов пористости, определенные разными методами, статистически не различаются (достигаемый уровень значимости $p > 0,05$). При этом визуальный анализ корреляционных полей между $K_п$ и $K_п^т$ как для терригенных, так и для карбонатных пород показывает, что в пределах корреляционных полей наблюдаются различные соотношения в зависимости от значений $K_п$ и $K_п^т$. В целом результаты оценки средних $K_п$ и $K_п^т$ статистически не противоречат друг другу, однако требуют более детального рассмотрения по диапазонам пористости. При этом средние значения по КТ всегда ниже, несмотря на разную литологию, что указывает на сложности и некоторую недооценку $K_п$ для микропористости в силу физических ограничений метода КТ.

Для установления различных соотношений между $K_п$ и $K_п^т$ дифференцированно, в зависимости от литологии и диапазона $K_п$, расположим значения $K_п$ образцов по возрастанию, где их количество увеличивалось на один (n = 3, n = 4, n = 5, ..., n = 33 для карбонатных и n = 13 для терригенных пород). Общее количество рассматриваемых моделей определяется объемом выборки. Для каждого рассматриваемого диапазона значений $K_п$ по n значениям проведем регрессионный анализ $K_п = f(K_п^т)$ с оценкой парного коэффициента корреляции r и статистических характеристик коэффициентов уравнений регрессий.

Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$K_п = b + k \cdot K_п^т, \quad (3)$$

где $K_п$ – значения коэффициента пористости, полученные газоволюметрическим методом, %; $K_п^т$ – значения коэффициента пористости, полученные методом рентгеновской томографии, %; b – свободный член в уравнении регрессии; k – угловой коэффициент в уравнении регрессии.

Для карбонатных пород параметры уравнений регрессии приведены в табл. 2.

Для карбонатных пород было построено 33 уравнения регрессии, значения коэффициента корреляции r изменялись от 0,892 до 0,975.

По статистическим характеристикам разработанных моделей построены зависимости изменения значений свободных членов уравнений регрессий, угловых коэффициентов при $K_п^т$ и значений коэффициентов корреляции r (рис. 3–5).

Анализ показывает, что соотношения между изучаемыми величинами характеризуются двумя видами: при $K_п$ < 24 %, при увеличении диапазона $K_п$ происходит закономерное уменьшение свободных членов; при ещё большем увеличении $K_п$ значения свободных членов изменяются незначительно.

Результаты свидетельствуют, что соотношения между изучаемыми величинами также характеризуются двумя видами: при $K_п$ < 24 %, при повышении $K_п$ происходит закономерное повышение коэффициентов при $K_п^т$; при ещё большем увеличении $K_п$ значения коэффициентов изменяются незначительно и находятся в диапазоне 0,97–0,98.

Отсюда видно, что соотношения между изучаемыми величинами также характеризуются двумя видами: при $K_п$ < 22 %, при повышении $K_п$ происходит первоначально повышение значений *r*. При $K_п$ < 23 % наблюдается снижение *r*. При ещё большем увеличении диапазона $K_п$ значения коэффициентов повышаются по сложной траектории.

Таблица 2

Уравнения регрессии зависимостей $K_п$ от $K_п^т$ (карбонатные породы)

Интервал значений $K_п$, %	Свободный член *b*	*t* при свободном члене	Угловой коэффициент *k* при $K_п^т$	*t* при $K_п^т$	Коэффициент корреляции *r*	Достигаемый уровень значимости *r*-*p*
10,51–14,35	6,260	2,281	0,515	1,974	0,892	p = 0,299
10,51–14,53	5,842	2,889	0,636	3,428	0,924	p = 0,076
10,51–15,91	5,842	2,998	0,630	4,754*	0,939	p = 0,018
10,51–16,74	4,609	2,666	0,692	5,474*	0,939	p = 0,005
10,51–16,74	4,745	3,306*	0,679	6,797*	0,949	p = 0,001
10,51–17,98	4,388	3,352*	0,709	8,096*	0,957	p = 0,0002
10,51–18,29	4,112	3,369*	0,735	9,242*	0,961	p = 0,00004
10,51–18,77	3,773	3,030*	0,765	9,629*	0,959	$p < 10^{-5}$
10,51–19,97	3,329	2,675*	0,801	10,329*	0,960	$p < 10^{-5}$
10,51–20,10	2,952	2,284*	0,832	10,515*	0,957	$p < 10^{-5}$
10,51–20,42	2,986	2,550*	0,83	11,864*	0,963	$p < 10^{-5}$
10,51–20,53	2,925	2,693*	0,834	13,112*	0,967	$p < 10^{-5}$
10,51–20,96	2,764	1,973	0,855	10,469*	0,945	$p < 10^{-5}$
10,51–21,10	2,629	1,978	0,865	11,325*	0,946	$p < 10^{-5}$
10,51–21,40	2,705	1,879	0,860	12,262*	0,953	$p < 10^{-5}$
10,51–21,64	2,705	1,899	0,860	11,979*	0,948	$p < 10^{-5}$
10,51–21,72	2,313	1,644	0,895	11,388*	0,940	$p < 10^{-5}$
10,51–23,19	1,981	1,419	0,918	11,912*	0,942	$p < 10^{-5}$
10,51–23,51	1,787	1,341	0,931	12,815*	0,946	$p < 10^{-5}$
10,51–23,76	1,614	1,264	0,942	13,705*	0,950	$p < 10^{-5}$
10,51–23,78	1,456	1,01	0,957	12,402*	0,938	$p < 10^{-5}$
10,51–24,71	1,238	1,015	0,968	15,046*	0,954	$p < 10^{-5}$
10,51–24,86	1,169	1,008	0,972	16,076*	0,958	$p < 10^{-5}$
10,51-25,18	0,989	0,874	0,984	16,894*	0,960	$p < 10^{-5}$
10,51–25,30	1,076	1,074	0,978	17,877*	0,963	$p < 10^{-5}$
10,51–25,54	1,437	1,384	0,957	18,349*	0,963	$p < 10^{-5}$
10,51–27,02	1,303	1,321	0,964	19,559*	0,966	$p < 10^{-5}$
10,51–28,94	1,321	1,387	0,970	20,292*	0,967	$p < 10^{-5}$
10,51–29,14	1,385	1,396	0,961	21,476*	0,969	$p < 10^{-5}$
10,51–30,25	1,585	1,643	0,962	22,080*	0,970	$p < 10^{-5}$
10,51–30,27	1,436	1,532	0,961	23,640*	0,973	$p < 10^{-5}$
10,51–30,40	1,575	1,541	0,979	24,909*	0,975	$p < 10^{-5}$
10,51–31,76	1,419	1,647	0,970	24,639*	0,973	$p < 10^{-5}$

* – статистически значимые значения ($p \leqslant 0,05$).

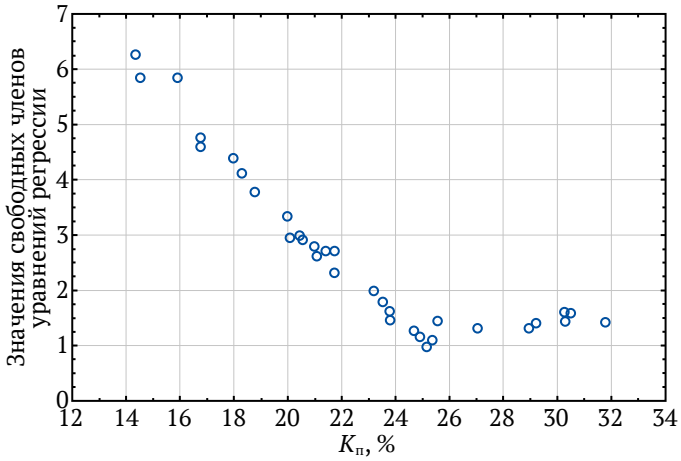


Рис. 3. Изменения значений свободных членов уравнений регрессии в зависимости от $K_п$ (карбонатные породы)

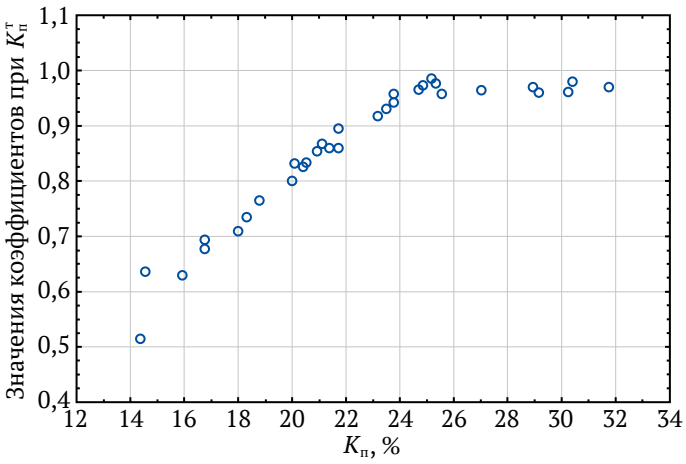


Рис. 4. Изменения значений угловых коэффициентов при $K_п^т$ в уравнениях регрессии в зависимости от $K_п$ (карбонатные породы)

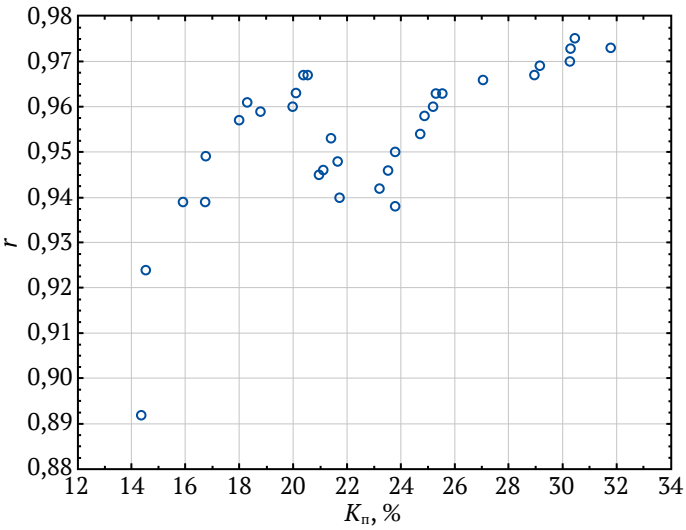


Рис. 5. Изменения значений коэффициентов корреляции r в зависимости от $K_п$ (карбонатные породы)

Вышеприведенный анализ зависимостей $K_п$ и $K_п^т$ в карбонатных породах показал, что представляется возможным выделить две границы, дифференцирующие величины $K_п^т$ на три группы: первая – при $K_п^т$ < 16,0 %; вторая – при 16,0 % ⩽ $K_п^т$ < 22,6%; третья – при $K_п^т$ ⩾ 22,6 %

Первая группа при $K_п^т$ < 16,0 %, в которой зависимость $K_п$ от $K_п^т$ является статистически незначимой. При $K_п^т$ от 16,0 до 22,6% наблюдаются статистически значимые корреляции между изучаемыми величинами. Для определения значений $K_п$ от $K_п^т$ необходимо производить корректировку, используя уравнение регрессии, приведенное в табл. 4. При $K_п^т$ ⩾ 22,6% также нужно проводить корректировку значений по формуле, приведенной в табл. 3.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что значения $K_п^т$, полученные методом рентгеновской томографии для карбонатных пород, несмотря на статистическое равенство средних значений, характеризуются различными статистическими связями. При $K_п^т$ < 16,0% наблюдается отсутствие значимой корреляционной связи с $K_п$. Это свидетельствует о том, что по данным методам получаем различные значения коэффициентов пористости. При $K_п^т$ ⩾ 16,0 % значения $K_п^т$ и $K_п$ статистически контролируют друг друга. При этом необходимо отметить, что на определенных интервалах значений величины свободных членов являются статистически значимыми. Это свидетельствует о том, что наблюдается корректировка значений $K_п$ свободными членами уравнений регрессии. Поэтому для корректного использования величин $K_п^т$ и $K_п$ в карбонатных породах необходимо использование полученных уравнений регрессии для диапазонов $K_п$.

Аналогичный анализ выполнен и для терригенных пород (табл. 4).

Для терригенных пород было построено 11 уравнений регрессии, значения r изменялись от 0,806 до 0,937. Анализ свободных членов уравнений регрессии показывает, что при $K_п^т$ < 11,75 % наблюдается изменение их от отрицательных к положительным значениям. Значения угловых коэффициентов при $K_п^т$ также характеризуются закономерным изменением от высоких значений (больше 1) к низким (меньше 1). Изменения значений коэффициентов корреляции r приведены на рис. 6.

Анализ показывает, что соотношения между изучаемыми величинами также характеризуются двумя видами: при $K_п$ < 12 %, при повышении $K_п$ происходит хаотичное изменение значений r; при увеличении диапазона $K_п$ происходит закономерное повышение значений от 0,849 до 0,937.

Анализ построенных уравнений регрессии показал, что при $K_п^т$ ⩽ 7,1 % зависимость $K_п$ от $K_п^т$ является статистически незначимой. При $K_п^т$ > 7,1 % получено статистически значимое уравнение регрессии:

$$K_п = 6{,}349 + 0{,}63905 K_п^т, \quad \text{при } r = 0{,}964,\ p = 0{,}00002. \tag{4}$$

Это свидетельствует о том, что соотношения между $K_п$ и $K_п^т$ характеризуются наличием статистической связи.

Таблица 3

Уравнения регрессии зависимостей $K_п$ от $K_п^т$ (карбонатные породы)

Интервал значений $K_п$, %	Свободный член *b*	*t* при свободном члене	Угловой коэффициент *k* при $K_п^т$	*t* при $K_п^т$	Коэффициент корреляции *r*	Достигаемый уровень значимости *r-p*
$K_п^т$ < 16,0 %	6,260	2,116	0,514849	1,974	0,892	p = 0,299
16,0 % ⩽ $K_п^т$ < 22,6 %	−0,940	−0,359	1,080430	8,054	0,884	$p < 10^{-5}$
$K_п^т$ ⩾ 22,6 %	7,709	3,408	0,766514	8,932	0,942	$p < 10^{-5}$

Таблица 4

Уравнения регрессии зависимостей $K_п$ от $K_п^т$ (терригенные породы)

Интервал значений $K_п$, %	Свободный член *b*	*t* при свободном члене	Угловой коэффициент *k* при $K_п^т$	*t* при $K_п^т$	Коэффициент корреляции *r*	Достигаемый уровень значимости *r-p*
0,8–5,6	−10,703	−1,267	7,312	1,579	0,844	p = 0,360
0,8–7,1	−9,935	−2,535	6,864	3,528	0,928	p = 0,072
0,8–8,7	−6,456	−2,427	5,000	4,324*	0,928	p =0,002
0,8–11,2	−0,248	−0,118	2,091	3,238*	0,850	p = 0,032
0,8–11,75	2,166	1,195	1,14	3,053*	0,806	p = 0,028
0,8–13,43	2,638	1,698	0,997	3,942*	0,849	p = 0,008
0,8–13,60	2,579	1,805	1,004	4,812*	0,876	p = 0,0001
0,8–14,88	2,864	2,187*	0,927	5,607*	0,892	p = 0,0005
0,8–15,00	2,887	2,373*	0,92	6,477*	0,907	p = 0,0001
0,8–16,8	3,098	2,736*	0,875	7,384*	0,919	p = 0,00002
0,8–19,9	3,048	2,923*	0,884	8,943*	0,937	$p < 10^{-5}$

* – статистически значимые значения (p ⩽ 0,05).

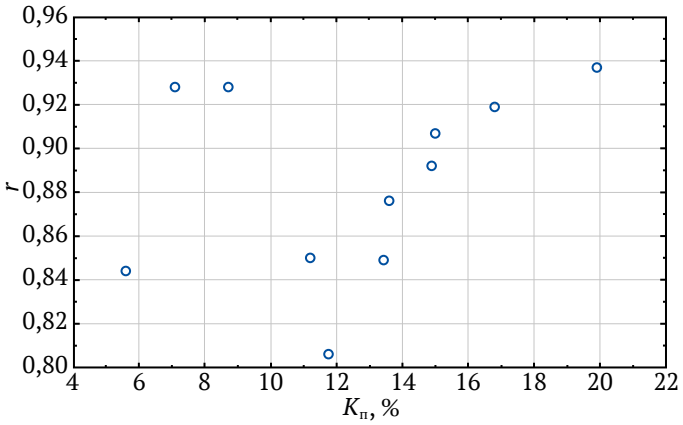


Рис. 6. Изменения значений коэффициентов корреляции *r* в зависимости от $K_п$ (терригенные породы)

Практическое применение и направление дальнейших исследований

Таким образом, выполненные исследования показывают, что данные методы не заменяют, а дополняют друг друга, поскольку обладают различающимися ограничениями в применении. Вместе с тем проведенный статистический анализ показал, что использование обоих методов дает естественным образом отличающиеся, но статистически связанные результаты, что демонстрирует возможность их совместного применения. Важно также то, что при исследованиях образцов различных литологических типов коллекторов методы имеют различные ограничения:

1) при исследованиях карбонатных образцов оба метода показывают статистически значимые коэффициенты корреляции между $K_п$ и $K_п^т$ при значениях $K_п$ по газоволюметрическому методу более 16%, что может объясняться более крупными размерами пустот;

2) при исследованиях терригенных образцов пористость наиболее точно определяется при значениях пористости $K_п$ более 7,1 %, что может быть связано со слабым заполнением межзерновых пустот цементом или хорошей сортированностью материала.

Применение рекомендуемых уравнений для литотипов по диапазонам $K_п$ позволяет получать интегральную оценку микропористости как разность между оценкой $K_п$ по уравнению и значением $K_п^т$ по данным КТ. Особенно это применимо к образцам неправильной или сложной формы, которые не всегда возможно полноценно исследовать в петрофизической лаборатории. Такая интегральная оценка микропористости позволяет получить ограничение на суммарный объем распределяемых микропор, что повысит качество объемных компьютерных моделей керна и порового пространства пород-коллекторов.

Результаты исследования могут быть использованы при петрофизическом обосновании фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов месторождений нефти и газа.

Использование предлагаемого подхода позволяет повысить качество 3D-моделей керна горных пород, что в конечном итоге приведет к повышению точности различных методов моделирования, связанных со свойствами горных пород, и позволит более рацио-

нально и с наибольшей экономической эффективностью разрабатывать месторождения нефти и газа (или других полезных ископаемых).

Дальнейшие направления исследований представляются авторам в продолжении экспериментов при увеличении количества и разнообразия образцов, что позволит уточнить полученные зависимости, а также в учете дополнительных стандартных характеристик керна (значение коэффициента остаточной нефтенасыщенности, капиллярные кривые и др.).

Заключение

Выполненные исследования убедительно показывают, что при комплексном использовании данных по коэффициентам пористости, полученных разными способами как для карбонатных, так и для терригенных пород, полученные результаты должны сопоставляться.

Результаты оценки средних между $K_п$ и $K_п^т$ по терригенным и карбонатным породам статистически не противоречат друг другу. При этом средние значения по КТ всегда ниже, несмотря на разную литологию, что указывает на сложности и некоторую недооценку $K_п$ для микропористости, в силу физических ограничений и особенностей метода КТ.

Выполненные исследования показывают, что значения $K_п$ и $K_п^т$, полученные методом рентгеновской томографии для карбонатных пород, при $K_п^т < 16{,}0$ % не имеют связи с $K_п$. Для значений вне этого диапазона предложены уравнения оценки и корректировки значений $K_п$.

Анализ построенных уравнений регрессии для терригенных пород показал, что при $K_п^т \leqslant 7{,}1$ % зависимость $K_п$ от $K_п^т$ является статистически незначимой. Для значений вне этого диапазона предложены уравнения для оценки и корректировки значений $K_п$.

Применение рекомендуемых уравнений для литотипов по диапазонам $K_п$ позволяет получать интегральную оценку микропористости как разность между оценкой $K_п$ по уравнению и значением $K_п^т$ по данным КТ. Предлагаемые подходы позволяют повысить качество объемных 3D-моделей структуры порового пространства горных пород.

Список литературы / References

1. *Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом*. Под ред. В.И. Петерсилье, В.И. Пороскуна, Г.Г. Яценко. М.: Недра; 2003. 258 с.
Petersilie V.I., Poroskun V.I., Yatsenko G.G. (eds.) *Methodological guidelines for calculating geological reserves of oil and gas using the volumetric method*. Moscow: Nedra; 2003. 258 p. (In Russ.)
2. Хасанов Д.И., Лоншаков М.А. Исследование масштабного эффекта и понятия элементарного представительного объёма горных пород применительно к пористости. *Георесурсы*. 2020;22(4):55–69. https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.55-69
Khassanov D.I., Lonshakov M.A. Investigation of the scale effect and the concept of a representative volume element of rocks in relation to porosity. *Georesources*. 2020;22(4):55–69. https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.55-69
3. Ketcham R.A., Carlson W.D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*. 2001;27(4):381–400. https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00116-3
4. Vinegar H.J. X-ray CT and NMR imaging of rocks. *Journal of Petroleum Technology*. 1986;38(03):257–259. https://doi.org/10.2118/15277-PA
5. Renter J.A.M. Applications of computerized tomography in sedimentology. *Marine Geotechnology*. 1989;8(3):201–211. https://doi.org/10.1080/10641198909379868
6. Wolanski K., Zarudzki W., Kiersnowski H., et al. X-ray computed tomography (CT) applied for rock core analysis. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2017;17(5):43–50.
7. Хозяинов М.С., Вайнберг Э.И. Вычислительная микротомография – новая информационная технология неразрушающего исследования внутренней микроструктуры образцов геологических пород. *Геоинформатика*. 1992;(1):42–50.
Khoziainov M.S., Weinberg E.I. Computational microtomography – a new information technology for non-destructive study of internal microstructure of geological rock samples. *Geoinformatika*. 1992;(1):42–50. (In Russ.)
8. Воробьев К.А., Воробьев А.Е., Тчаро Х. Цифровизация нефтяной промышленности: технология «цифровой» керн. *Вестник Евразийской науки*. 2018;10(3). URL: https://esj.today/PDF/78NZVN318.pdf
Vorobyev K.A., Vorobev A.E., Tcharo H. Oil industry digitization: technology “digital” core. *The Eurasian Scientific Journal*. 2018;10(3). URL: https://esj.today/PDF/78NZVN318.pdf (In Russ.)
9. Костин Д.К., Кузнецов Е.Г., Вилесов А.П. Опыт ООО «ТННЦ» по изучению керна с помощью рентгеновского компьютерного томографа. *Научно-технический вестник ОАО «НК Роснефть»*. 2014;(3):18–21.
Kostin D.K., Kuznetsov E.G., Vilesov A.P. Experience of TNNC LLC in core study using CT SCANNER. *Scientific and Technical Bulletin of Rosneft*. 2014;(3):18–21. (In Russ.)
10. Еременко Н.М., Муравьева Ю.А. Применение методов рентгеновской микротомографии для определения пористости в керне скважин. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2012;7(3):5.
Eremenko N.M., Murav’eva Yu.A. Application of the X-ray microtomography for porosity determination in borehole core. *Petroleum Geology. Theory and Practice*. 2012;7(3):5. (In Russ.)

11. Штырляева А.А., Журавлев А.В., Герасимова А.И. Перспективы и проблемы использования компьютерной микротомографии для изучения образцов керна. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2016;11(1):12. https://doi.org/10.17353/2070-5379/8_2016
Shtyrlyaeva A.A., Zhuravlev A.V., Gerasimova A.I. Prospects and problems of computer microtomography using for core samples studies. *Petroleum Geology. Theory and Practice*. 2016;11(1):12. (In Russ.) https://doi.org/10.17353/2070-5379/8_2016
12. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. *Петрофизика* (*Физика горных пород*). М.: РГУ нефти и газа им И.М. Губкина; 2004. 367 с.
Dobrynin V.M., Vendelstein B.Yu., Kozhevnikov D.A. *Petrophysics (Physics of Rocks)*. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas; 2004. 367 p. (In Russ.)
13. *Методические рекомендации по исследованию пород-коллекторов нефти и газа физическими и петрографическими методами*. Сост. Горян В.И., Березин Б.М., Белов Ю.Я. и др. Труды ВНИГНИ. М.: Недра; 1978. С. 87–111.
Methodological recommendations for the study of oil and gas reservoir rocks by physical and petrographic methods. Compiled by Goryan V.I., Berezin B.M., Belov Yu.A. et al. Proceedings of VNIGNI. Moscow: Nedra; 1978. Pp. 87–111. (In Russ.)
14. Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham V.E. (Ed.). *Classification of carbonate rocks: Symposium. American Association of Petroleum Geologists Memoir*. 1962;1:108–121.
15. Ромм Е.С. *Структурные модели порового пространства горных пород*. Л.: Недра; 1985. С. 8.
Romm E.S. *Structural models of pore space in rocks*. Leningrad: Nedra; 1985. P. 8. (In Russ.)
16. Бетелин В.Б., Смирнов Н.Н., Стамов Л.И., Скрылева Е.И. Восстановление структуры порового пространства на основании обработки данных томографии. *Вестник кибернетики*. 2018;(2):86–91.
Betelin V.B., Smirnov N.N., Stamov L.I., Skryleva E.I. Developing the structure of core pores based on processing of tomography data. *Proceedings in Cybernetics*. 2018;(2):86–91. (In Russ.)
17. Jones S.C. A Rapid accurate unsteady-state klinkenberg permeameter. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1972; 12(5):383-397. https://doi.org/10.2118/3535-pa
18. Hounsfield G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography). Part 1: Description of system. *British Journal of Radiology*. 1973;46:1016–1022.
19. Radon J. Uber die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten. Berichte Sachsische Akademie der Wissenschaften, Leipzig. *Journal of Mathematical Physics*. 1917;69:262–267
20. Feldkamp L.A., Davis L.C., Kress J.W. Practical cone-beam algorithm. J*ournal of the Optical Society of America A*. 1984;1(6):612–619.

Информация об авторах

Владислав Игнатьевич Галкин – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии нефти и газа, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-4867-2298, Scopus ID 55418067700; e-mail vgalkin@pstu.ru

Олег Александрович Мелкишев – кандидат технических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-7056-3173, Scopus ID 55531674700; e-mail melkishev@pstu.ru

Ян Владимирович Савицкий – кандидат технических наук, инженер кафедры геологии нефти и газа, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-2405-4508, Scopus ID 57211543253, ResearcherID AHI-0193-2022; e-mail yansavitsky@yandex.ru

Information about the authors

Vladislav I. Galkin – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Head of the Department of Petroleum and Gas Geology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0003-4867-2298, Scopus ID 55418067700; e-mail vgalkin@pstu.ru

Oleg A. Melkishev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Petroleum and Gas Geology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0001-7056-3173, Scopus ID 55531674700; e-mail melkishev@pstu.ru

Yan V. Savitsky – Cand. Sci. (Eng.), Engineer of the Department of Petroleum and Gas Geology, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID 0000-0003-2405-4508, Scopus ID 57211543253, ResearcherID AHI-0193-2022; e-mail yansavitsky@yandex.ru

Поступила в редакцию	27.08.2024	**Received**	27.08.2024
Поступила после рецензирования	24.02.2025	**Revised**	24.02.2025
Принята к публикации	14.05.2025	**Accepted**	14.05.2025

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-05-416
УДК 550.8

От визуальной диагностики к глубокому обучению: автоматическое определение минералов на фотографиях аншлифов

Д.М. Коршунов[1] ✉, А.В. Хвостиков[2], Г.В. Николаев[2], Д.В. Сорокин[2], О.И. Индычко[2], М.А. Богуславский[2], А.С. Крылов[2]

[1] *Геологический институт РАН, г. Москва, Российская Федерация*

[2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

✉ *dmit0korsh@gmail.com*

Аннотация

Изучение минерального состава руд является основополагающим этапом при разведке новых месторождений, поскольку именно оно позволяет определить формы нахождения полезных компонентов, процессы рудообразования и потенциальную извлекаемость ценных элементов. Минеральная ассоциация, текстуры и структуры руд не только дают ключевые сведения о геологии месторождения, но и определяют выбор методов обогащения. Несмотря на развитие современной аналитической базы и существующие решения автоматической диагностики минералов, например, на основе СЭМ-EDS метода, оптическая микроскопия является самым доступным средством количественного минералогического анализа. Однако она остаётся трудоемкой и требует высокой квалификации специалиста. А её визуальный характер ограничивает точность и воспроизводимость результатов, что создает необходимость в разработке более эффективных подходов. Одним из перспективных направлений является автоматизация идентификации рудных минералов по фотоизображениям аншлифов. Целью работы являлась разработка и валидация универсальной сегментационной модели на основе глубокого обучения. В процессе исследования также были решены сопутствующие задачи, включая формирование открытого набора данных LumenStone, разработку методов цветовой адаптации, совместного анализа PPL- и XPL-изображений, построения панорам и разработки метода быстрой разметки. В работе были применены свёрточные нейросетевые архитектуры, алгоритмы коррекции цвета и совместной обработки изображений, а также оригинальный метод семплирования, компенсирующий дисбаланс классов. Предложенная модель сегментации продемонстрировала высокую точность (IoU до 0,88, PA до 0,96) по девяти минералам. Полученные результаты подтвердили эффективность интеграции глубокого обучения и современных алгоритмов обработки изображений для задач минералогического анализа и заложили основу для дальнейшего развития цифровых методов в автоматизированной петрографии.

Ключевые слова

минералогия, минераграфия, цифровая петрография, автоматические методы анализа изображений, сегментация, глубокое обучение, цветовая адаптация, панорамные изображения

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00061).

Для цитирования

Korshunov D.M., Khvostikov A.V., Nikolaev G.V., Sorokin D.V., Indychko O.I., Boguslavsky M.A., Krylov A.S. From visual diagnostics to deep learning: automatic identification of minerals in polished section images. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):232–244. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-05-416

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

From visual diagnostics to deep learning: automatic mineral identification in polished section images

D.M. Korshunov[1] ✉, A.V. Khvostikov[2], G.V. Nikolaev[2], D.V. Sorokin[2], O.I. Indychko[2], M.A. Boguslavsky[2], A.S. Krylov[2]

[1] *Geological Institute of the Russian Academy of Sciences (GIN RAS), Moscow, Russian Federation*

[2] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

✉ *dmit0korsh@gmail.com*

Abstract

Studying mineralogical composition of ores is a fundamental step in the exploration of new deposits, as it allows determining the forms in which useful components are found, the processes of ore formation, and the potential recoverability of valuable elements. The mineral associations, textures, and structures of ores not

© Коршунов Д. М., Хвостиков А. В., Николаев Г. В., Сорокин Д. В., Индычко О. И., Богуславский М. А., Крылов А. С., 2025

only provide key information about the geology of a deposit, but also determine the choice of beneficiation methods. Despite the development of modern analytical tools and existing solutions for automatic mineral diagnosis, such as those based on the SEM-EDS method, optical microscopy remains the most accessible means of quantitative mineralogical analysis. However, it remains labor-intensive and requires highly skilled specialists. In addition, its visual nature limits the accuracy and reproducibility of results, creating a need for more effective approaches. One promising area is the automation of ore mineral identification based on images of polished sections. The aim of the work was to develop and validate a universal segmentation model based on deep learning. In the course of the research, related problems were also solved, including the creation of an open LumenStone dataset, the development of color adaptation methods, joint analysis of PPL and XPL images, panorama construction, and the development of a fast annotation method. The work applied convolutional neural network architectures, color correction and joint image processing algorithms, as well as an original sampling method that compensates for class imbalance. The proposed segmentation model demonstrated high accuracy (IoU up to 0.88, PA up to 0.96) for nine minerals. The results obtained confirmed the effectiveness of integrating deep learning and modern image processing algorithms in mineralogical analysis systems and laid the foundation for further development of digital methods in automated petrography.

Keywords
mineralogy, mineragraphy, digital petrography, automatic image analysis methods, segmentation, deep learning, color adaptation, panoramic images

Financing
This research was supported by the Russian Science Foundation (project no. 24-21-00061).

For citation
Korshunov D.M., Khvostikov A.V., Nikolaev G.V., Sorokin D.V., Indychko O.I., Boguslavsky M.A., Krylov A.S. From visual diagnostics to deep learning: automatic identification of minerals in polished section images. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):232–244. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-05-416

Введение

Изучение минерального состава руд является основополагающим этапом при разведке новых месторождений, поскольку именно оно позволяет определить формы нахождения полезных компонентов, процессы рудообразования и потенциальную извлекаемость ценных элементов. Минеральная ассоциация, текстуры и структуры руд не только дают ключевые сведения о геологии месторождения, но и определяют выбор методов обогащения.

Несмотря на развитие современной аналитической базы и существующие решения автоматической диагностики минералов, например, на основе СЭМ-EDS метода [1, 2], оптическая микроскопия является самым доступным средством количественного минералогического анализа. Однако она остаётся трудоемкой и требует высокой квалификации специалиста. А её визуальный характер ограничивает точность и воспроизводимость результатов, что создает необходимость в разработке более эффективных подходов.

Одним из перспективных направлений является автоматизация идентификации рудных минералов по фотоизображениям аншлифов. Такой подход позволяет не только сократить временные затраты, но и минимизировать субъективные ошибки, связанные с визуальной диагностикой, а также внедрить точные статистические методы анализа. Целью настоящей работы является описание нашего опыта разработки сегментационной модели для автоматической детекции минералов на фотографиях аншлифов и ряда смежных задач, возникавших в ходе исследования. В статье последовательно изложены основные проблемы, с которыми столкнулись авторы, и предложенные ими решения.

Современное состояние проблемы

Первые попытки создания инструментов автоматической диагностики рудных минералов под микроскопом были предприняты во второй половине XX в. [3, 4]. Тогда использовали спектрофотометры, с помощью которых измеряли цвет минералов, в частности, по спектрам поглощения света видимого диапазона интерпретировали минеральный вид. Из-за низкой точности этот метод не был широко распространён. Более совершенные методы автоматической идентификации минералов были созданы уже во второй половине 1990-х годов и опирались на анализ фотографий аншлифов под микроскопом [5, 6].

Предпринимались попытки автоматического анализа минеральных ассоциаций методом кластерного анализа с целью поиска закономерностей между различными объектами на фотографиях [7]. Отдельного упоминания стоит попытка авторов [8] составить цифровой атлас всех минералов, а сами минералы определять с помощью дендрограммы, составляемой на основе цифрового опросника.

На сегодняшний день существующие классические решения (без использования аппарата глубокого обучения) автоматической идентификации минералов можно разделить на два основных типа:

1. Использование интенсивности отраженного света совместно с цветовыми характеристиками, выраженными в цветовом пространстве RGB или LAB [9];

2. Использование статистических принципов разделения цветовой палитры для определения минералов в конкретном образце [10–12].

Оба подхода имеют существенные ограничения. Методы, использующие цвет и отражательную способность, не способны различать минералы с близкими оптическими свойствами. Статистические ме-

тоды, в свою очередь, требуют повторной калибровки для каждого нового геологического объекта, что делает их применение «ситуативным» и ограниченным. Это хорошо иллюстрируется в работе [12], где показаны особенности применения данного принципа для разделения медной руды по трём минералам и трём литологическим типам одного конкретного месторождения.

Стоит отметить, что существуют и узкоспециализированные решения, выполненные в виде расширений для популярных программных пакетов анализа изображений, таких как Fiji/ImageJ. Например, в работе [13] описывается метод автоматического определения содержания гематита, его размеров и типов срастаний в руде на базе этого ПО. Проблема подобных решений заключается в том, что они решают узкую конкретную задачу и не обладают должным уровнем универсальности.

Наиболее эффективным способом преодоления недостатка использования классических методов и достижения принципиально более качественных результатов в автоматическом анализе подобных изображений является применение обучаемых глубоких моделей (например, свёрточных нейронных сетей), которые способны извлекать сложные иерархические признаки из изображений с учётом не только локальных текстур и форм, но и глобальных взаимосвязей между фрагментами снимка. Вместо ручного подбора цветовых и статистических характеристик такие модели – будь то традиционные свёрточные сети (Convolutional Neural Networks, CNN) [13–15], современные трансформеры с механизмом самовнимания [16] или гибридные архитектуры (например, Mamba [17]) – учатся выделять отличительные морфологические и структурно-текстурные признаки каждого минерала.

Так, аппарат свёрточных нейронных сетей использовался для анализа дефектности поверхности и качества полировки металлических изделий [18, 19], анализа распределения углерода в чугуне по микрофотографиям поверхности заготовок [20]. В работе [21] показан метод разделения гематита и кварца в аншлифах железной руды с выделением класса их размерности для формирования оптимальной подачи вещества на обогатительный комбинат. Также стоит отметить ряд работ, посвящённых оценке и выделению классов размерности отдельных минеральных индивидов [22, 23], а также анализу и типизации морфологии сростков в системе с известной ассоциацией минералов [24, 25]. Предложенная в этих работах модель сегментации достигла 98 % точности при предсказании качества железной руды и возможности восстановления гематита, что подчёркивает потенциал глубоких моделей в решении производственных задач.

В работе [14] была продемонстрирована эффективность глубоких свёрточных сетей для трёхмерной идентификации минералов и анализа свободных зёрен, а в работе [26] авторы показали, что комбинированный анализ оптических микрофотографий с помощью CNN повышает точность оценки содержания минералов в шихте. В работе [15] авторы улучшили методы субдискретизации признаков, более точно классифицировав горные породы по изображениям шлифов.

Стоит отметить, что с помощью современных подходов глубокого обучения можно легко осуществить переход от классификации фрагментов изображения [27] к полноценной семантической сегментации, что позволяет получить точное пиксельное разбиение изображений по минералам [17, 26] и [14, 28]. При этом в работах [14, 29] была показана принципиальная возможность создавать качественные модели сегментации рудных минералов с высокой точностью определения (> 0,8 по метрике IoU).

Основное преимущество использования глубоких обучаемых нейронных сетей при работе с изображениями аншлифов руд заключается в способности учитывать контекст изображения и адаптироваться к вариативности минеральных ассоциаций. А самое главное – позволяет надёжно различать даже минералы с очень близкими признаками (пирит–марказит, ковеллин–халькозин и др.) без постоянной перекалибровки алгоритма под новые образцы в отличие от других методов компьютерного зрения. Однако работ, посвященных непосредственно диагностике минеральных видов с использованием таких подходов, пока ещё довольно мало. Также модели глубокого обучения могут быть использованы совместно с методами доменной адаптации, что позволяет дообучать модель сегментации на «новых» снимках – снятых другим оборудованием или в иных условиях освещения – и таким образом сохранять высокое качество работы даже при значительных вариациях входных данных. Обширные обзоры по доменной адаптации [14] и примеры успешного применения в семантической сегментации геологических и спутниковых изображений [30, 31] подтверждают, что этот подход обеспечивает универсальность и стабильность в самых разных условиях. Принципиальным отличием большинства методов глубокого обучения является необходимость полной разметки изображений для обучения. Зачастую это весьма трудоёмкий процесс, однако применение специализированных методов слабой разметки, выглядящих с точки зрения пользователя как разметка с помощью грубых штрихов (ScribbleSup [32], ScribbleSeg [33]) или точек [34], позволяет во многих случаях значительно ускорить сбор и подготовку обучающих данных.

Для построения надежной системы, основанной на глубоком обучении, требуется решить следующие основополагающие задачи, подробно рассматриваемые в данной работе:

1. Разработка нейросетевых методов сегментации минералов.
2. Разработка адаптивных методов калибровки и предобработки изображений.
3. Разработка методов совместной обработки разнородных изображений.
4. Разработка метода создания панорамных изображений.
5. Разработка вспомогательных методов обработки и анализа изображений аншлифов.

Таблица 1

Распределение минералов на размеченных фотографиях аншлифов в наборах LumenStone S1, S2, S3 для задачи сегментации. В квадратных скобках указано распределение при разбиении на обучающую и тестовую выборки

Минерал	Процент в наборе S1 [train, test], %	Процент в наборе S2 [train, test], %	Процент в наборе S3 [train, test], %	Суммарный процент (S1 + S2 + S3), %
Нерудные минералы	16,4 [12,6, 3,8]	9,8 [8,0, 1,8]	11,4 [8,8, 2,6]	37,6
Халькопирит	2,0 [1,1, 0,9]	3,1 [2,7, 0,4]	0,9 [0,6, 0,3]	6
Галенит	3,9 [3,2, 0,8]	–	1,1 [0,9, 0,3]	5
Магнетит	–	0,4 [0,4, 0,1]	0,1 [0,1, < 0,1]	0,5
Борнит	2,0 [1,7, 0,3]	–	0,5 [0,4, 0,1]	2,5
Пирротин	–	8,9 [6,2, 2,7]	–	8,9
Пирит	12,9 [9,5, 3,4]	–	1,9 [1,5, 0,4]	14,8
Пентландит	–	2,4 [1,6, 0,8]	–	2,4
Сфалерит	13,8 [10,9, 2,9]	–	0,5 [0,3, 0,2]	14,3
Арсенопирит	–	–	3,9 [3,0, 1,0]	3,9
Теннантит	2,1 [1,6, 0,5]	–	–	2,1
Ковеллин	–	–	1,8 [1,4, 0,3]	1,8
Прочие (не используются)	–	0,1	0,1	0,2

Материалы и методы

В настоящем исследовании использовалась коллекция аншлифов, предоставленная кафедрой геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Для получения изображений аншлифов использовался поляризационный микроскоп Carl Zeiss AxioScope 40 с фотокамерой Canon PowerShot G10. Все фотографии были сняты с увеличением ×50, а их разрешение 3396×2547 пк.

Основным недостатком существующих решений, применяющих глубокие нейросетевые модели в рассматриваемых задачах анализа фотографий аншлифов [23, 35], по мнению авторов, является закрытость используемых наборов изображений и закрытость кодовой базы, что делает невозможным любое сравнение разрабатываемых методов. Поэтому все размеченные наборы изображений, созданные в рамках работы, оформлены в виде единого открытого набора данных LumenStone[1], а программная реализация всех разработанных методов опубликована в виде библиотеки petroscope[2] с открытым кодом для языка программирования Python 3.

Созданный набор изображений LumenStone содержит несколько поднаборов, ориентированных на решения различных задач анализа изображений аншлифов. Основными поднаборами являются поднаборы S1, S2, S3, направленные на задачу сегментации (автоматического определения) минералов, сформированные с учетом минеральных ассоциаций и свойств минералов:

– LumenStone S1 (84 изображения): полиметаллические руды (галенит, сфалерит, халькопирит, борнит, блёклая руда);

– LumenStone S2 (39 изображений): сульфидные медно-никелевые руды (пирротин, пентландит, халькопирит);

– LumenStone S3 (35 изображений): минералы с сильными анизотропными свойствами (арсенопирит, ковеллин).

Для всех изображений данных наборов с использованием программного обеспечения Supervisely и Adobe Photoshop были созданы пиксельные маски сегментации соответствующих минералов, необходимые для обучения и тестирования моделей глубокого обучения.

Стоит отметить, что из-за естественных причин встречаемости в природе собранный набор изображений имеет достаточно существенный дисбаланс минералов (процентное соотношение приведено в табл. 1). Данный факт является дополнительной сложностью для разработки методов автоматической сегментации минералов и должен учитываться.

Также авторами были собраны дополнительные поднаборы изображений, необходимые для решения смежных задач:

1. LumenStone V1: специальный набор изображений одних и тех же 10 препаратов с разными условиями съемки, предназначенный для разработки и тестирования методов цветовой адаптации. Изображения получены как на том же оборудовании с использованием синего и жёлтого светофильтров, так и с помощью микроскопа ЛОМО Микросистемы ПЛМ-215 с фотокамерой Canon EOS 40D.

[1] LumenStone Dataset. URL: https://imaging.cs.msu.ru/en/research/geology/lumenstone

[2] GitHub. URL: https://github.com/xubiker/petroscope

2. LumenStone P1: 875 изображений, полученных для 35 аншлифов. Для каждого аншлифа снималось 25 фотографий с 20–30%-ным перекрытием, предназначенных для создания панорамных микроскопических изображений.

Для решения задач одновременного анализа фотографий анизотропных минералов в PPL и XPL были сделаны «поворотные» фотографии одной области зрения с шагом поворота столика микроскопа 5 и 15° и дополнительно включены в LumenStone S3.

Проблемы и их решения (обсуждение)

Ниже приведены описания рассматриваемых задач из области обработки и анализа изображений, необходимых для решения комплексной проблемы автоматической идентификации минералов на микроскопических изображениях аншлифов, и подходы, предложенные авторами для решения этих задач.

1. Нейросетевые методы сегментации минералов. В данной работе для решения задач сегментации мы рассматриваем свёрточные нейронные сети. Альтернативы на основе трансформеров, хотя и перспективны, остаются избыточно ресурсоемкими для стандартных лабораторных условий [36]. Несмотря на хорошую обобщающую способность свёрточных нейронных сетей, они являются довольно чувствительными к дисбалансу классов в обучающей выборке [37, 38], которая характерна для собранных данных (табл. 1). Кроме того, нейросетевые методы не могут быть напрямую применены к изображениям высокого разрешения из-за аппаратных ограничений. Для нивелирования этих недостатков в работе [39] нами был предложен специализированный метод семплирования обучающей выборки в процессе обучения, извлекающий небольшие фрагменты из изображений (патчи) и играющий роль балансировщика данных.

Задачей разработанного метода семплирования является выравнивание распределения классов минералов, подающихся в нейронную сеть при обучении. Для каждой пары «изображение обучающей выборки – тип минерала» вычисляется матрица, содержащая в каждой точке извлеченную площадь выбранного минерала в случае выбора патча с центром в этой точке. Получившийся набор матриц используется в качестве вероятностных карт при выборе патчей для обучения. Так, на каждой итерации семплирования для наименее представленного на данный момент минерала 1) выбирается изображение обучающей выборки (пропорционально содержанию этого минерала), 2) в соответствии с вычисленными ранее вероятностными картами выбирается центр патча, 3) извлекается патч и 4) обновляются данные о представленности минералов в использованных данных. Данный метод при умеренных размерах патча (256–384 пк) позволяет существенно уравнять распределение имеющихся минералов в наборах LumenStone S1, S2, S3, что положительно сказывается на скорости обучения моделей сегментации, а также на итоговых метриках качества сегментации.

При разработке нейросетевых моделей сегментации минералов нами были рассмотрены и исследованы ряд свёрточных архитектур, начиная от традиционного UNet [40] и его модификации ResUNet [29] и заканчивая более современными PSPNet [41] и UPerNet [42]. Преимущество последних заключается в возможности анализировать изображения на разных масштабах, корректно определять одновременно и маленькие, и очень большие объекты, и учитывать локальный и глобальный контекст, что позволяет существенно улучшить качество сегментации на имеющихся данных.

Для оценивания качества сегментации в данной работе используется метрика IoU [43]. Это один из наиболее простых и распространенных способов геометрической оценки сегментации при наличии референсной разметки. Метрика принимает значения из диапазона [0, 1], где 1 соответствует полному совпадению предсказанной разметки с референсной (идеальный случай), а 0 соответствует отсутствию пересечений предсказанной и референсной разметок сегментации. Удовлетворительным обычно считается значение IoU > 0,7, хотя и зависит, конечно, от предметной области.

В нашем случае обучение нейронной сети PSPNet с ResNet18 кодировщиком на наборах LumenStone S1 и S2 совместно с использованием метода семплирования с балансировкой классов, описанного выше, позволило произвести сегментацию 9 минералов и обобщённого класса нерудных минералов с очень высоким качеством (среднее значение IoU на тестовой выборке составило 0,88). При обучении используются кросс-энтропийная функция потерь, случайные аугментации (поворот, незначительное изменение масштаба, яркости и цвета), оптимизатор Adam с начальной скоростью обучения 0,001 и уменьшением при достижении плато. Обучение занимает порядка 3 ч на Nvidia A6000 GPU. Пример применения обученной модели сегментации минералов на изображении из тестовой выборки приведен на рис. 1.

2. Адаптивные методы калибровки и предобработки изображений. Одной из основных проблем, с которой столкнулись авторы при работе с первичными данными, является высокая чувствительность сегментационных моделей к цветовой палитре изображений. Различия в цветовых характеристиках между обучающими и реальными изображениями приводят к значительному ухудшению качества определения минералов. Цвето-яркостные характеристики изображений определяются многими факторами: параметрами микроскопа, настройками фотокамеры, освещенностью и др.

Один из вариантов решения данной проблемы – использование автоматической коррекции цвета, основанной на разнице цветов между получаемым изображением и известным референсом (например [44]).

Метод исправления цветовых искажений был предложен нами в работе [45]. Основная идея заключается в построении матрицы перехода (Color Correction Matrix, CCM) [46] между цветовыми пространствами искажённого и эталонного изображений (за эталон принимаются изображения из обучающего набора данных).

Процесс включает извлечение усредненных цветов минералов и фона с использованием частичной разметки, линеаризацию цветов через гамма-коррекцию ($\gamma = 2{,}2$) и расчет аффинного преобразования. Задача минимизации решается в LAB-пространстве, в качестве функции потерь используется сумма квадратов цветовых отличий, вычисленных по формуле CIEDE2000 [47]. В работе используется матрица размера 4×3 с инициализацией начального приближения методом «баланса белого» [46]. Последним шагом искаженное изображение преобразуется путем матричного умножения на вычисленную ранее матрицу цветовой коррекции.

Предложенный метод позволяет сохранить цветовые различия, критически важные для идентификации минералов (рис. 2), минимизируя при этом влияние изменений освещения и настроек оборудования. Алгоритм поддерживает два режима работы: индивидуальную коррекцию для каждого изображения и «калибровочный» режим для серийных снимков, где матрица коррекции рассчитывается один раз и применяется ко всей группе. Метод не требует предварительного обучения, обработка одного изображения занимает менее 10 с на Intel Xeon Gold 6226R CPU.

3. Методы совместной обработки разнородных изображений. Многие минералы идентифицируются не только на основе их цвета и отражательной способности, но также по наличию или отсутствию анизотропных свойств. Анизотропия проявляется в способности минералов «гаснуть» в дважды поляризованном свете (скрещенных николях) при совпадении оптических осей минерала с направлением поляризаторов микроскопа. Это свойство является ключевым для возможности отличить минералы с близкими параметрами отражательной способности и цвета. Например, пирит (изотропный) и марказит (анизотропный) имеют схожие оптические характеристики, но отличаются по наличию анизотропии. Аналогично, пирит и арсенопирит, хотя и обладают несколько различными отражательной способностью и цветом, также могут быть надежно разделены по наличию анизотропии у арсенопирита.

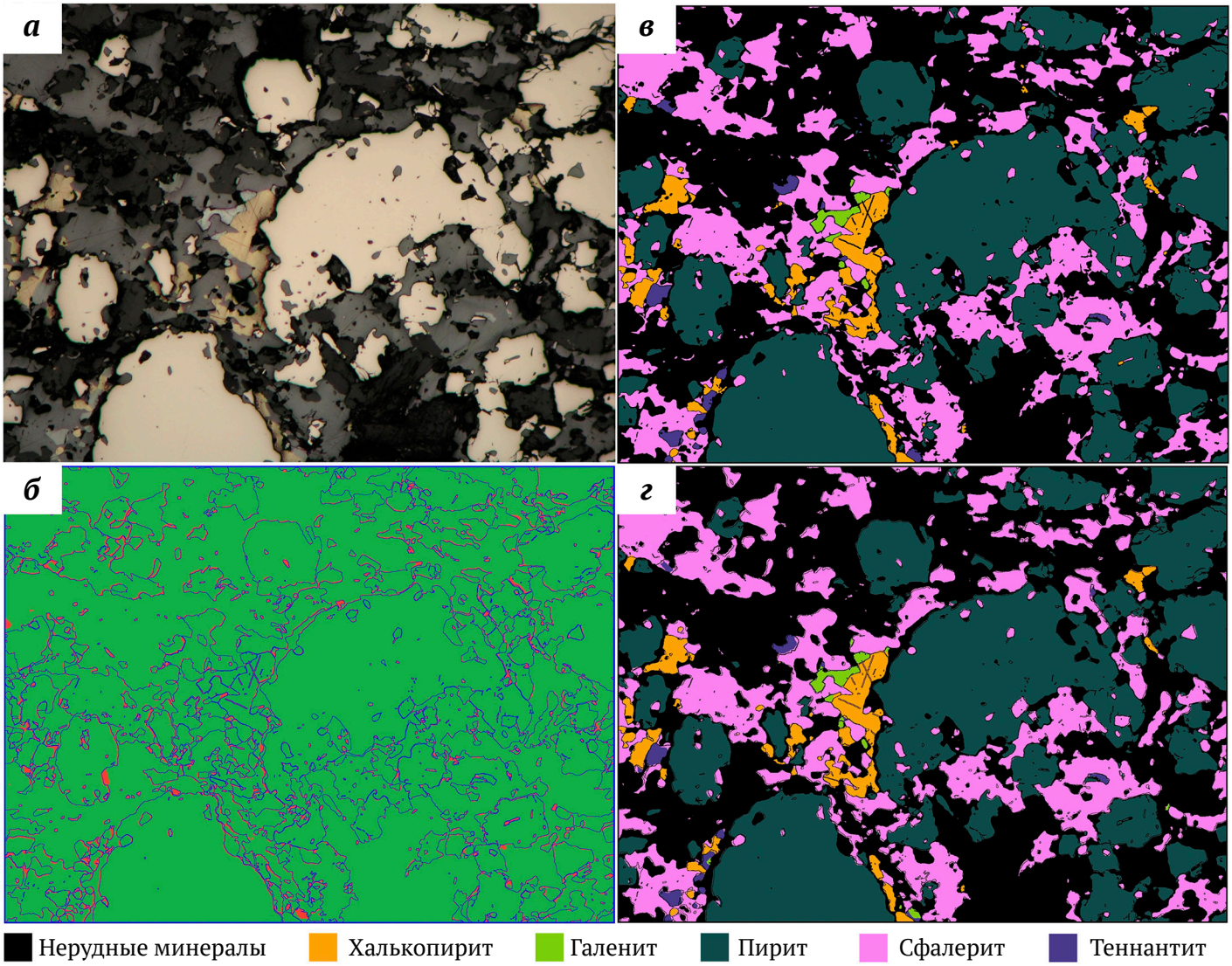


Рис. 1. Пример сегментации изображения аншлифа обученной моделью PSPNet:
а – изображение; *б* – карта ошибок (зеленым выделены правильно распознанные участки, красным – ошибки сегментации); *в* – маска минералов (экспертная разметка); *г* – предсказание модели

Авторами статьи был разработан нейросетевой метод сегментации, использующий XPL- и PPL-изображения в качестве дополнительных входных данных для сегментирующей нейронной сети для повышения точности сегментации минералов [48]. Ключевым этапом данного метода является совмещение изображений, снятых при разных углах поворота с эталонным PPL-изображением. Для этого применялись алгоритмы SIFT [49] для детекции устойчивых ключевых точек на изображениях и RANSAC [50], с помощью которого по найденным парам ключевых точек вычислялось аффинное преобразование между изображениями. Таким образом, все изображения были приведены к единой системе координат (рис. 3). Далее приведенные к единой системе координат XPL-изображения используются как дополнительные каналы на входе нейронной сети, в основе которой лежит архитектура, предложенная ранее авторами [29]. Используемые гиперпараметры описаны в [29], время обучения модели составляет около 6 ч на видеокарте NVidia A6000 GPU.

4. Методы создания панорамных изображений. Площадь среднего аншлифа составляет несколько квадратных сантиметров, при исследовании типично увеличение ×50. В таких условиях на каждой фотографии будет лишь небольшая часть аншлифа, площадью в несколько квадратных миллиметров. Использование фотографий, покрывающих большую площадь образца, позволило бы получить более точную информацию о распределении минералов в образце и об их взаимном расположении и положительно сказалось бы на качестве анализа.

Для получения больших изображений в геологии можно использовать сканирующие электронные микроскопы (SEM), но такое оборудование очень дорогое, структурно-текстурные особенности могут теряться в силу особенностей метода, а определение минеральных фаз требует дополнительных усилий. Поэтому мы, как и другие исследователи [51], делаем выбор в пользу программного сшивания серии изображений, снятых с перекрытием, в единую панораму.

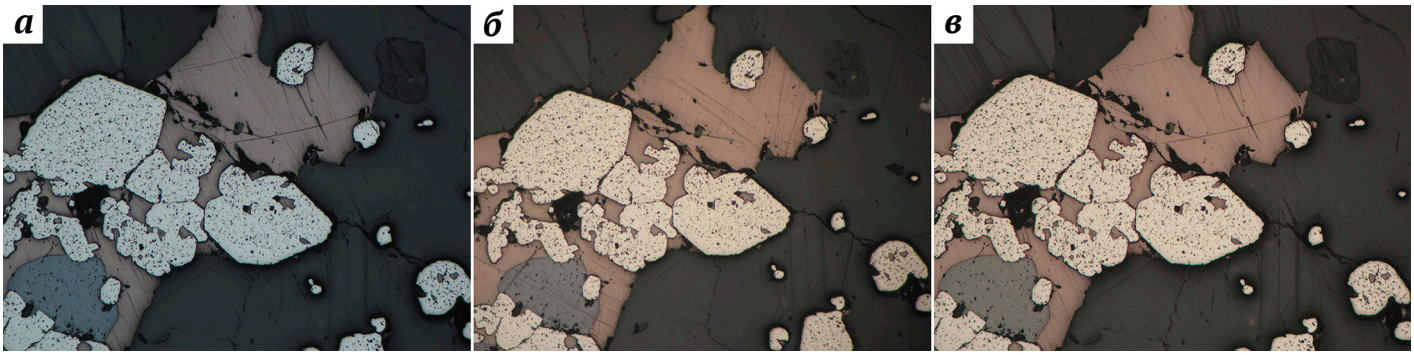


Рис. 2. Пример работы предложенного метода цветовой калибровки:
а – исходное изображение, снятое на альтернативном оборудовании; *б* – референсное изображение;
в – исходное после работы метода

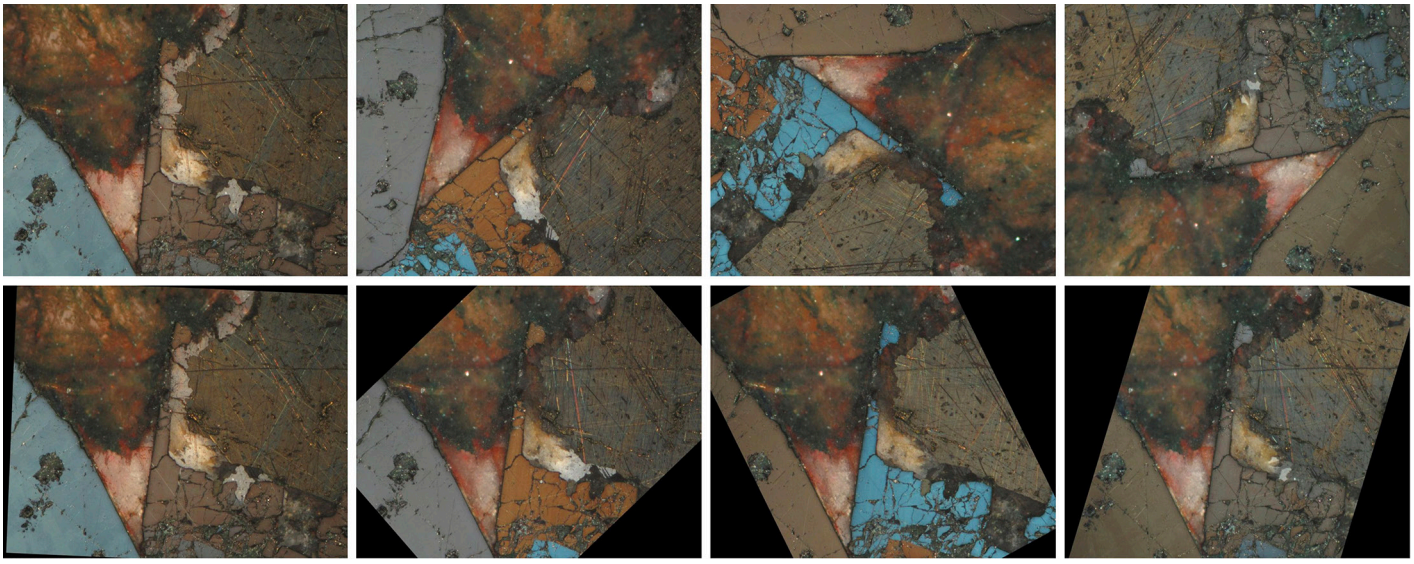


Рис. 3. Совмещение XPL-изображений арсенопирита: верхний ряд – изображения арсенопирита в различных ориентациях, нижний ряд – изображения арсенопирита в различных ориентациях после совмещения. Представлены 4 различные ориентации из 24 для каждого изображения с анизотропными минералами

В настоящее время существует множество примеров программного обеспечения для автоматического сшивания разрозненных фотографий в единое панорамное изображение. К ним относятся Adobe Photoshop, Fiji/ImageJ и многие другие. Но использование стороннего ПО обладает рядом недостатков. Мощные средства, такие как Adobe Photoshop, могут излишне преобразовывать панораму (неестественно менять цвета, устранять важные детали, принимая их за артефакты склейки). Интеграция сторонней реализации в собственную систему затруднительна сама по себе, а также приводит к невозможности вносить необходимые изменения в работу алгоритма в соответствии с особенностями решаемой задачи.

Авторами был разработан собственный алгоритм сшивания фотографий в панорамное изображение поверхности аншлифа [52] (рис. 4). Алгоритм состоит из двух основных этапов: совмещение изображений и дальнейшая постобработка для улучшения визуального восприятия. На первом этапе с использованием калибровочных изображений корректируются геометрические искажения изображений с помощью модели Брауна–Конради [53] и фотометрические искажения с помощью компенсации плоского поля [54]. Затем с помощью нейросетевого алгоритма LoFTR [55] находятся общие точки изображений, имеющих области перекрытия. По ним вычисляются перспективные преобразования – гомографии для пар соседних изображений с помощью RANSAC [50], после чего все изображения преобразуются в координаты одного изображения (опорного). Наконец, выполняется глобальная оптимизация панорамы для минимизации ошибок совмещения. Результатом этапа является первичная панорама – коллаж. На втором этапе происходит улучшение первичной панорамы. Компенсируется разница экспозиций на изображениях. Маскируются швы между изображениями с помощью построения наименее заметного шва методом разреза графа [56], с учетом разницы в цвете и градиентах соседних пикселей. Финальным шагом изображения смешиваются вблизи стыков частей панорамы для устранения возможных остаточных артефактов сшивания. Для тестирования алгоритма использовался собранный для задачи построения панорам набор LumenStone P1. Метод не требует предварительного обучения, скорость обработки одной панорамы из 25 изображений на Intel Xeon Gold 6226R CPU составляет порядка 5 мин.

5. Вспомогательные методы обработки и анализа изображений аншлифов. Применение методов глубокого обучения для сегментации минералов на изображениях требует точной разметки большого количества изображений, что является трудоёмким процессом. Для упрощения процесса разметки и создания сегментационной модели, способной распознавать основные рудные минералы, авторами разрабатывается метод ускоренной интерактивной разметки с использованием суперпиксельной кластеризации на основе методов SLIC [57] и Felzenswalb [58]. Геолог грубо выделяет минералы штрихами, при этом целые области изображения помечаются меткой того или иного минерала на основе данных о нанесенных штрихах и карты суперпикселей. Пользователь корректирует предсказания метода, пока не получит окончательную разметку. Особенность подхода – многомасштабная кластеризация, позволяющая быстро размечать как большие однородные области, так и мелкие фрагменты, автоматически разбивая большие кластеры на более мелкие по мере необходимости.

Также сократить трудозатраты на разметку данных можно пополнением обучающей выборки частично размеченными данными. Основная идея подхода заключается в выделении на изображениях областей неопределенности (неуверенности) обученной модели сегментации. Авторы предлагают выделять области неопределенности на изображениях [59] с использованием гиперболического радиуса [60], что позволяет снизить объем разметки до 5–10 % от исходного изображения (рис. 5).

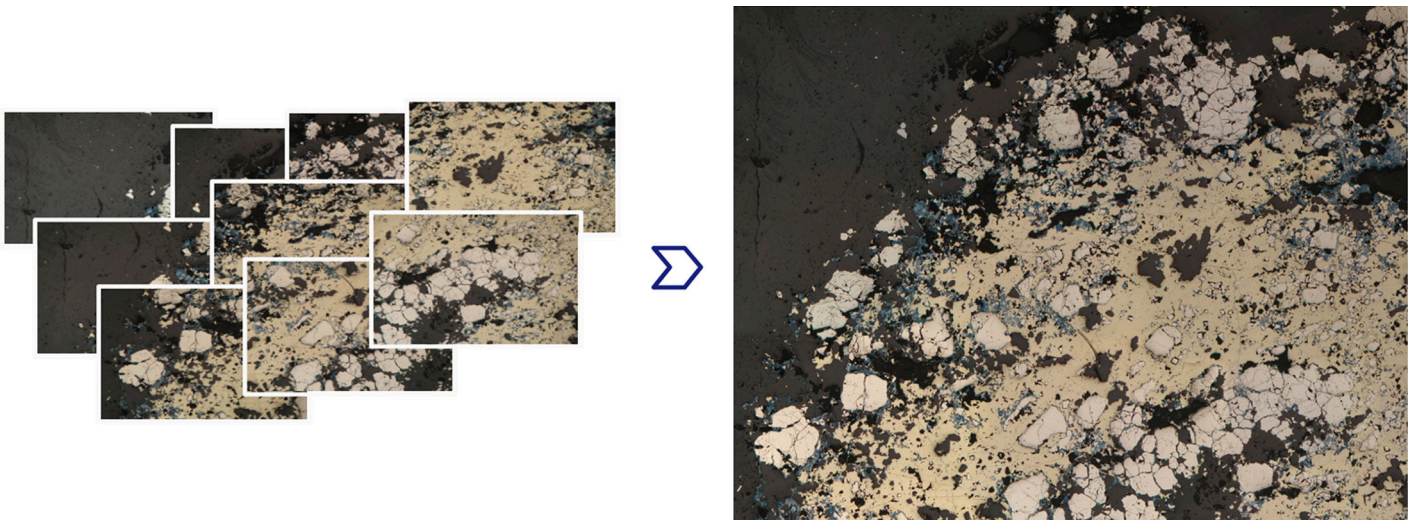


Рис. 4. Иллюстрация разработанного метода построения панорам:
слева несколько изображений одного аншлифа, снятых с перекрытием, справа – построенная панорама

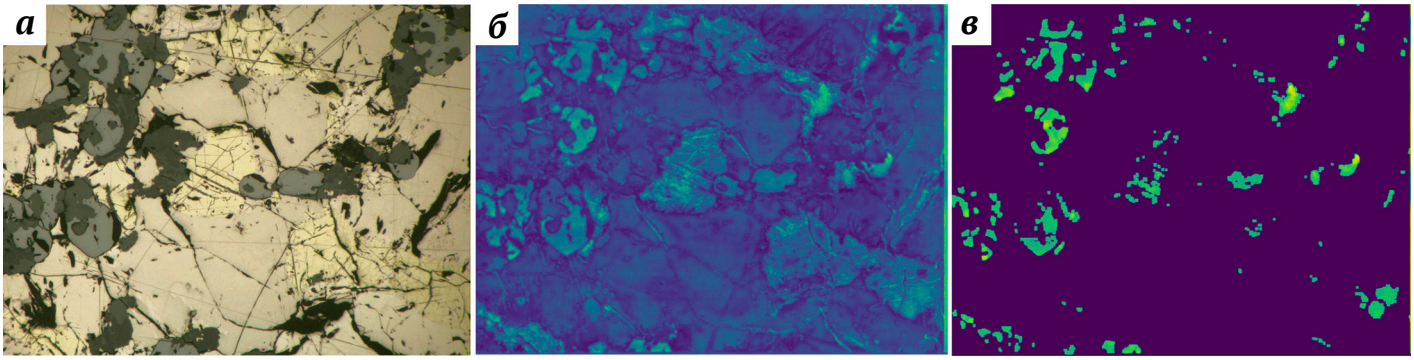


Рис. 5. Результат работы метода оценки областей неопределенности: *а* – исходное изображение; *б* – предсказание областей неуверенности модели сегментации; *в* – области для ручной разметки

Заключительным этапом после распознавания и сегментации всех минералов на изображениях является этап статистического анализа изображения. Он ответственен за проведение количественного анализа, выполняющего оценку площадного соотношения минеральных фаз и их гранулометрического анализа с выделением фракций по классам размерности для каждого минерала. Данный этап пока находится на стадии разработки.

Результаты

Итогом проведенного авторами исследования тематики автоматического анализа микроскопических изображений геологических аншлифов для определения минерального состава стали открытый набор изображений LumenStone и ряд алгоритмов и методов, решающих основные возникшие задачи:

1. Нейросетевые методы сегментации минералов. Разработаны свёрточная нейросетевая модель сегментации минералов и специальный метод семплирования обучающей выборки, позволяющий нивелировать имеющийся дисбаланс классов. Точность сегментации минералов по метрике IoU составила: нерудные – 0,912, борнит – 0,938, халькопирит – 0,899, галенит – 0,905, магнетит – 0,650, пентландит – 0,790, пирротин – 0,928, пирит – 0,964, сфалерит – 0,922, теннантит – 0,882. Общая пиксельная точность сегментации (pixel accuracy, PA) составила 0,96. Имеющаяся дифференциация результатов определения минералов объясняется разностью объемов обучающих выборок LumenStone S1 и LumenStone S2.

2. Адаптивные методы калибровки и предобработки изображений. Разработан алгоритм адаптации изображений аншлифов, полученных в разных условиях съемки с использованием частичной пользовательской разметки. Пиксельная точность сегментации возросла с 0,29 до 0,87 для искаженных изображений до и после адаптации с использованием разметки, составляющей порядка 30–35 % от изображения.

3. Методы совместной обработки разнородных изображений. Разработанный алгоритм сегментации анизотропных минералов с использованием дополнительных повернутых XPL-изображений повысил качество сегментации анизотропных минералов на 3–12 %. Было показано, что наилучшего результата можно достичь использованием 6 дополнительных повернутых изображений.

5. Методы создания панорамных изображений. Разработан метод построения панорамных микроскопических изображений аншлифов. Среднеквадратичная ошибка совмещения частей панорамы из 25 изображений составила 0,5–0,6 пк. Получаемые панорамы имеют разрешение 12000×8000 пк и могут быть использованы для задач автоматической сегментации минералов. Реализованный метод лишен недостатков менее специализированных решений, таких как Adobe Photoshop, Fiji, Panorama Studio.

6. Вспомогательные методы обработки и анализа изображений аншлифов. Разработан прототип метода интерактивной разметки изображений аншлифов, позволяющий существенно ускорить процесс подготовки данных для обучения моделей сегментации. Также разработан метод автоматического поиска областей неопределенности, позволяющий приоритизировать разметку изображений и значительно сократить объем требуемой разметки.

Заключение

В данной работе представлен опыт авторов по разработке набора методов автоматического анализа микрофотографий аншлифов для определения рудных минералов. Разработанный метод сегментации на основе свёрточной нейронной сети способен определять 9 рудных минералов (с корректным отделением их от нерудных фаз) с точностью IoU = 0,88 и PA = 0,96. Показана перспективность использования дополнительной информации из XPL-изображений для увеличения точности определения анизотропных минералов.

Разработанные методы интерактивной разметки и адаптации изображений существенно ускоряют обучение и использование моделей сегментации на новых данных. Отдельно стоит отметить разработанный авторами метод получения панорамных изображений аншлифов, позволяющий получать детализированные изображения всей поверхности препаратов в высоком разрешении без дорогостоящего оборудования, который в отличие от существующих программных

решений не искажает итоговую панораму, что положительно сказывается на результатах сегментации. А работа с широкоформатными изображениями открывает новые перспективы в автоматическом анализе микрофотографий аншлифов.

Полученные результаты обосновывают необходимость дальнейшего развития рассматриваемого направления, а также формируют основу для создания интеллектуальной системы количественной оценки, способной не только идентифицировать минералы и рассчитывать их площадные доли, выполнять гранулометрический анализ по классам крупности, но и определять типы минералогических срастаний. Реализация такой методологии откроет новые возможности в цифровой петрографии, обеспечив быстрый, экономичный и воспроизводимый минеральный анализ на оптических микроскопах в отражённом свете. В конечном итоге это позволит сформировать унифицированные критерии анализа структурно-текстурных особенностей минеральных ассоциаций для генетического сравнения разных месторождений.

На данный момент авторы внедряют большинство описанных в данной статье методов и алгоритмов в разработанную ими программную платформу PathScribe [61]. Данная платформа представляет собой облачное клиент-серверное решение с кроссплатформенными клиентами для работы с изображениями сверхвысокого разрешения и ориентирована на универсальное применение как в научных, так и в образовательных целях. Авторы надеются, что возможность работы с панорамными изображениями аншлифов, с удобными средствами их разметки и полного автоматического анализа будет полезной для специалистов-геологов разных профилей.

Список литературы / References

1. De Castro B., Benzaazoua M., Chopard A., et al. Automated mineralogical characterization using optical microscopy: Review and recommendations. *Minerals Engineering*. 2022;189:107896. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107896
2. Duncan P., Gavyn K.R. Unlocking the applications of automated mineral analysis. *Geology Today*. 2011;27(6):226–235. https://doi.org/10.1111/j.1365-2451.2011.00818.x
3. Юшко С.А. *Методы лабораторных исследований руд*. М.: Недра; 1984. 389 с.
Yushko S.A. *Methods of laboratory ore research*. Moscow: Nedra; 1984. 389 p. (In Russ.)
4. Craig J.R., Vaughan D.J. *Ore microscopy and ore petrography*. Manchester: A Wiley-interscience Publication; 1994. 446 p.
5. Bonifazi G. Digital multispectral techniques and automated image analysis procedures for industrial ore modelling. *Minerals Engineering*. 1995;8(7):779–794. https://doi.org/10.1016/0892-6875(95)00039-S
6. Marschallinger R. Automatic mineral classification in the macroscopic scale. *Computers & Geosciences*. 1997;23(1):119–126. https://doi.org/10.1016/S0098-3004(96)00074-X
7. Berry R., Walters S.G., McMahon C. Automated mineral identification by optical microscopy. In: *Ninth International Congress for Applied Mineralogy*. Brisbane, Australia, 8–10 September 2008. Brisbane: QLD; 2008. Pp. 91–94.
8. Shoji T., Keneda H. An interactive system to assist mineral identification in ore microscopy. *Mathematical Geology*. 1994;26:961–972. https://doi.org/10.1007/BF02083424
9. López-Benito A., Catalina J.C., Alarcón D., et al. Automated ore microscopy based on multispectral measurements of specular reflectance. I–A comparative study of some supervised classification techniques. *Minerals Engineering*. 2020;146:106136. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106136
10. Berrezueta E., Ordóñez-Casado B., Bonilla W., Banda R., Castroviejo R., Carrión P., Puglla S. Ore petrography using optical image analysis: application to Zaruma-Portovelo deposit (Ecuador). *Geosciences*. 2016;6(2):30. https://doi.org/10.3390/geosciences6020030
11. Köse C., Alp I., İkibaş C. Statistical methods for segmentation and quantification of minerals in ore microscopy. *Minerals Engineering*. 2012;30:19–32. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.01.008
12. Krawczykowska A., Trybalski K., Krawczykowski D. The application of modern techniques and measurement devices for identification of copper ore types and their properties. *Archives of Mining Sciences*. 2013;58(2):433–448. https://doi.org/10.2478/amsc-2013-0029
13. Iglesias J.C.A, Augusto K.S., Gomes O.D.F.M., et al. Automatic characterization of iron ore by digital microscopy and image analysis. *Journal of Materials Research and Technology*. 2018;7(3):376–380. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.014
14. Tang K., Chen J., Zhou H., Liu J. Deep convolutional neural network for 3D mineral identification and liberation analysis. *Minerals Engineering*. 2022;183:107592. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107592
15. Zhou Z., Yuan H., Cai X. Rock Thin section image identification based on convolutional neural networks of adaptive and second-order pooling methods. *Mathematics*. 2023;11(5):1245. https://doi.org/10.3390/math11051245
16. Kirillov A., Mintun E., Ravi N., et al. Segment anything. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2023;4015–4026. https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.02643
17. Hatamizadeh A., Kautz J. *Mambavision: A hybrid mamba-transformer vision backbone*. arXiv preprint arXiv: 2407.08083. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.08083

18. Liu M.W., Lin Y.H., Lo Y.C., et al. Defect Detection of grinded and polished workpieces using faster R-CNN. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2021. Pp. 1290–1296. https://doi.org/10.1109/AIM46487.2021.9517664
19. Zhongliang L.V., Zhenyu Lu., Kewen Xia., et al. LAACNet: Lightweight adaptive activation convolution network-based defect detection on polished metal surfaces. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024;133(E):108482. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108482
20. Sivkova T., Gusev A., Syropyatov A. Technology for cast iron microstructure analysis in SIAMS software using neural networks. In: *Proceedings of the 31th International Conference on Computer Graphics and Vision*. September 27–30, 2021, Nizhny Novgorod, Russia. 2021;2:772–780.
21. Amaral B., Soares A.K., Iglesias J.C.Á., Caldas T.D.P., Santos R.B.M., Paciornik S. Instance segmentation of quartz in iron ore optical microscopy images by deep learning. *Minerals Engineering*. 2024;211:108681. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108681
22. Maitre J., Bouchard K., Bédard L.P. Mineral grains recognition using computer vision and machine learning. *Computers & Geosciences*. 2019;130:84–93. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.05.009
23. Song Y., Huang Z., Shen C., et al. Deep learning-based automated image segmentation for concrete petrographic analysis. *Cement and Concrete Research*. 2020;135:106118. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106118
24. Donskoi E., Hapugoda S., Manuel J.R., et al. Automated optical image analysis of iron ore sinter. *Minerals*. 2021;11(6):562. https://doi.org/10.3390/min11060562
25. Donskoi E., Poliakov A. Advances in optical image analysis textural segmentation in ironmaking. *Applied Sciences*. 2020;10(18):6242. https://doi.org/10.3390/app10186242
26. Santoro L., Lezzerini M., Aquino A., et al. A novel method for evaluation of ore minerals based on optical microscopy and image analysis: preliminary results. *Minerals*. 2022;12(11):1348. https://doi.org/10.3390/min12111348
27. Su C., Wang Y., Zhu J., Zhang X.C. Rock classification in petrographic thin section images based on concatenated convolutional neural networks. *Earth Science Informatics*. 2020;13:1477–1484. https://doi.org/10.1007/s12145-020-00505-1
28. Tang H., Wang H., Wang L., et al. An improved mineral image recognition method based on deep learning. *JOM*. 2023;75:2590–2602. https://doi.org/10.1007/s11837-023-05792-9
29. Khvostikov A.V., Korshunov D.M., Krylov A.S., Boguslavskii M.A. Automatic identification of minerals in images of polished sections. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2021;XLIV-2/W1-2021:113–118. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-2-W1-2021-113-2021
30. Chen H., Zhang H., Yang G.A., Zhang L. Mutual information domain adaptation network for remotely sensed semantic segmentation. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022;60:1–16. https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3203910
31. Nasim M.K., Tannistha M., Shrivastava A., Singh T. Seismic facies analysis: a deep domain adaptation approach. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020;60:1–16. https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3151883
32. Lin D., Dai J., Jia J., et al. Scribblesup: Scribble-supervised convolutional networks for semantic segmentation. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Las Vegas, NV, USA; 2016. Pp. 3159–3167. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.344
33. Chen X., Cheung Y.S.J., Lim S.N., Zhao H. *ScribbleSeg: Scribble-based interactive image segmentation*. arXiv preprint arXiv: 2303.11320. 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.11320
34. Cheng B., Parkhi O., Kirillov A. Pointly-supervised instance segmentation. In: *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. New Orleans, LA, USA; 2022. Pp. 2617–2626. https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00264
35. Tang H., He. L., Huang B., et al. Segmentation and labeling of polished section images based on deep learning. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2025;42:1053–1063. https://doi.org/10.1007/s42461-025-01205-4
36. Tabani H., Balasubramaniam A., Marzbanet S., et al. Improving the efficiency of transformers for resource-constrained devices. In: *24th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*. Palermo, Italy; 2021. Pp. 449–456. https://doi.org/10.1109/DSD53832.2021.00074
37. Bressan P.O., Junior J.M. Martins J.A.C., et al. Semantic segmentation with labeling uncertainty and class imbalance. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022;108:102690. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102690
38. Li Z., Kamnitsas K., Glocker B. Analyzing overfitting underclass imbalance in neural networks for image segmentation. In: *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2021;40(3):1065–1077. https://doi.org/10.1109/TMI.2020.3046692
39. Kochkarev A., Khvosticov A., Korshunov D., Boguslavskii M. Data balancing method for training segmentation neural networks. In: *Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine*

Vision (GraphiCon 2020). Saint Petersburg, Russia, 22–25 September. Saint Petersburg: Ceur Workshop Proceedings; 2020.

40. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: Navab N. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. Cham: Springer; 2015. Pp. 234–41. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
41. Zhao H., Shi J., Qi X., et al. Pyramid scene parsing network. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Honolulu, HI, USA; 2017. Pp. 2881–2890. https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.660
42. Xiao T., Liu Y., Zhou B., et al. Unified perceptual parsing for scene understanding. In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds.) *Computer Vision – ECCV 2018. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science. Vol 11209*. Springer, Cham; 2018. Pp. 418–434. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01228-1_26
43. Rezatofighi H., Tsoi N., Gwak J., et al. Generalized intersection over union: A metric and a loss for bounding box regression. In: *Proceedings of the IEEE*. 2019. Pp. 658–666. https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.09630
44. Reinhard E., Adhikhmin M., Gooch B., Shirley P. Color transfer between images. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2001;21(5):34-41. https://doi.org/10.1109/38.946629
45. Indychko O.I., Khvostikov A.V., Korshunov D.M., Boguslavskii M.A. Color adaptation in images of polished sections of geological specimens. *Computational Mathematics and Modeling*. 2022;33:487–500. https://doi.org/10.1007/s10598-023-09588-z
46. Wolf S. *Color correction matrix for digital still and video imaging systems*. Washington, D.C.: National Telecommunications and Information Administration; 2003. 28 p.
47. Sharma G., Wu W., Dalal E.N. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application*. 2005;30(1):21–30. https://doi.org/10.1002/col.20070
48. Razzhivina D.I., Korshunov D.M., Boguslavskiy M.A., et al. Registration and segmentation of PPL and XPL images of geological polished sections containing anisotropic minerals. *Computational Mathematics and Modeling*. 2024;34:16–26. https://doi.org/10.1007/s10598-024-09592-x
49. Lowe D.G. Distinctive image features from scale invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*. 2004;60:91–110. https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94
50. Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*. 1981;24(6):381–395.
51. Ro S.-H., Kim S.-H. An image stitching algorithm for the mineralogical analysis. *Minerals Engineering*. 2021:169;106968. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106968
52. Nikolaev G., Korshunov D., Khvostikov A. Automatic stitching of panoramas for geological images of polished sections. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2024;X-2/W1-2024:39–46. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-2-W1-2024-39-2024
53. Brown D.C. Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*. 1966:32(3);444–462.
54. Seibert J.A., Boone J.M., Lindfors K. K. Flat-field correction technique for digital detectors. In: *Proceedings of SPIE, Medical Imaging 1998: Physics of Medical Imaging*. 1998:3336;348–354. https://doi.org/10.1117/12.317034
55. Sun J., Shen Z., Wang Y., et al. LoFTR: Detector-free local feature matching with transformers. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2021. Pp. 8922–8931. https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.00680
56. Boykov Y., Kolmogorov V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2004;26(9):1124–1137. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2004.60
57. Achanta R., Shaji A., Smith K., et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2012;34(11):2274–2282. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.120
58. Felzenszwalb P.F., Huttenlocher D.P. Efficient graph-based image segmentation. *International Journal of Computer Vision*. 2004:59;167–181. https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000022288.19776.77
59. Indychko O., Korshunov D., Khvostikov A. Using uncertainty to expand training sets for mineral segmentation in geological images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2025. In press.
60. Franco L., Mandica P., Kallidromitis K., et al. Hyperbolic Active Learning for Semantic Segmentation under Domain Shift. In: *Proceedings of the 41st International Conference on Machine Learning*. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.11180
61. Khvostikov A., Ippolitov V., Krylov A., et al. PathScribe: new software to work with whole slide histological images for education and research. In: *Proceedings of the 2023 8th International Conference on Biomedical Imaging, Signal Processing*. Singapore: ACM; 2023. Pp. 63–70. https://doi.org/10.1145/3634875.3634884

Информация об авторах

Дмитрий Михайлович Коршунов – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Геологический институт РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-8500-7193; e-mail dmit0korsh@gmail.com

Александр Владимирович Хвостиков – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории математических методов обработки изображений факультета вычислительной математики и кибернетики, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-4217-7141, Scopus ID 57188856261; e-mail khvostikov@cs.msu.ru

Глеб Витальевич Николаев – студент магистратуры факультета вычислительной математики и кибернетики, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0009-0003-0814-3997; e-mail nickolaev.gleb03@gmail.com

Дмитрий Васильевич Сорокин – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории математических методов обработки изображений факультета вычислительной математики и кибернетики, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-3299-2545; e-mail dsorokin@cs.msu.ru

Олеся Игоревна Индычко – аспирант факультета вычислительной математики и кибернетики, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0009-0007-0936-4088; e-mail olesyaindychko@gmail.com

Михаил Александрович Богуславский – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых геологического факультета, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-0133-7185, ResearcherID V-4671-2017; e-mail mboguslavskiy@yandex.ru

Андрей Серджевич Крылов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией математических методов обработки изображений факультета факультета вычислительной математики и кибернетики, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-9910-4501, Scopus ID 7202280261, ResearcherID B-9651-2014; e-mail kryl@cs.msu.ru

Information about the authors

Dmitrii M. Korshunov – Cand. Sci. (Geol. and Miner.), Senior Researcher, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences (GIN RAS), Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-8500-7193; e-mail dmit0korsh@gmail.com

Alexander V. Khvostikov – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Researcher of the Laboratory of Mathematical Methods for Image Processing, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics (CMC), Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-4217-7141, Scopus ID 57188856261; e-mail khvostikov@cs.msu.ru

Gleb V. Nikolaev – M.Sc. Student, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics (CMC), Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; ORCID 0009-0003-0814-3997; e-mail nickolaev.gleb03@gmail.com

Dmitry V. Sorokin – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher of the Laboratory of Mathematical Methods for Image Processing, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0003-3299-2545; e-mail dsorokin@cs.msu.ru

Olesya I. Indychko – PhD-Student, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics (CMC), Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; ORCID 0009-0007-0936-4088; e-mail olesyaindychko@gmail.com

Mikhail A. Boguslavskii – Cand. Sci. (Geol. and Miner.), Associate Professor of the Department of Geology, Geochemistry and Mineral Economics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0003-0133-7185, ResearcherID V-4671-2017; e-mail mboguslavskiy@yandex.ru

Andrey S. Krylov – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Head of the Laboratory of Mathematical Methods for Image Processing, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0001-9910-4501, Scopus ID 7202280261, ResearcherID B-9651-2014; e-mail kryl@cs.msu.ru

Поступила в редакцию	30.05.2025	**Received**	30.05.2025
Поступила после рецензирования	05.07.2025	**Revised**	05.07.2025
Принята к публикации	07.07.2025	**Accepted**	07.07.2025

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обзорная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-422
УДК 550.8:551.4

Анализ цифровой модели рельефа для решения геологических задач на примере Актогайского рудного поля

Н. Сайб[1,2], Ю. Белов[3], Н. Зимановская[2] ✉, Г. Оразбекова[4], А. Третьякова[5], А. Муратова[2], И. Касенов[3]

[1] *ТОО «KeplerGroup», г. Алматы, Республика Казахстан*
[2] *Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан*
[3] *ТОО «KazGeoExploration», г. Астана, Республика Казахстан*
[4] *Университет Шакарима, г. Семей, Республика Казахстан*
[5] *ТОО «Бирюк-Алтын», г. Алматы, Республика Казахстан*
✉ *nata_zim@mail.ru*

Аннотация
Формирование рельефа отражает совокупность геологических процессов, включая тектонику, магматизм и эрозию. Цифровая модель рельефа (ЦМР) является важным инструментом при решении геологических задач, включая прогнозирование рудных объектов, особенно в условиях недостаточной геологической изученности территории. В статье рассмотрено отражение на поверхности геологических процессов, формирующих рельеф, также рассмотрен метод анализа цифровой модели рельефа (ЦМР). Представленный метод позволяет выделять особые формы рельефа, подобные тем, что были сформированы над известными месторождениями, что дает возможность добавить еще один поисковый признак при поисках порфировых месторождений и месторождений, образованных в схожих условиях формирования. Объектом для изучения рельефа над сформированными месторождениями было выбрано Актогайское рудное поле. Актогайское рудное поле расположено в Северо-Восточном Прибалхашье. Оно включает в себя два крупнейших медно-порфировых месторождения – Актогай и Айдарлы, мелкое медное месторождение Кызылкия, а также ряд медных и полиметаллических проявлений порфировой и жильной формации, приуроченных к Колдарскому массиву гранитоидов формации «пестрых батолитов». Все объекты, выявленные в пределах Актогайского рудного поля, были сформированы в определенных структурных условиях рудообразования и в разной степени затронуты эрозионными процессами. Это, в свою очередь, выражено наличием локальных форм рельефа этих объектов на дневной поверхности, которые характеризуются различными коэффициентами «энергии рельефа». Анализ поверхности ЦМР позволяет не только выделить надрудные локальные формы рельефа и их морфологические особенности, но и косвенно оценить эрозионный срез рудного объекта. По морфологическим признакам также можно разделить литологические разности вмещающих пород. Дана оценка применимости метода в зависимости от характеристик объекта, и косвенная оценка тектонической обстановки формирования месторождений. Установлено, что крупные рудные объекты (Актогай, Айдарлы, Западный штокверк) выражаются в рельефе как локальные понижения кальдерообразной формы. Эти зоны характеризуются высокой степенью текстурной неоднородности и совпадают с областями интенсивного метасоматоза. Выделены участки, морфологически и спектрально сходные с известными рудными телами, что указывает на их перспективность для дальнейших поисков. ЦМР и методы текстурного анализа позволяют выявлять геолого-структурные признаки, ассоциированные с порфировыми системами, и служат дополнительным инструментом при прогнозировании новых рудных объектов. Интеграция морфометрического и спектрального анализа повышает достоверность интерпретации геологических процессов.

Ключевые слова
цифровая модель рельефа (ЦМР), Актогайское рудное поле, медно-порфировое месторождение, Колдарский массив, текстурный анализ, спутниковые данные, кольцевые, радиальные структуры

Финансирование
Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AR 23484205).

Благодарности
Выражаем благодарность всему геологическому коллективу ТОО «KAZ Minerals Aktogay» и непосредственно главному геологу Софие Адамопоулос за проявленный интерес и поддержку в проведении целого ряда научно-исследовательских работ, результатом которых и явилась настоящая статья. Также выражаем благодарность директору и учредителям компании ТОО «Геохимэксплорэйшн» Юрию Анатольевичу Барабашу, Руслану Рафкатовичу Ивлеву и главному геологу ТОО «KAZ Minerals» Александру Григорьевичу Рассохину за профессиональные консультации и поддержку в проведении исследовательских работ.

© Сайб Н., Белов Ю., Зимановская Н., Оразбекова Г., Третьякова А., Муратова А., Касенов И. , 2025

Для цитирования
Seib N., Belov Yu., Zimanovskaya N., Orazbekova G., Tretyakova A., Muratova A., Kassenov I. Analysis of a digital terrain model for solving geological problems by the example of Aktogai ore field. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):245–261. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-422

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Review paper

Analysis of a digital terrain model for solving geological problems by the example of Aktogai ore field

N. Seib[1,2], Yu. Belov[3], N. Zimanovskaya[2] ✉, G. Orazbekova[4], A. Tretyakova[5], A. Muratova[2], I. Kasenov[3]
[1] *KeplerGroup LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan*
[2] *D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan*
[3] *KazGeoExploration LLP, Astana, Republic of Kazakhstan*
[4] *Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan*
[5] *Biruk-Altyn LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan*
✉ *nata_zim@mail.ru*

Abstract
The formation of terrain reflects a combination of geological processes, including tectonics, magmatism, and erosion. A digital terrain model (DTM) is an important tool for solving geological problems, including the prediction of ore deposits, especially in areas of low exploration maturity. The paper discusses the surface imprinting of geological processes that form a terrain, and also considers a method of digital terrain model analysis. The presented method allows identifying specific landforms similar to those formed above known deposits that makes it possible to add one more prospecting criterion when prospecting for porphyry deposits and deposits formed under similar conditions. The Aktogai ore field was selected as the object for studying the terrain above the known deposits. The Aktogai ore field is located in the northeastern part of Near-Balkhash territory. It includes two major porphyry copper deposits, Aktogai and Aidarly, a small copper deposit Kyzylkia, as well as a number of copper and polymetallic occurrences of porphyry and vein types associated with the Koldar granite massif of the "variegated batholith" formation. All objects identified within the Aktogai ore field were formed under specific structural conditions of ore formation and were affected by erosion processes to varying degrees. This, in turn, is expressed by the presence of local landforms of these objects on the day surface, which are characterized by different "terrain energy" factors. Analysis of the DTM surface allows not only to identify local landforms above an ore body and their morphological features, but also to indirectly assess the erosional truncation of the ore body. Based on morphological characteristics, it is also possible to classify host rocks lithological units. An assessment of the applicability of the method depending on the characteristics of an ore body and an indirect assessment of the tectonic conditions of deposit formation are provided. It has been established that large ore deposits (Aktogai, Aidarly, Zapadny Stockwork) manifest themselves in the terrain as local cauldron subsidences. These zones are characterized by a high degree of textural heterogeneity and coincide with areas of intense metasomatism. Areas morphologically and spectrally similar to the areas of known ore bodies have been identified, indicating their potential for further exploration. DTM and textural analysis methods allow identifying geological and structural features associated with porphyry systems and serve as an additional tool for predicting new ore bodies/deposits. The integration of morphometric (physiographic) and spectral analysis increases the reliability of the interpretation of geological processes.

Keywords
digital terrain model (DTM), Aktogai ore field, porphyry copper deposit, Koldar massif, textural analysis, satellite data, ring structures, radial structures

Financing
This work was performed with state financing backing from the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant No. AR 23484205).

Acknowledgements
We would like to express our gratitude to the entire geological team of KAZ Minerals Aktogai LLP and, in particular, to Chief Geologist Sofia Adamopoulos for their interest and support in conducting a series of researches, which resulted in this paper. We would also like to express our gratitude to the director and founders of Geokhimeksploraishn LLP, Yuri Anatolyevich Barabash and Ruslan Rafkatovich Ivlev, and to the Chief Geologist of KAZ Minerals LLP, Alexander Grigoryevich Rassokhin, for their professional advices and support in conducting the research work.

For citation
Seib N., Belov Yu., Zimanovskaya N., Orazbekova G., Tretyakova A., Muratova A., Kassenov I. Analysis of a digital terrain model for solving geological problems by the example of Aktogai ore field. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):245–261. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-422

Введение

Анализ морфологических структур необходим для решения многих геологических задач. Современный рельеф, как правило, является отражением нескольких наложенных геологических процессов. Выделение отдельных форм рельефа и анализ их взаимного расположения позволяют установить периодичность геологического развития региона. Соответственно, конкретные геологические задачи подразумевают выделение отдельных рельефных форм: это выделение контуров и структурные позиции изучаемых объектов, их взаимное расположение и масштабность проявления, а также некоторые физико-географические особенности, например, оценка эрозионных процессов, которые, в свою очередь, указывают на тектонические изменения региона. В одних случаях необходимо выделение регионального рельефа, в других требуется выделение локальных форм. Накоплен огромный опыт распознавания форм рельефа и их интерпретации для реконструкции различных геологических процессов [1–3].

С развитием матричных электронных моделей высотных поверхностей и компьютерных технологий появились и новые возможности анализа [4–6]. Матрицы высотных отметок могут быть построены при использовании радарных данных, при реконструкции рельефа с полученных изображений стереопар, при получении высотных отметок с использованием GPS и лазерных технологий. Часто эти методы скомбинированы и дополнены информацией из различных источников [7, 8]. Возможность работы с абсолютными и относительными величинами высот позволяет не только качественно оценить объекты, но и дать количественную оценку некоторым процессам [9, 10].

Целью настоящего исследования является разработка методики интерпретации геоморфологических признаков формирования и эрозионной переработки медно-порфировых месторождений на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) и текстурного анализа с последующим применением результатов для выявления перспективных объектов рудной минерализации на примере Актогайского рудного поля.

В рамках исследования предложено использовать параметры рельефа как дополнительный поисковый критерий, позволяющий оценивать тектоническую обстановку, глубину эрозионного среза и пространственное положение рудных тел относительно дневной поверхности. Новизна работы заключается в интеграции анализа ЦМР, текстурных характеристик и данных классификации спутниковых изображений для комплексного прогноза зон метасоматических изменений и потенциальной рудной минерализации.

При выполнении настоящего исследования нами были поставлены следующие задачи:

– провести геолого-структурный анализ Актогайского рудного поля и обосновать его выбор в качестве эталонной площадки для оценки рельефа над порфировыми месторождениями;

– построить и интерпретировать цифровую модель рельефа (ЦМР) на основе спутниковых данных GeoEye-1 и других источников, определить локальные формы понижений и остаточную поверхность;

– выполнить текстурный анализ рельефа (включая энтропию, асимметрию, энергию рельефа и др.) с целью выявления структурных и литологических неоднородностей;

– сопоставить результаты анализа рельефа с известными зонами метасоматических изменений и рудными штокверками, выявить взаимосвязи между морфологией рельефа и глубиной эрозии;

– провести классификацию спектральных данных для выделения литологических разностей и вторичных минеральных ореолов, сравнить с результатами анализа рельефа;

– оценить информативность каждого метода и предложить интегральный подход к прогнозированию перспективных участков с признаками рудной минерализации.

Описанный ниже пример демонстрирует возможность использовать анализ рельефа при решении геологических задач. Работа проведена на примере Актогайского рудного поля, расположенного в Аягозском районе Восточно-Казахстанской области. Основой является нахождение фоновой (региональной) поверхности, которая одновременно дает информацию о региональном рельефе или относительно которой возможны вычисления резидуальной (остаточной) поверхности для обособления локальных форм и анализа текстурных особенностей рельефа.

1. Геологическая позиция и теоретические основы

Актогайская группа медно-молибден-порфировых месторождений – Актогай, Айдарлы и Кызылкия, расположены к северо-востоку от озера Балхаш в Восточном Казахстане, в 450 км к северо-востоку от Алматы. В совокупности они имеют общие ресурсы более 3 млрд т руды, содержащей более 10 млн т меди и около 60 т Au.

Существует большой интерес к изучению закономерностей размещения рудной минерализации в центрально-азиатском регионе. Совокупность исследований последних лет выявляет четкую закономерность приуроченности оруденения к конкретным региональным структурно-тектоническим обстановкам. На основе работ по реконструкции формирования геологической обстановки региона [11, 12] были выявлены закономерности размещения известных крупных медно-порфировых систем в азиатском регионе [13, 14].

Порфиро-эпитермальные минеральные системы в основном считаются образующимися в магматических дугах (как континентальных, так и океанических), связанных с активными континентальными окраинами [15, 16]. Не является исключением и Актогайское рудное поле, расположенное в активной окраине Балхаш-Илийского вулкано-плутонического пояса Казахско-Монгольской магматической дуги и связанное с постколлизионным интрузивным комплексом начала позднего палеозоя (рис. 1) [12].

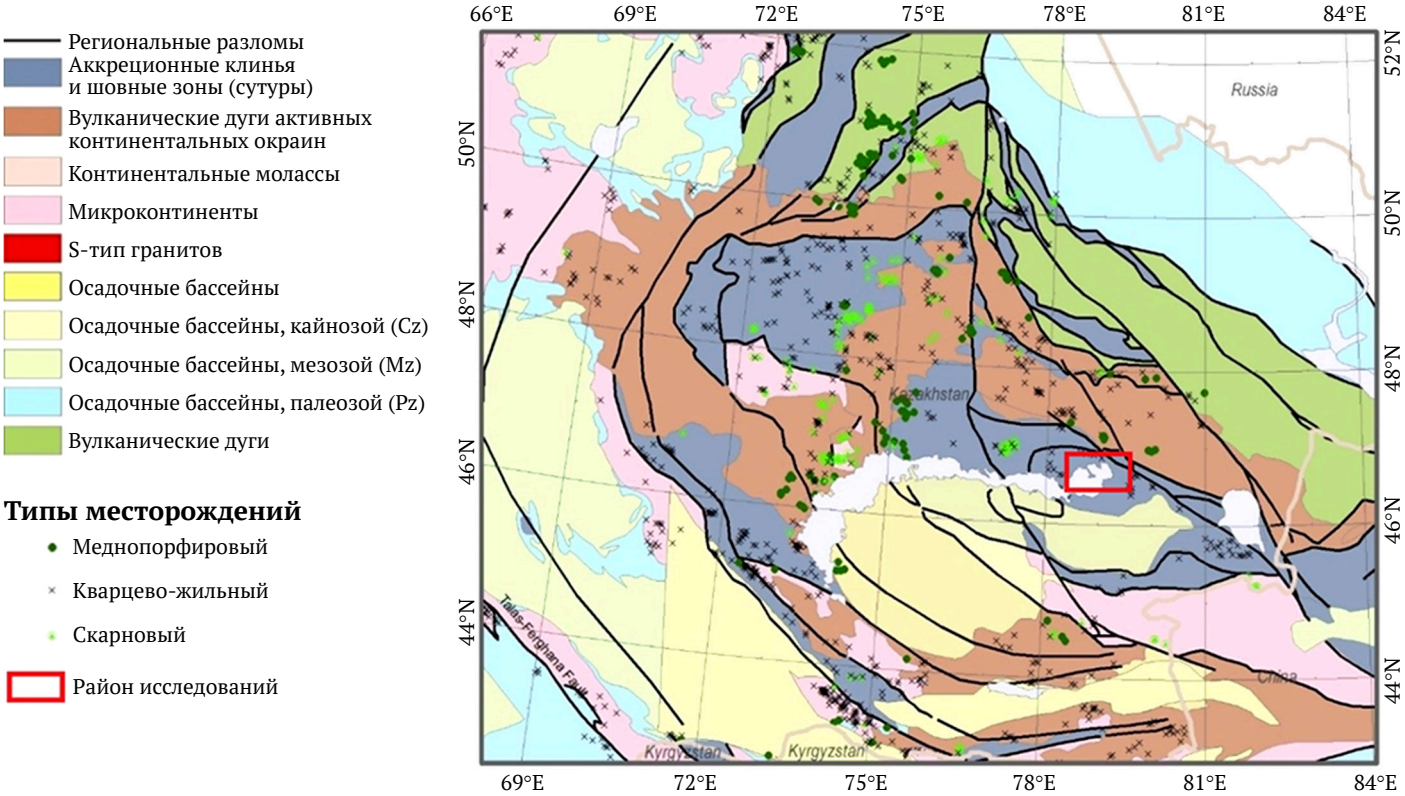


Рис. 1. Положение изучаемого участка на геологической карте-схеме Балхаш-Джунгарской металлогенической провинции (модифицирована по Windley et.all., 2007)

Предполагается, что во всех случаях отложения формировались на мелких уровнях коры: <1,5 км – для эпитермальных и <6 км – для порфировых систем. Из-за малой глубины залегания месторождения подвержены относительно быстрой эрозии и имеют низкий потенциал сохранения, это объясняет тот факт, что геологически старые (палеозойские или более древние) месторождения редки. Минеральные отложения, которые образуются в порфирово-эпитермальной минеральной системе, как правило, имеют пространственную и временную связь с промежуточными и фельзитовыми субаэральными вулканическими породами и соответствующими субвулканическими интрузиями.

Рудообразующие интрузии месторождения Актогай сформировались в дуговой обстановке 331,4–327,5 млн лет назад в результате частичного плавления утолщенной, эклогитизированной и богатой сульфидами ювенильной нижней коры [17]. Рудовмещающий Колдарский плутон сформировался в дуговой обстановке 366–336 млн лет назад [18] в период столкновения Сибирской платформы с Казахским континентом и Балтийско-Уральским блоком [19] и в период закрытия Джунгаро-Балхашского моря [20]. Колдарский массив считается комагматичным с керегетасским вулканогенным комплексом, время формирования которого – поздний карбон.

Колдарский плутон площадью 75 км^2 представляет собой сложную интрузию (рис. 2) [21]. В составе Колдарского массива выделяются образования трех фаз: *1* – габбро-диориты, габбро-диабазы, меланократовые диориты, кварцевые диориты, гранодиориты; *2* – граниты батолитовые; *3* – микрограниты порфировидные, гранит-порфиры (вероятно, краевые фации интрузива). Массив преимущественно представлен диоритами и кварцевыми диоритами [22].

Три основных месторождения Актогайского рудного поля связаны со штокоподобными гранодиоритовыми и плагиогранитовыми порфирами, проникающими в обширный лакколитоподобный массив Колдар поздне-каменноугольного возраста [23], и с крупным ксенолитом каменноугольных вулканогенно-осадочных пород в пределах плутона. Рудообразующие интрузии при внедрении вызвали сильные гидротермальные изменения.

В разрезах представлены пласты средне-верхнекарбоновых вулканогенно-осадочных пород керегетасской группы и верхнекарбоновой-нижнепермской колдарской группы. Первая представляет собой набор андезитов с небольшим количеством риолита, песчаника и алевролита, а вторая включает набор осадочных пород, вулканогенно-осадочных пород и незначительное количество кислых туфов [18, 24].

1.1. Месторождение Актогай

Месторождение Актогай приурочено к восточной части Центрального Актогайского массива. Плутон внедрился в виде порфиритового тела гранодиоритов, которое, в свою очередь, рассекает диорит, кварц-диорит и гранодиорит Колдарского плутона.

Порфиритовый гранодиорит разрезан удлиненным штоком, состоящим из рудоносных гранодиоритовых и плагиогранитовых (тоналитовых) порфиров, сопровождаемых серией трубчатых тел эксплозивных брекчий с кварцево-биотитовой и серицит-турмалиновой матрицами, образовавшихся вместе с порфировой интрузией. Жильные породы комплекса проявлены сравнительно умеренно, представлены диоритовыми и диабазовыми порфиритами, кварцевыми и дацитовыми порфирами. Специальную группу представляют малые тела и дайки гранодиорит-порфиров с мелкозернистым и гранодиорит-порфиры со стекловатым базисом, а также крупные дайкообразные тела гранитов участка Айдарлы [25, 26].

Рудосодержащий штокверк располагается в наружной зоне контакта порфирового штока, образуя конусообразное тело, сужающееся вниз, которое сжимается на глубине в ряд линейных западно-северо-западных минерализованных зон. На поверхности рудное тело имеет эллиптическую кольцевую форму, частично раскрытую к западу, с максимальным диаметром около 2500 м и радиальной шириной от 80 до 530 м [26]. Наиболее поздние жильные образования, возможно уже пермские, представлены пострудными диабазовыми и андезитовыми порфиритами.

Все породы в области рудного тела, за исключением поздних мафических даек, были изменены. Безрудное ядро конуса состоит из кремнистой зоны, состоящей из кварцевых тел, окруженных плотной сеткой безрудных кварцевых прожилков, и тонкой зоны серицит-кварцевого изменения. По краям силицизированное ядро выходит в густую зону ранних калиевых изменений, включающих калиевый полевой шпат, биотит, охватывающих основное кольцевое рудное тело. В эту калиевую зону включены несколько линейных интервалов, которые слабо минерализованы, но сильно изменены полевым шпатом и окружены широким ореолом биотита. Филлические изменения, характеризующиеся кварц-(карбонат)-хлорит-серицитом, проявляются в виде непостоянных, тонких линейных зон, ограниченных контактами апофизов гранодиоритового порфира и зонами трещиноватости вдоль флангов рудного тела. Периферия медно-порфировой системы

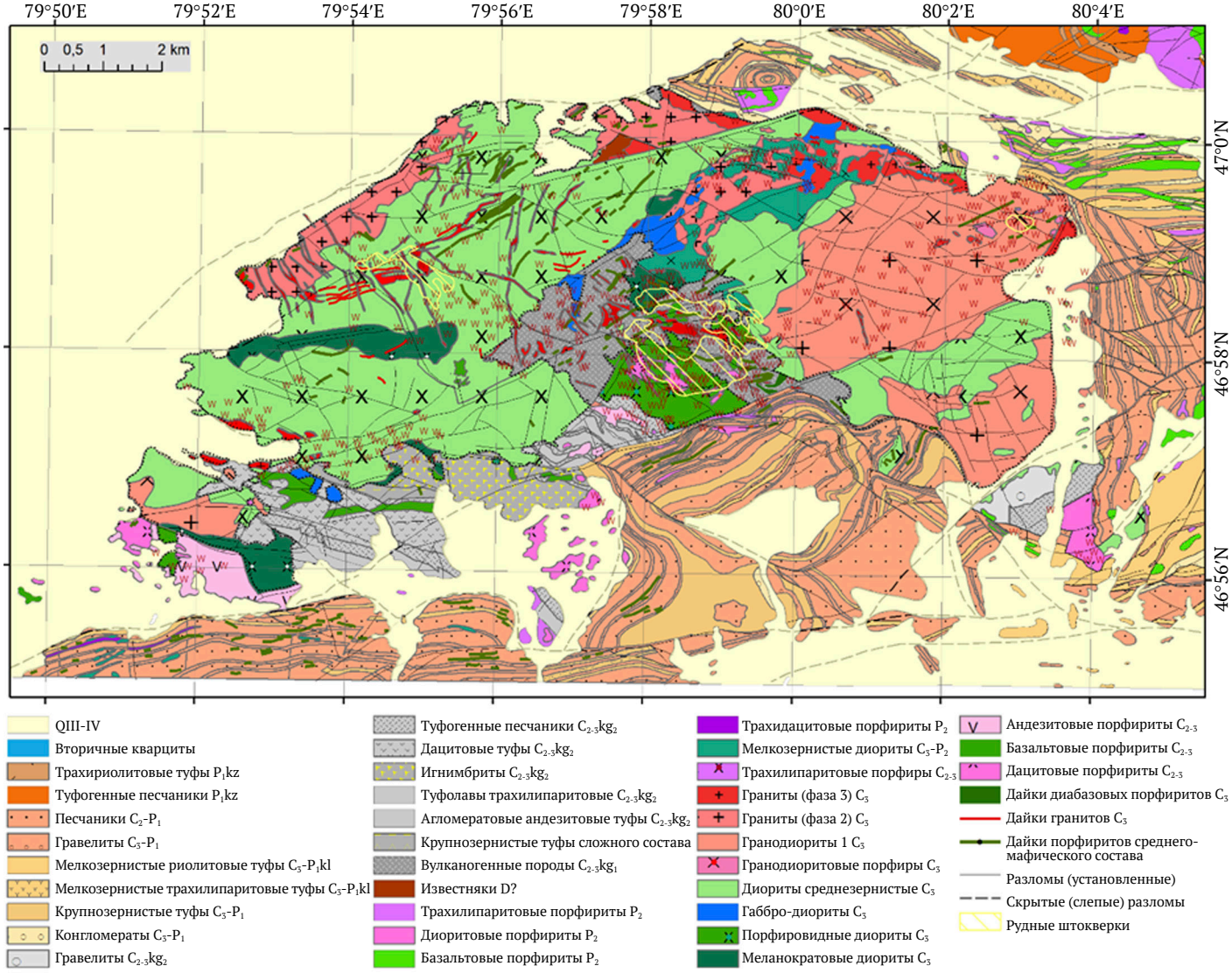


Рис. 2. Геологическая карта Колдарского массива (по Сергийко Ю.А. и др., 1980)

окружена большим пропилитовым гало, содержащим эпидот-амфибол и альбит-хлорит-пренит. Минерализованная система демонстрирует внешнюю зональность от борнита-халькопирита в центре до халькопирита-пирита и пиритового галло на внешних полях. Медь и молибден перекрываются, в то время как свинцово-цинковая минерализация ограничена зонами карбонатизации на боковых сторонах рудного тела [27].

1.2. Месторождение Айдарлы

Месторождение Айдарлы расположено примерно в 4 км к северо-западу от месторождения Актогай и находится в пределах того же самого удлиненного ореола сульфидных изменений размером 8×2 км. Оно сосредоточено на небольшом северо-западном продолжении рудоносного гранодиоритового порфира, который проникает в диоритовые, кварцевые диоритовые и гранитные фазы Колдарского плутона. Край гранодиоритового порфира имеет крутые контакты, характеризующиеся многочисленными апофизами, и сопровождается серией раздробленных даек одного состава северо-восточного и северо-западного направления. Все эти интрузивы прорезаются поздними кварцевыми диоритами и долеритами. Мелкие трубчатые брекчиевые тела вблизи гранодиоритового порфира состоят из сцементированных фрагментов минерализованных пород [27].

Минерализация ограничена внешними границами штока и окружающего Колдарского плутона и тесно связана со штоком. На поверхности рудное тело обнажается в виде вытянутого северо-западного кольца, окружая слегка минерализованный гранодиорит-порфир. Рудное тело, в отличие от Актогая, напоминает расширяющийся вниз конус с безрудной сердцевиной, занятой слабоминерализованным гранодиоритовым порфиром и зоной окварцевания. Изменения и минеральное районирование аналогичны описанным на Актогае. Выходящий на поверхность гранодиоритовый порфир подвергался незначительной силицизации и серицитизации. На глубине 600 м порфир имеет безрудное ядро интенсивного окварцевания с рассеянным ангидритом на его внешних краях. По периферии порфировой системы силицизация переходит наружу в калиевую модификацию кварца-калиевого полевого шпата-биотита. Выше в системе, на средних и приповерхностных глубинах, эта картина перекрывается зоной филлитизации, характеризуемой кварц-серицитом-хлоритом-карбонатом, с редкой турмалинизацией. В свою очередь, калиевая зона окружена широким ореолом пропилитовых изменений.

Рудный Cu-Mo штокверк сконцентрирован в ранней калиевой зоне, где проявлена серицитизация. Хотя большинство аспектов минерализации и изменений аналогичны описанным выше для Актогая, месторождение отличается тем, что имеет более обширную и лучше развитую зону полиметаллических (Pb-Zn) прожилков и прожилков на внешних окраинах. Сравнения показывают, что месторождение Айдарлы менее эродировано, чем Актогай.

1.3. Месторождение Кызылкия

Небольшое месторождение Кызылкия находится в 4 км к востоку от месторождения Актогай, на противоположной стороне от месторождения Айдарлы (см. рис. 2). На месторождении Cu-Mo минерализация связана с небольшим штоком гранодиоритового порфира, внедряющимся в гранодиориты Колдарского плутона. Рудные тела присутствуют в виде ряда эшелоноподобных зон халькозин-борнит-халькопиритной руды, сопровождаемой неустойчивыми *K*-силикатными и серицитовыми изменениями [27]. Для рудного штокверка Кызылкия характерны более низкие, чем на Актогае и Айдарлах, содержания серы и, соответственно, слабое развитие пиритизации, существенно меньший объем гипогенных халькозина и борнита. По морфологии рудных тел, составу и характеру распределения метасоматических изменений, качеству рудной минерализации и их зональности месторождение Кызылкия сопоставляется с корневыми частями месторождения Актогай[1], что свидетельствует о глубокой эрозии на востоке.

Специфичен характер метасоматических преобразований пород на месторождении Кызылкия. Пропилиты высокотемпературной амфибол-эпидотовой стадии развиты в виде узких полос на северо-западе и юго-востоке штокверка. Среднетемпературные альбит-пренит-хлоритовые пропилиты в виде полукольца обрамляют штокверк с северо-востока и юго-востока[2]. Процесс биотитизации на месторождении развит очень широко. Кварц-калишпатовые метасоматиты с реликтами исходных пород зафиксированы на юге, юго-западе и северо-западе (за пределами рудного штокверка). Слабо проявленная калишпатизация отмечается в центре рудного штокверка и в виде маломощных зон на севере и востоке за его пределами. Кварц-серицитовые метасоматиты распространены лишь у южной границы рудного штокверка, слегка выходя за его пределы. Аргиллизация в пределах штокверка Кызылкия проявлена лишь на юго-западе в виде двух узких зонок. Турмалинизация широко проявлена на месторождении, особенно в его юго-западной оконечности. Карбонатизация охватывает практически весь штокверк; цеолитизация – его северную часть и отдельными пятнами отмечается на юге[3]. Можно отметить, что метасоматоз, ведущий к значительному разрушению пород (агиллизация, серицитизация), здесь проявлен незначительно.

Месторождения Актогай и Айдарлы приурочены к зоне Актогайского глубинного разлома, Кызылкия – к зоне параллельного Икбасского разлома. Общая площадь сульфидной минерализации составляет 26 км^2. Она имеет слабовыраженную дугообразную форму, выпуклой стороной обращенную к югу. Протяженность зоны с запада на восток около 14 км при ши-

[1] Ivlev R.R. Volumetric geochemical zoning of porphyry copper systems and its practical significance. [PhD Dissertation]. 1987.

[2] Ibid.

[3] Ibid.

рине от 1–1,5 до 3–3,5 км. Кажущаяся поляризуемость пород в аномальной зоне изменяется от 4 до 26 %.

Менее значимые аномалии ВП выделены в 1–1,5 км к северу от месторождения Актогай, на таком же расстоянии к югу от месторождения, а также на крайнем юго-западе. Часть из них отвечает небольшим проявлениям медно-порфировой формации.

1.4. Геолого-литологические особенности, влияющие на рельеф порфировых месторождений

Рельеф поверхности является отражением тектонических и эрозионных процессов, происходящих в регионе. Оценка неоднородности рельефа, его текстуры, относительной разницы эрозионных врезов дает возможность наряду с другими методами охарактеризовать особенности региона [28, 29].

Все медно-порфировые месторождения Казахстана образовались более 200–400 млн лет назад. Наиболее древние месторождения в большинстве своем были денудированы в результате многократных тектонических процессов, возникавших на территории площади современного Казахстана. Рельеф сохранившихся и оказавшихся в приповерхностных условиях месторождений обусловлен не только первоначальной формой, но и литологическими особенностями и околорудными изменениями месторождений и вмещающих пород.

1.5. Рудоконтролирующие структуры

Образование кальдер часто связано с рудными месторождениями, включая медно-порфировые, эпитермальные, полиметаллические жилы и вулканогенные месторождения массивных сульфидов [4]. Кальдеры часто образуются над магматическими очагами в результате того, что магма внутри очага представляет собой большой источник тепла и магматических летучих веществ, управляющих гидротермальными системами [30, 31] над магматическими очагами. В результате прогрева породы над магматическим очагом подвергаются расширению и деформации, характер которых зависит от источника тепла, изотропности вмещающей среды и тектонических напряжений, существовавших во время внедрения магмы в земную кору. Наложение последующих структур происходит в рамках сформированных кальдер и несмотря на то, что за миллионы лет первоначально образованные кальдеры частично денудированы и погребены, остается их влияние на формирование денудационного рельефа. В относительно изотропной среде можно ожидать проявления радиальных и кольцевых структур, возникающих при остывании магм.

Системы трещин, жил, а также брекчий – неизбежное следствие порфирового магматизма. Как отмечают Тосдал Р.М. и Ричардс Дж.П. (Tosdal R.M., Richards J.P., 2001), порфировые интрузии могут быть пробковидными и в некоторых случаях связаны как с крутопадающими радиальными трещинами, так и с пологими концентрическими трещинами, отражающими условия напряженности, в которых преобладает магма, где два основных горизонтальных напряжения почти равны, что, в свою очередь, отражается на формировании рельефа над эродированными порфировыми системами.

Многочисленные примеры концентрических и радиальных систем трещин известны в риолитовых и порфировых месторождениях Climax-типа (молибденовых) [4, 32], однако для медно-порфировых месторождений подобная геометрия трещинообразования не характерна. В условиях различия горизонтальных напряжений чаще встречаются субпараллельные дайкообразные порфировые интрузии [33–35]. Такие условия, скорее, отражают режим напряжений в отдалённой зоне. Пластовые прожилки и трещины имеют размеры от сантиметров до дециметров, характерных для высокотемпературных калиевых изменений [33, 34], но могут распространяться на близповерхностную полнопроявленную аргиллизитовую среду. Жилы *D* (с серицитовыми ореолами) чаще становятся более широкими, более непрерывными, более широко расположенными и более изменчивыми по простиранию и падению, чем более ранние и более высокотемпературные пластовые жилы. В некоторых случаях они радиальные [35, 36]. В некоторых районах такие жилы занимают группы сопряженных разломов с незначительными (от метров до десятков метров) сдвиговыми и нормальными смещениями, которые сосредоточены на порфировой гидротермальной системе, но могут простираться на несколько километров в латеральном направлении. Жилы Main Stage в Бьютте (США, штат Монтана) простираются на 10 км с востока на запад и следуют за двумя типами разломов, которые фиксируют незначительное сжатие с востока на запад и расширение с севера на юг [4].

Основные структуры формируются на участках растяжения. Системы трещин вытягивают рудные флюиды из магматических материнских пород на глубине на более высокие уровни земной коры (как эпитермальные, так и порфировые), где происходит отложение минералов, в то время как эпитермальные флюиды эволюционируют во время восходящей миграции. Проницаемые трещины формируют геометрию рудных стволов. Синминеральные структуры смещают рудные системы. Постминеральные структурные сдвиги также влияют на геометрию рудной системы и требуют анализа при разведке перемещенных руд.

Образовавшиеся рудные месторождения могут располагаться на разных уровнях земной коры между магматическим очагом и поверхностью. Наиболее подходящие условия для подъема нагретых летучих веществ до более мелких уровней земной коры встречаются вдоль предпочтительных проницаемых зон, таких как уже существующие региональные структуры или, чаще, кальдерные структуры. С одной стороны, растяжения над магматическими источниками, разрушение и дробление пород создают кальдерообразные формы, с другой стороны, флюиды поступают по уже существующим структурам, в результате чего происходит наложение структур и увеличение существующих трещин и разломов [1]. Часто большая часть минерализации в кальдерах группируется вдоль кольцевых разломов. Во вложенных кальдерах

обычны рудные месторождения вдоль системы внешнего кольца. Существуют минерализации, соответствующие системе внутреннего кольца, совпадающей с взбросом, падающим наружу [5].

При развитии над месторождениями интенсивного метасоматоза и трещиноватости следует ожидать более интенсивного выветривания пород и, как следствие, образования негативного рельефа кальдерообразной формы. При денудации, достигающей кварцевого ядра или подводящих мелкокристаллических даек, происходит инверсия рельефа, образуются позитивные формы рельефа в местах выхода более прочных пород. В случае, когда штоки внедряются в условиях сжатия, происходит деформация надинтрузивных изменений, что ведет к образованию эллиптических и более сложных форм денудаций над медно-порфировыми месторождениями.

Вполне закономерно нахождение кальдерообразных структур в Актогайском рудном поле, с формой которых можно сопоставить эрозионный срез месторождений и экстраполировать полученный результат на объекты, находящиеся на ранней стадии изучения.

1.6. Энергия рельефа

Можно предположить, что разнофазные интрузивные комплексы обладают различной крепостью и различной степенью разрушаемости. В рельефе, в свою очередь, создаются врезы различной амплитуды, что позволяет использовать «текстуру рельефа» для разделения литологических разностей и подчеркивания неявных форм рельефа [37, 38]. Кроме того, убирая региональную составляющую рельефа, можно сравнивать между собой локальные формы рельефа, находящиеся на разных высотах.

В своей работе Mark [39] описывает три высотные характеристики рельефа:

– H – энергия рельефа (Reliefenergie) – величина между минимальным и максимальным значением рельефа в каком-либо произвольно ограниченном пространстве;

– Ha – досягаемый рельеф (available relief) – вертикальное расстояние между предполагаемой поверхностью выравнивания и поверхностью, соединяющей смежные русла;

– Hd – дренажный рельеф (drainage relief) – вертикальное расстояние между смежными водоразделом и рекой.

На практике часто трудно с достаточной точностью разделить эти три понятия. Степень генерализации выборки речной сети и водоразделов размывает точное определение термина «дренажный рельеф». Если водораздел совпадает с поверхностью выравнивания, то в этом случае «дренажный рельеф» равен «досягаемому рельефу». Если мы рассматриваем «энергию рельефа» на площади между смежными рекой и водоразделом, то «энергия рельефа» будет равна «дренажному рельефу». Далее мы будем говорить об «энергии рельефа», как об объединяющем термине, описывающем неоднородность рельефа – его текстуру, и являющемся вертикальным расстоянием между водоразделом и смежной рекой. В нашем исследовании «энергия рельефа» будет выражаться через текстурный анализ рельефа, приведенный ниже.

2. Методы

2.1. Цифровая модель рельефа

Цифровая модель рельефа (ЦМР) была получена в результате обработки стереопары спутниковых данных GeoEye-1 и представлена компанией TerraLink (http://www.terralink.kz).

Визуализация модели рельефа была осуществлена комбинацией матрицы высот, окрашенной в цветовой палитре, и наложенной на нее матрицы полупрозрачной теневой поверхности, полученной при пересчете поверхности высот (рис. 3).

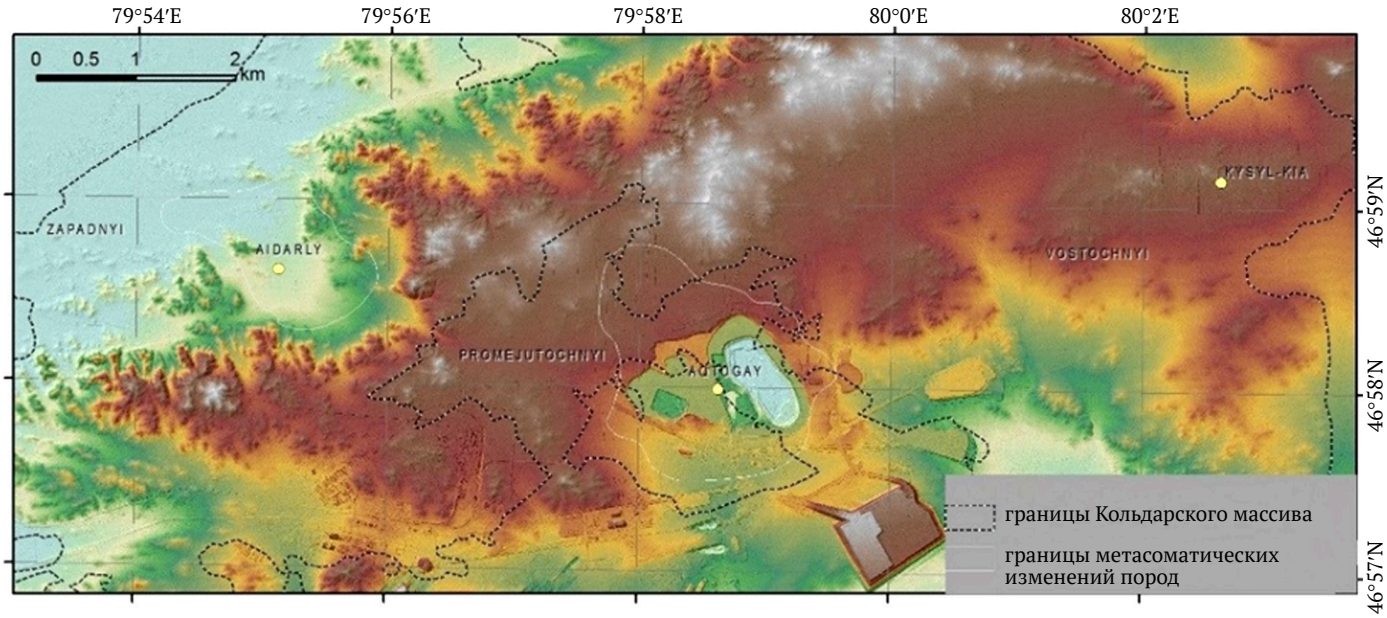


Рис. 3. Визуализация ЦМР. Поверхность ЦМР отображается в цветовом градиенте с полупрозрачным наложением затененной рельефной поверхности

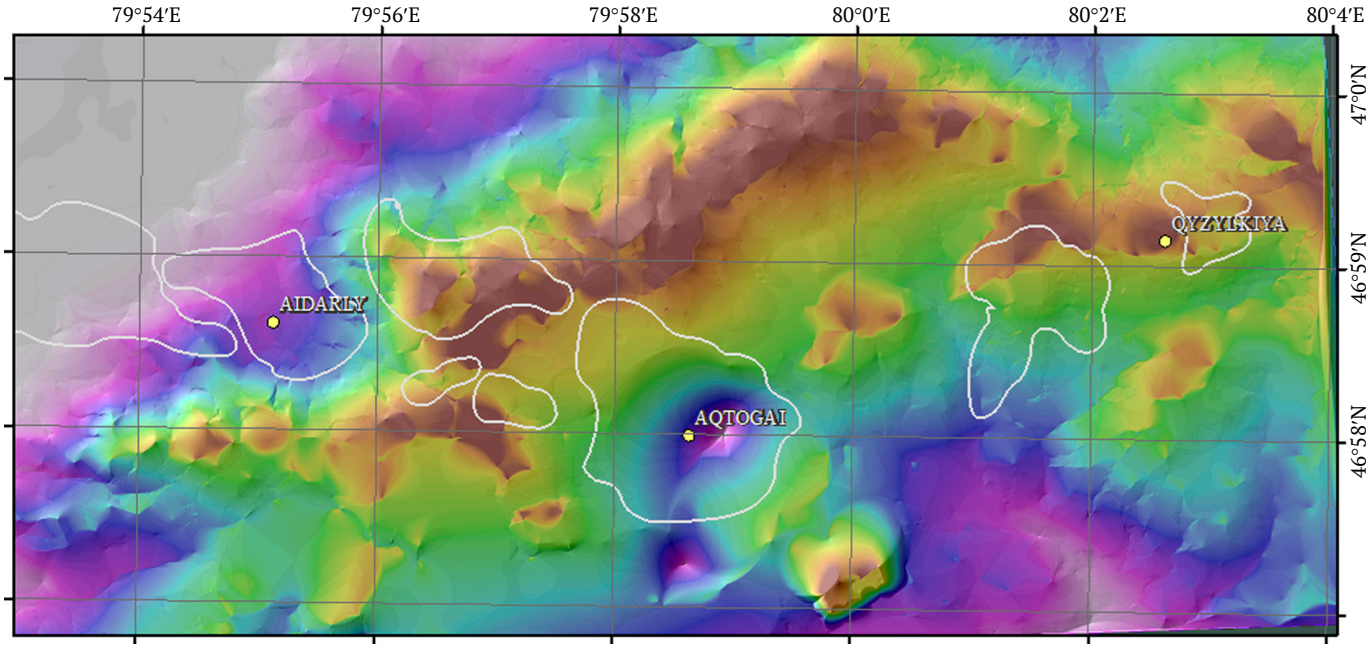


Рис. 4. Остаточная поверхность рельефа – разница между поверхностью, построенной на основе локальных топографических максимумов, и поверхностью, основанной на локальных минимумах. Контурами ограничены места проявления метасоматических изменений пород

2.2. Построение поверхности резидуального рельефа

Цель состоит в том, чтобы рассчитать разницу между сглаженной верхней, соединяющей вершины и хребты, и нижней, соединяющей речные долины, поверхностями. Но, казалось бы, на первый взгляд, простая задача нахождения сглаженной поверхности имеет определенные трудности. Сразу отпадает возможность применить стандартные математические функции, такие как «Median», «Low Pass»-фильтры, Фурье-анализ или полином. Все они дают региональный фон, но не позволяют контролировать краевые отметки высот. Остается применение сглаживающей поверхности, построенной по точкам перегиба. То есть необходимо найти экстремальные точки, иначе, вторую производную от поверхности и разделить полученные экстремальные значения по их позиции в рельефе. Такая функция реализована в пакете программ ENVI.

Алгоритм, использованный в модуле Topographic Fiatures ENVI для вычисления каналов и хребтов, был описан Wood[4]. Другой вариант выбора граничных отметок высот возможен как результат вычисления поверхностей от созданной в ArcMap (ArcScript[5]) речной сети с заданным порогом водосбора. Причем для выделения хребтов возможно использование построения речной сети на основе инвертированного рельефа [40].

На этапе отбора вершин, хребтов, ям и долин важно корректно выбрать порог сглаживания, т.е. ограничение выбора хребтов и речных долин на основе их масштабных характеристик. Интерполяция высотных отметок была проведена программным пакетом ArcMap.

При обработке данных ЦМР нами были построены сглаживающие поверхности по локальным максимумам и локальным минимумам рельефа (рис. 4).

В результате получена количественная оценка перепада высот для Актогайского рудного поля, которая может быть показана в цвете. Разница между поверхностями позволяет выделить локальные формы рельефа и площади, различающиеся по текстурным особенностям рельефа.

Выделены области локального понижения в рельефе. Зоны локального понижения рельефа были получены в результате вычитания значений ЦМР из поверхности, построенной по локальным максимумам рельефа (рис. 5).

2.3. Текстурный анализ рельефа

Текстура – это совокупность повторяющихся или закономерных вариаций яркости в локальных участках изображения. Она отражает пространственные отношения между пикселями и может описывать такие характеристики, как: однородность; коразмерность; шероховатость; анизотропность.

Текстурный анализ, который широко используется для анализа геологических структур, можно проводить несколькими методами.

Для ЦМР был проведен текстурный анализ, где сравнивалась статистическая зависимость значений пикселов в заданном окне фильтра. Посчитаны поверхности наклона, кривизны, локальных минимумов и локальных максимумов, энтропия, гомогенность, среднее значение, асимметрия гистограммы.

[4] Wood J.D. The geomorphological characterisation of digital elevation models. [PhD thesis]. University of Leicester, UK; 1996. 466 p.

[5] Galang J. ArcGIS Script #13836 ArcScripts; 2005. URL: http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=13836

Эти методы оценивают текстуру на основе статистических характеристик изображения: матрицы совместной встречаемости уровней серого (GLCM, Gray-Level Co-occurrence Matrix). Создается матрица, показывающая, как часто пара пикселей с определенными яркостями встречается на заданном расстоянии и под углом друг к другу.

Из этой матрицы вычислены текстурные параметры:

– энергия – мера однородности текстуры;

– контраст – оценивает различия между соседними пикселями;

– корреляция – степень линейной зависимости между соседними пикселями;

– энтропия – характеризует хаотичность текстуры;

– анизотропия (Skewness) – характеризует явно выраженное направление.

Для полученных матриц эмпирически подобраны интервалы классификации и визуализированы для контрастности в цветовой палитре.

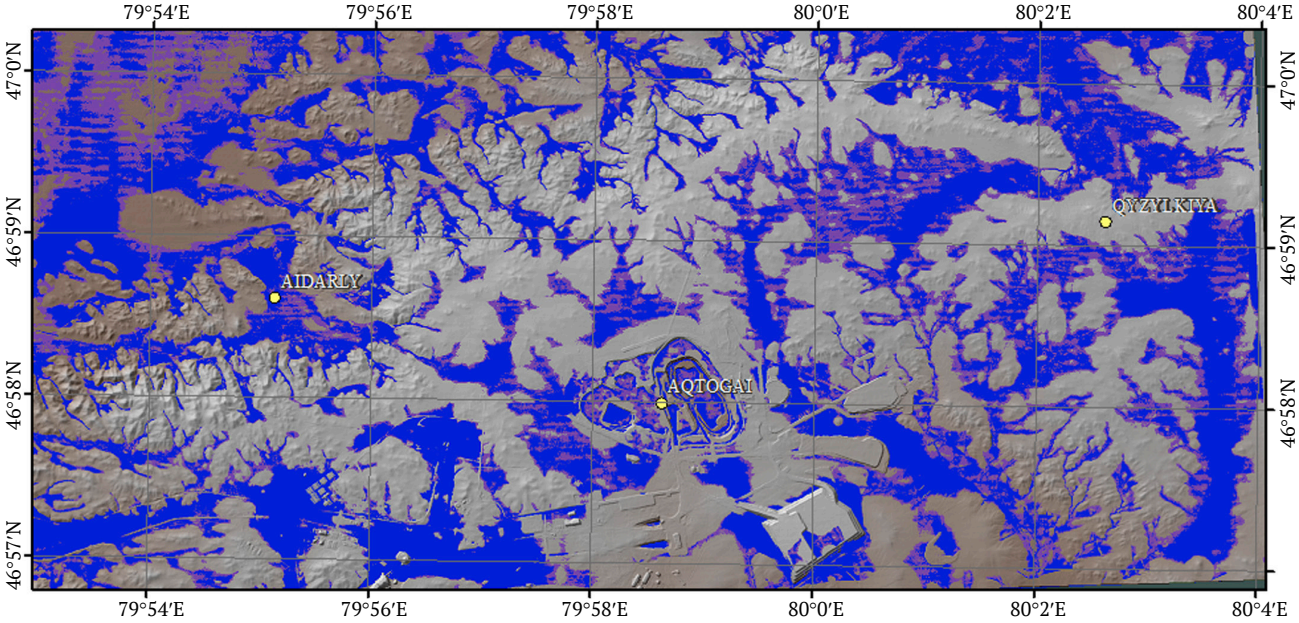


Рис. 5. Отображение зон локального понижения рельефа (выделены синим цветом)

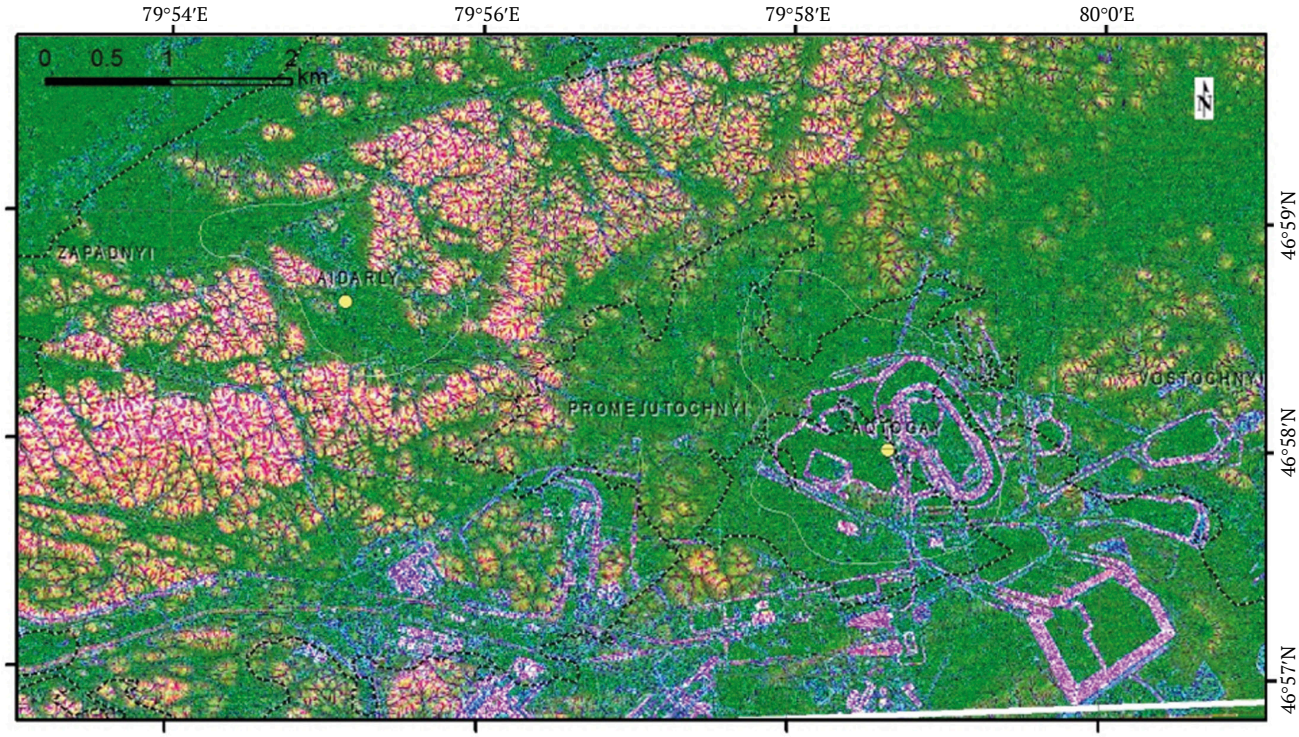


Рис. 6. Комбинация каналов RGB: *R* – наклон, *G* – затененный рельеф и *B* – среднеквадратичное значение. Четко выделяются интрузивные комплексы и антропогенные изменения

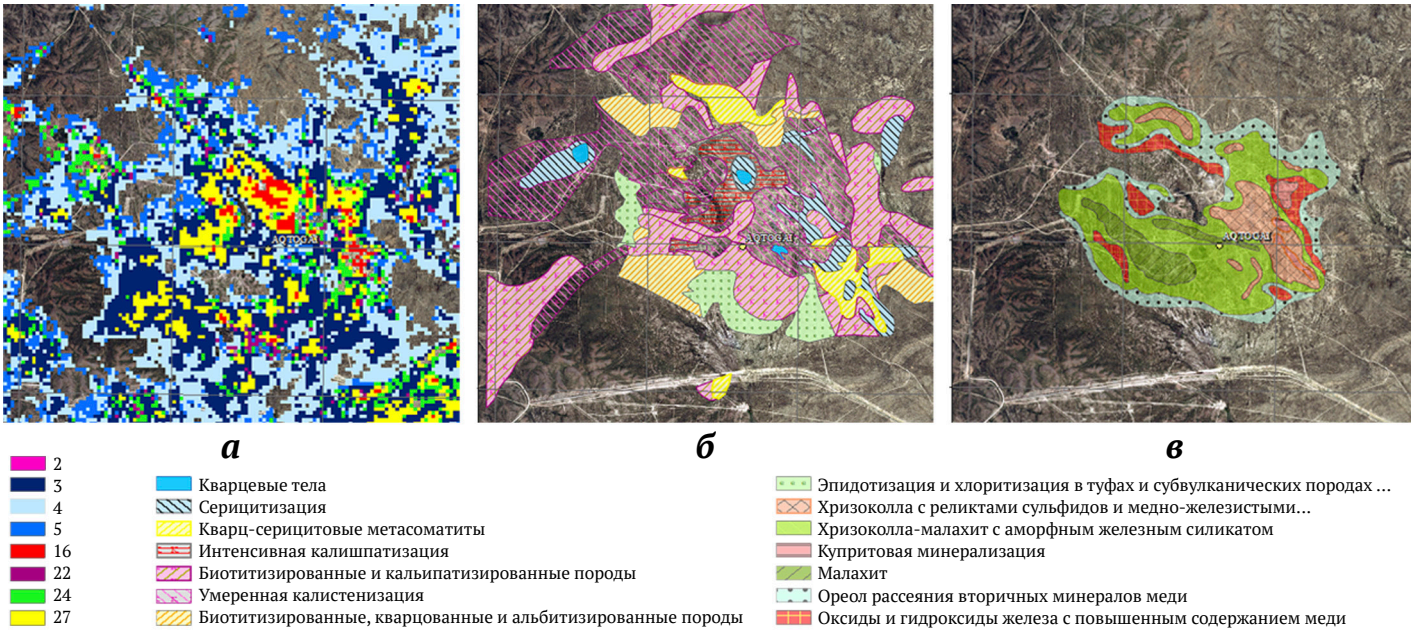


Рис. 7. Неконтролируемая классификация (*а*), карта метасоматических изменений на месторождении Актогай (модификация: Жуков и др., 1979) (*б*), карта гипергенных минеральных ассоциаций (модификация: Сергийко и др., 1980) (*в*)

Используя текстурный анализ, мы получаем следующие преимущества: повышение точности классификации объектов; обнаружение скрытых закономерностей, которые невозможно выявить при анализе только спектральных характеристик. Для анализа рельефа поверхности использовалось программное обеспечение для топографического моделирования в ENVI[6].

Комбинации каналов RGB позволяют создавать контрастные различия в рельефе, обусловленные литологическими особенностями и геологическими процессами его формирования. На рис. 6 используется наиболее информативная комбинация каналов RGB, где R = наклон, G = затененный рельеф и B = среднеквадратичное значение. Изображение четко показывает литологические различия между горными породами и антропогенные изменения, вызванные добычей полезных ископаемых.

Используя текстурный анализ, мы достигаем следующих преимуществ: повышаем точность классификации объектов и обнаруживаем скрытые закономерности, которые невозможно выявить только с помощью анализа спектральных характеристик.

2.4. Классификация спектральных данных

В проекте были использованы различные методы выделения рудной зоны, которые будут описаны в новой статье. В данной работе мы сравниваем результаты, полученные в результате обработки поверхности рельефа, с результатами, полученными после классификации спектральных данных, поэтому приводим здесь методику этого метода.

На первом этапе выбор классов был осуществлен по выделяемым в результате обработки объектам. Было выделено 37 классов, которые были использованы для классификации с применением нескольких способов статистического анализа. В результате были выделены некоторые литологические разности пород и зоны вторичной минерализации над рудными штокверками. Для неконтролируемой классификации на небольшом участке, объединяющем месторождения Актогай, Айдарлы и Промежуточный штокверк, было эмпирически подобрано 30 классов с использованием алгоритма *K-means*.

Для неконтролируемой классификации был осуществлен подбор количества классов так, чтобы были проявлены зоны известных месторождений. После применения метода были выбраны 8 классов, входящих в пределы контура месторождения Актогай. Выделенные классы были сравнены с картой проявления метасоматической зональности, составленной Жуковым и др., 1979 (рис. 7, *б*) [41], и с картой проявления гипергенной минерализации из отчета Сергийко и др., 1980 (рис. 7, *в*) [42].

При увеличении участка до месторождения Кызылкия количество неконтролируемых классов увеличено до 35. Классы преобразованы в маску, которую можно наложить на матрицы, полученные в результате других этапов обработки.

3. Результаты и дискуссии

По своим особенностям месторождения Актогай, Айдарлы, Кызылкия и рудные штокверки Западный, Промежуточный и Восточный имеют общие черты, характерные в целом для системы медно-молибден-порфировых месторождений, и свои отличительные особенности.

Из всего обработанного материала были выбраны наиболее информативные результаты и произведен их сравнительный анализ с исходной информацией.

[6] NV5 Geospatial. NV5 Geospatial Software. [Accessed: April 20, 2025] URL: https://www.nv5geospatialsoftware.com

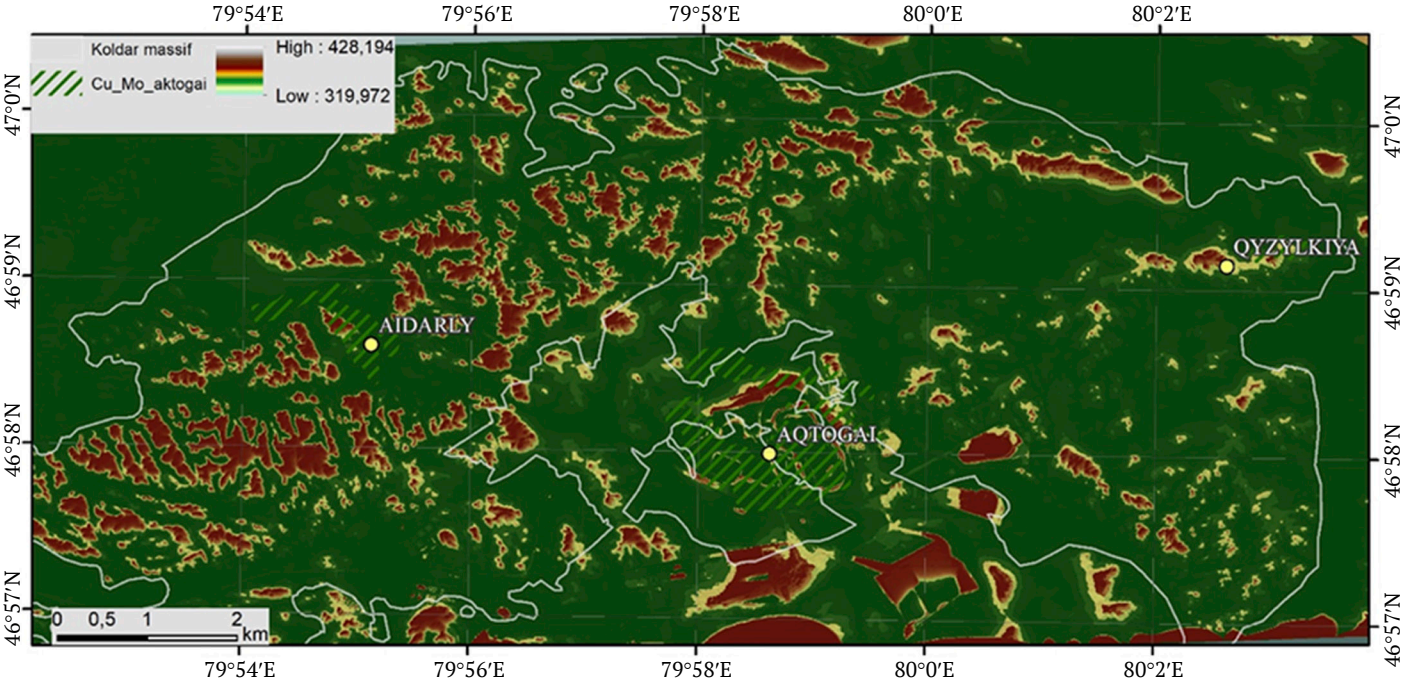


Рис. 8. Локальные впадины в рельефе (разница между цифровой моделью поверхности и поверхностью, соединяющей локальные минимумы)

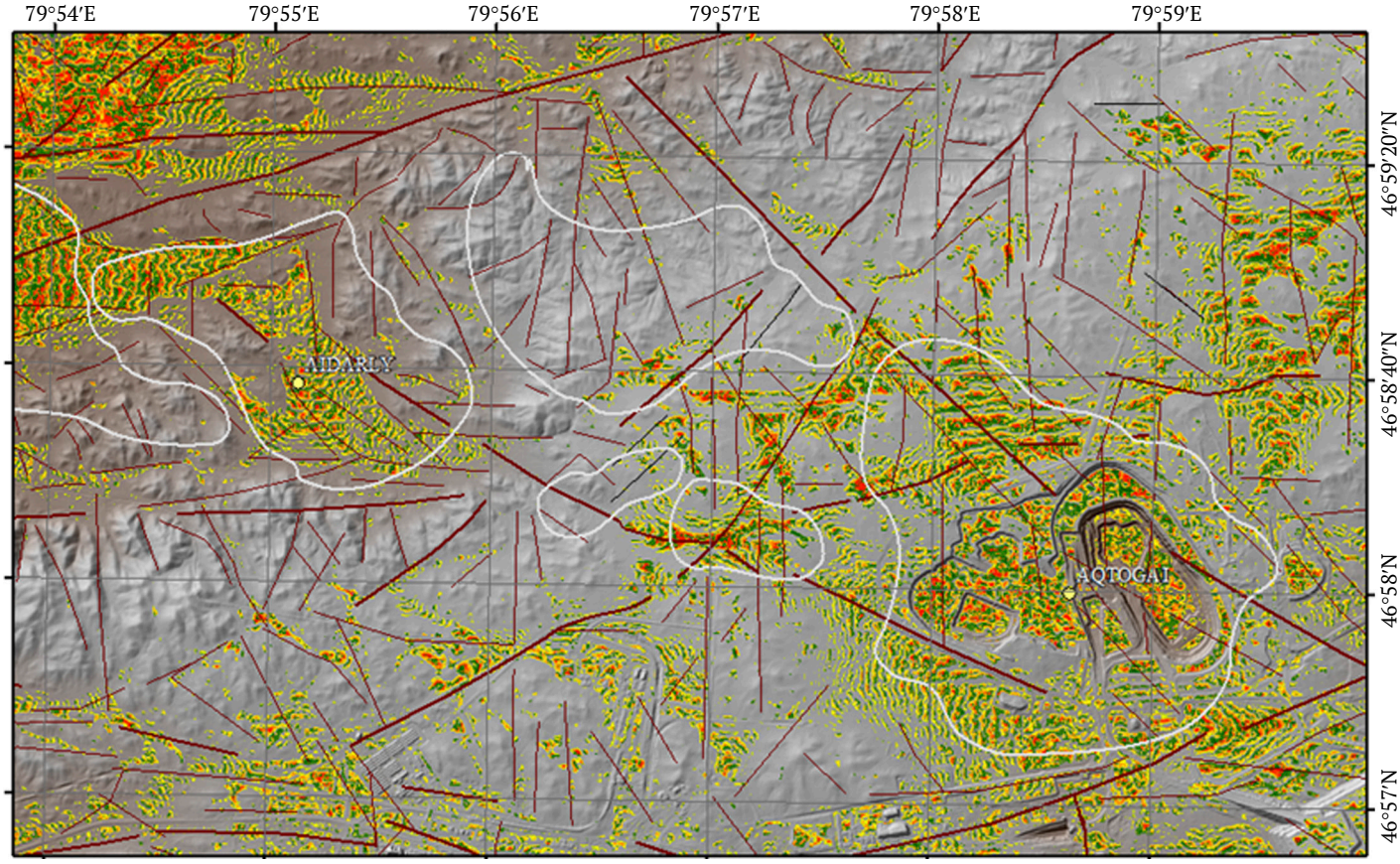


Рис. 9. ЦМР и наложенная маска положительных значений асимметрии гистограммы цифровых значений поверхности рельефа. Контурами обозначены известные зоны минерализации проявления кварц-серицит-хлоритовых метасоматических изменений. Стрелкой указан кластер, пространственно совпадающий с зоной, перспективной для дальнейших поисков, выделенной другими методами

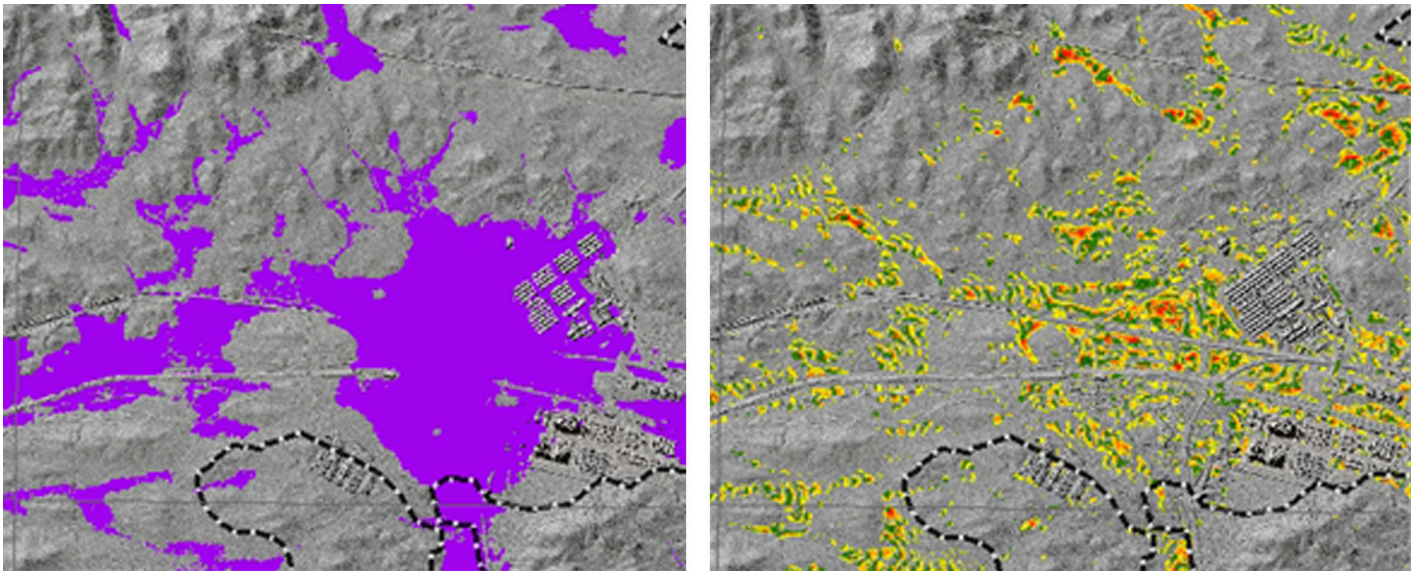


Рис. 10. Слева: область, очерченная локальной топографической впадиной; справа: положительные значения асимметрии цифровой гистограммы поверхности рельефа

Анализ рельефа показывает, что крупные месторождения Айдарлы и Актогай и штокверк Западный образуют локальные понижения в рельефе – крупные кальдеры, сопоставимые с морфологией частично эродированных маароов. Такая форма обусловлена формированием системы околоштокверковых трещин и тем, что гидротермально измененные и раздробленные породы в центре структуры более податливы для эрозии относительно вмещающих пород. Развитие многочисленных даек по трещинам на месторождении обусловило усложнение кальдерообразных форм. Удлиненные формы депрессий штокверка Западного и искажение изометричных форм месторождений Айдарлы и Актогай указывают на то, что месторождения формировались в условиях сжатия. Это потверждается и направлением даек, развивающихся по основным двум направлениям в условиях транспрессии. Более глубокий эрозионный срез месторождения Аактогай приводит к выполаживанию кальдерообразной структуры, вероятно, за счет выравнивания эродируемости околорудных и рудонесущих пород. На имидже, отражающем понижение в рельефе, заметно, что кальдерообразное понижение захватывает карьер месторождения и имеет распространение к западу в сторону штокверка Промежуточный.

Месторождение Кызылкия и штокверк Восточный имеют морфологию положительного рельефа, что, вероятно, связано с тем, что верхняя часть месторождения эродирована и на поверхности выход пород более устойчивый к эрозионным процессам.

Штокверк Промежуточный выражен в рельефе небольшим локальным понижением и возвышенностью, сохранившейся, вероятно, в результате частично проявленной силисификации, проявление которой делает надрудные горизонты более устойчивыми к эрозии.

Локальные понижения в рельефе (рис. 8) подчеркивают структуру рудных штокверков и отражают в некоторой степени строение Колдарского массива. Так, по смене рисунка массив диоритов отличается от массива грано-диоритов. Понижения, сформированные речной системой, отличаются от понижений, спровоцированных наложенными штокверками и сопровождающими их гидротермальными изменениями, включающими большее количество радиальных и кольцевых структур. Кроме известных рудных штокверков, можно отметить еще ряд понижений, подобных уже известным.

Наиболее интересный результат текстурного анализа – это изменение асимметрии гистограммы поверхности ЦМР. В результате был получен имидж с контрастным распределением значений и характерным рисунком выделяемых полей, в большинстве своем совпадающих с зонами проявления метасоматических изменений, коррелирующими с понижением в рельефе (рис. 9, 10).

Выводы

При обработке и анализе были получены имиджи, позволяющие выделить тектонические нарушения и некоторые литологические разновидности пород Колдарского массива, не нашедшие отражения на существующих геологических картах рудного поля. Из анализа имиджей видно, что области положительных значений асимметрии совпадают с общим контуром метасоматических изменений, развитых на известных месторождениях. Максимально выделяются области, соответствующие в большей мере проявлению серицитизации с развитием гипергенной минералогической ассоциации – хризоколловой с реликтами сульфидов и медно-железистых силикатов. Эта область, вероятно, соответствует наиболее полно проявленному метасоматозу.

Выделяемые области положительной асимметрии подтвердили контуры рудных штокверков Промежуточный, Западный и контуры месторождения Айдарлы.

Южнее месторождения Айдарлы выделяется аномальный кластер значений положительной асимметрии гистограммы высот. Выделяемый кластер находится на пересечении разломов и в локальном понижении рельефа аналогично расположению месторождений Актогай и Айдарлы.

Для выявления аналогичных участков были сопоставлены данные локальных понижений рельефа и распространение пикселов классов спектральных данных, полученных при расчете неконтролируемой классификацией и характерных для выделяемого контура месторождения Актогай. Характерные зоны локальных понижений с проявлением метасоматоза могут быть перспективными для дальнейших поисков рудных объектов, однако надо учитывать, что локальные понижения могут быть вызваны и другими геологическими процессами, поэтому их надо рассматривать в комплексе с другими признаками рудных ассоциаций (рис. 11).

При анализе рельефа отчетливо выделяются отдельные фазы интрузивных комплексов Колдарского массива (см. рис. 4, 5). Месторождение Айдарлы и штокверк Промежуточный приурочены к интрузии, вероятно, обнажившейся в более позднее время. Она наиболее четко выражена в рельефе и имеет более высокий индекс активности рельефа.

Месторождения Актогай и Кызылкия пространственно сопряжены с интрузией, имеющей свой характерный облик – более сглаженный рельеф.

По результатам обработки и анализа спутниковых данных были обобщены характеристики рудных объектов по степени выделения (табл. 1).

Контуры неоднородностей рельефа месторождения Актогай по результатам обработки в основных чертах совпадают с установленными контурами гидротермально-измененных пород. Наиболее близко к известным контурам выделяются зоны кварц-серицитового метасоматоза.

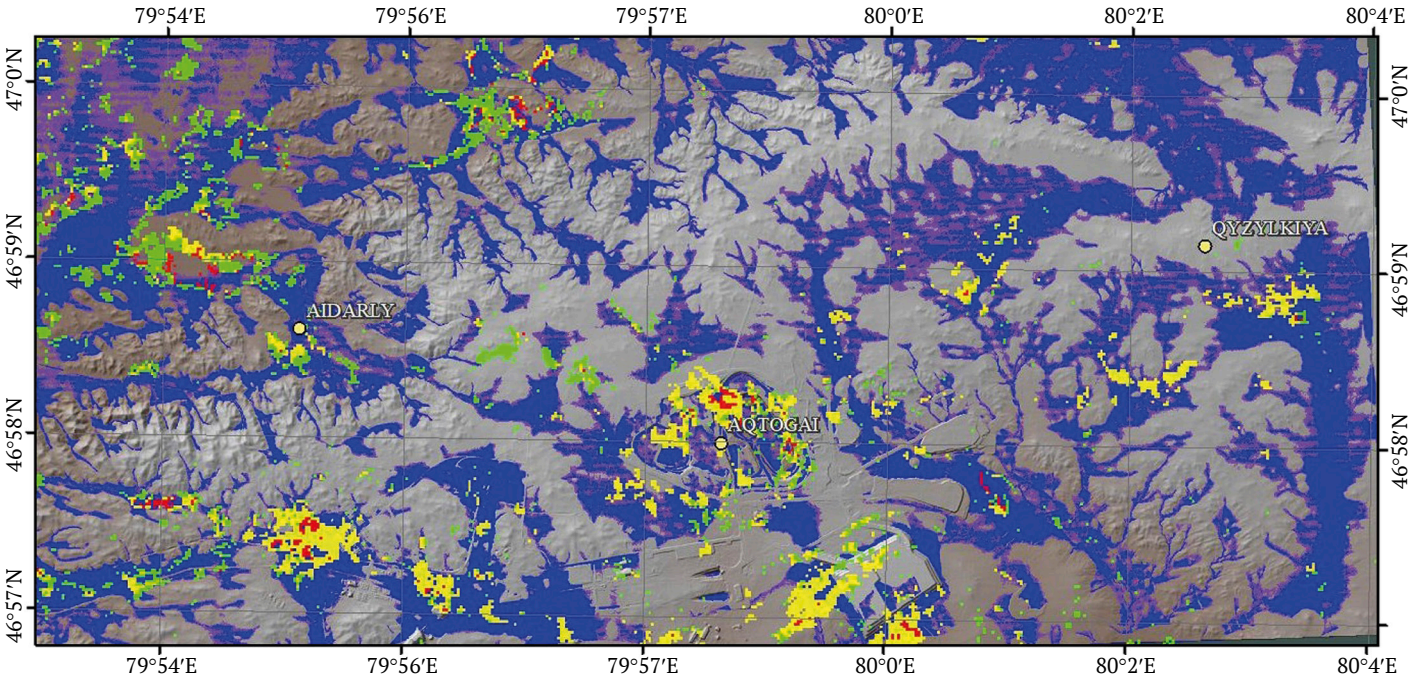


Рис. 11. Наложение результатов классификации на выделенные области локального понижения рельефа (на подложке ЦМР)

Таблица 1

Сравнительные характеристики рудных объектов по степени выделения

№	Рудный штокверк	Степень визуализации в результате обработки спутниковых данных	
		Skewness for DGM	Кальдерообразное понижение в рельефе
1	Месторождение Актогай	Выражена и совпадает с контурами интенсивно проявленного метасоматоза	Слабое блюдцеобразное понижение в рельефе с радиальными ответвлениями
2	Месторождение Айдарлы	Выражена и совпадает с контурами интенсивно проявленного метасоматоза	Отчетливо, с радиальными ответвлениями
3	Месторождение Кызылкия	Слабо выражена	Не наблюдается
4	Р. штокверк Промежуточный	Выражена	Отчетливо, с радиальными ответвлениями
5	Р. штокверк Западный	Хорошо выделяется	Отчетливо
6	Р. штокверк Восточный	Слабо выражена	Не наблюдается

Контуры неоднородности рельефа месторождения Айдарлы также совпадают с выделяемыми участками метасоматических изменений кварц-серицитового и пропилитового состава. По данным обработки цифровых моделей рельефа (ЦМР) центральная (осевая) часть месторождения выделяется квазиизометричной в плане, удлиненные локальные понижения в кальдере являются признаком формирования месторождения в условиях горизонтального тектонического сжатия.

Пространственная идентификация месторождения Кызылкия слабо выражена в рельефе по сравнению с месторождениями Актогай и Айдарлы и не может быть уверенно выделена при обработке поверхности ЦМР. Месторождение характеризуется небольшими по площади спектральными аномалиями в отдельных видах обработки.

Штокверк Промежуточный по анализу характеристик рельефа выделяется слабо и неоднозначно.

Штокверк Западный выделяется на каждом этапе обработки спутниковых данных и в рельефе занимает отчетливо пониженную часть. Его удлинённая форма, вероятно, обусловлена формированием в условиях сжатия в северо-северо-западном направлении.

Штокверк Восточный выделяется очень слабо, неуверенно.

Из описания видно, что не все штокверки могут иметь характерную форму рельефа и, как и в интерпретации геофизических данных, оценка формы рельефа может помочь при поисках, но не является достаточным признаком для уверенного выделения рудных штокверков.

В процессе обработки можно выделить следующие дополнительные участки, по своим спектральным характеристикам и форме рельефа сопоставимые с известными рудными объектами:

1. У северной рамки площади в районе пересечения Главного Колдарского разлома с Северо-Колдарским разломом, с юга ограничен Колдарским разломом. Выделяемая зона осложнена разломами более высокого порядка, радиально расходящимися от центра проявления. В той или иной степени зона проявляется и при других способах обработки. Здесь полевыми наблюдениями выявлен шток монцонитов, многочисленные жилы и прожилки кварц-эпидотовой, полевошпатовой минерализации. Распространение зон хлоритизации, а также полоса с проявлением малахитизации.

2. Зона южнее месторождения Айдарлы в локальном понижении рельефа, на пересечении разлома Малый Колдарский и разломов более высоких порядков, выделяется текстурным анализом данных ЦМР. Здесь наблюдаются зоны интенсивного хлорит-карбонатного метасоматоза и зоны интенсивной трещиноватости.

Зоны околорудных изменений были выделены комплексом методов. Наложение результатов усиливает контрастность околорудных ореолов, и в дальнейшем выделяемые зоны должны быть сопоставлены с результатами геофизических исследований и комплексной геохимией.

Анализ морфологии рельефа рекомендован нами как дополнительный. При совокупности всех методов позволяет наиболее успешно решать задачи прогнозного характера: выделять участки (площади), близкие по своим спектральным характеристикам к известным рудным объектам, и косвенно оценивать их положение относительно дневной поверхности. Участки могут быть перспективными для дальнейших поисков и должны быть заверены полевыми наблюдениями.

Список литературы / References

1. Eggers M.J. Engineering geological modelling for pit slope design in the porphyry copper-gold deposits of Southeast Asia. In: Dight P.M. (ed.) *APSSIM 2016: Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference.* Australian Centre for Geomechanics, Perth; 2016. Pp. 49–82. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1604_0.4_Eggers
2. Seib N., Kley J., Torizin J., et al. Identification of volcanic forms in a digital terrain model of the West Eifel. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*. 2008;159:657–670. https://doi.org/10.1127/1860-1804/2008/0159-0657
3. Grohmann C.H., Riccomini C., Alves F.M. SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. *Computers & Geosciences*. 2007;33(1):10–19. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.002
4. John D.A., Ayuso R.A., Barton M.D., et al. *Porphyry copper deposit model. USGS Scientific Investigations Report*, 2010–5070–B, 169 p.
5. Acocella V. Understanding caldera structure and development: An overview of analogue models compared to natural calderas. *Earth-Science Reviews*. 2007;85(3–4):125–160. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.08.004
6. Németh K., Cronin S.J. Syn- and post-eruptive erosion in tropical climate tephra ring (West Ambrym, Vanuatu). *Geomorphology*. 2007;86(1–2):115–130. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.08.016
7. Németh K. Long-term erosion-rate calculation in the Waipiata Volcanic Field (New Zealand). *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*. 2001;7(2):137–152
8. Németh K. Calculation of long-term erosion in Central Otago, New Zealand, based on erosional remnants of maar/tuff rings. *Zeitschrift für Geomorphologie.* 2003;47(1):29–49. https://doi.org/10.1127/zfg/47/2003/29
9. Seib N., Kley J., Büchel G. Identification of maars and volcanic landforms in the West Eifel Volcanic Field using DTM data. *International Journal of Earth Sciences*. 2013;102:875–891. https://doi.org/10.1007/S00531-012-0829-5
10. Seib N., Kley J. Problems of residual surface modelling for geological applications. In: *Proceedings of the Kolmogorov Readings*. Moscow, Russia; 2010. Pp. 146–151.

11. Şengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*. 1993;364:299–307. https://doi.org/10.1038/364299a0
12. Windley B.F., Alexeiev D., Xiao W., et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*. 2007;164(1):31–47. https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022
13. Seltmann R., Kröner A., Kovach V., et al. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*. 2014;25(1):103–125. https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.12.023
14. Shen P., Pan H., Hattori K., et al. Large Paleozoic and Mesozoic porphyry deposits in the Central Asian Orogenic Belt: Geodynamic settings, magmatic sources, and genetic models. *Gondwana Research*. 2018;58:161–194. https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.01.010
15. Seedorff E., Dilles J.H., Proffett J.M., et al. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology, One Hundredth Anniversary Volume.* 2005;251–298. https://doi.org/10.5382/AV100.10
16. Simmons S.F., White N.C., John D.A. Epithermal precious and base metal deposits. *Economic Geology, One Hundredth Anniversary Volume.* 2005;485–522.
17. Yermolov P.V., Portnov V.S., Makat D.K. Age and geodynamics of Central Kazakhstan carbon ore copper provinces. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* 2017;(6):5–15.
18. Li C., Shen P., Pan H., et al. Geology and ore-forming fluid evolution of the Aktogai giant porphyry Cu deposit, Kazakhstan. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018;165:192–209. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.07.009
19. Buslov M.M., Fujiwara Y., Iwata K., Semakov N.N. Late Palaeozoic–early Mesozoic geodynamics of Central Asia. *Gondwana Research*. 2004;7(3):791–808. https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71064-9
20. Filippova I.B., Bush V.A., Didenko A.N. Middle Paleozoic subduction belts: the leading factor in the formation of the Central Asian fold-and-thrust belt. *Russian Journal of Earth Sciences.* 2001;3(6):405–426. https://doi.org/10.2205/2001ES000073
21. Cao M.J., Li G.M., Qin K.Z., et al. Assessing the magmatic affinity and petrogenesis of granitoids at the giant Aktogai porphyry Cu deposit, Central Kazakhstan. *American Journal of Science*. 2016;316:614–668. https://doi.org/10.2475/07.2016.02
22. Poletaev A.I., Krasnovikov A.T., Nurtuganov B.N., Timofeeva S.N. Geological structure and age of the Koldar intrusive. *Izvestiya Akademii Nauk Kazakhskoi SSR, Seriya Geologicheskaya*. 1987;(6): 3–13.
24. Mao J.W., Pirajno F., Lehmann B., et al. Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their tectonic settings. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2014;79(B):576–584. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.09.002
24. Shen P., Pan H.D., Xiao W.J., et al. Two geodynamic–metallogenic events in the Balkhash (Kazakhstan) and the West Junggar (China): Carboniferous porphyry Cu and Permian greisen W-Mo mineralization. *International Geology Review*. 2013;55(13):1660–1687. https://doi.org/10.1080/00206814.2013.792500
25. Li C., Shen P., Pan H. Mineralogy of the Aktogai giant porphyry Cu deposit in Kazakhstan: Insights into the fluid composition and oxygen fugacity evolution. *Ore Geology Reviews*. 2018;95:899–916. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.03.027
26. Seltmann R., Shatov V., Yakubchuk A. *Mineral deposits database and thematic maps of Central Asia*. London: CERCAMS, Natural History Museum; 2004. 117 p.
27. Zvezdov V.S., Migachev I.F., Girfanov M.M. Porphyry copper deposits of the CIS and models of their formation. *Ore Geology Reviews*. 1993;7(6):511–549. https://doi.org/10.1016/0169-1368(93)90013-O
28. Burbank D.W. Rates of erosion and their implications for exhumation. *Mineralogical Magazine*. 2002;66(1):25–52. https://doi.org/10.1180/0026461026610014
29. Sobel E.R., Oskin M., Burbank D., Mikolaichuk A. Exhumation of basement uplifts: Kyrgyz Range, using fission track thermochronology. *Tectonics.* 2006;25(2). https://doi.org/10.1029/2005TC001809
30. Corbett G.J., Leach T.M. *Southwest Pacific gold-copper systems: Structure, alteration, and mineralisation*. Society of Economic Geologists; 1998. https://doi.org/10.5382/SP.06
31. Skirrow R.G., Huston D.L., Mernagh T.P., et al. *Critical commodities for a high-tech world: Australia's supply potential*. Geoscience Australia, Canberra; 2013.
32. Carten R.B., White W.H., Stein H.J. High-grade granite-related molybdenum systems: classification and origin. *Mineral Deposit Modeling*. 1993; 40:521–554.
33. Heidrick T.L., Title S.R. Fracture and dike patterns in Laramide plutons and their structural and tectonic implications. In: Titley S.R. (Ed.) *Advances in Geology of Porphyry Copper Deposits. Southwestern North America*. Tucson: University of Arizona Press; 1982. Pp. 73–92.
34. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*. 2010;105:3–41. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3
35. Tosdal R.M., Richards J.P. Magmatic and structural controls on porphyry copper ± Mo ± Au deposits. *Reviews in Economic Geology*. 2001; 14:157–181.
36. Gustafson L.B., Hunt J.P. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Geological Bulletin of China*. 1975;21:768–776.
37. Bostjančić I., Gulam V., Pollak D., Frangen T. Comparative analysis of slope and relief energy for small-scale landslide susceptibility mapping: insights from Croatia. *Remote Sensing;* 2025; 17:2142. https://doi.org/10.3390/rs17132142

38. Зограбян Л.Н., Геворкян Ф.С. «Энергия рельефа», ее картирование и значение в процессе эрозии. *Известия АН Армянской ССР, Науки о Земле*. 1969;(4):80–86.
Zograbian L.N., Gevorkian F.S. "Relief energy", its mapping and significance in the erosion process. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the Armenian SSR, Earth Sciences*. 1969;(4):80–86. (In Russ.)
39. Mark D.M. Geomorphometric parameters: A review and evaluation. *Geografiska Annaler: Series A*. 1975;57(3–4):165–177.
40. Чернова И.Ю., Хасанов Д.И., Жарков И.Я. и др. Обнаружение и исследование зон новейших движений земной коры инструментами ГИС. *Arc Review*. 2005;(1):6–7.
Chernova I.Yu., Khasanov D.I., Zharkov I.Ya., et al. Detection and study of the zones of the latest crustal movements using GIS tools. *Arc Review*. 2005;(1):6–7. (In Russ.)
41. Zhukov N.M., Filimonova L.E., Vizigina V.G. *Metasomatizes and hypogene mineralization of the Aktogay porphyry copper deposit*. Almaty; 1979. 230 p.
42. Сергийко Ю.А. и др. *Отчет по детальной разведке медно-порфирового месторождения Актогай с подсчетом запасов на 01.01.1980 г*. Алма-Ата; 1980.
Sergiyko Yu.A., et al. *Report on the detailed exploration of the Aktogay copper-porphyry deposit with reserve estimation as of 01.01.1980*. Alma-Ata; 1980. (In Russ.)

Информация об авторах

Надин Сайб – PhD (науки о Земле), главный геолог, ТОО «KeplerGroup», г. Алматы, Республика Казахстан; старший научный сотрудник, школа наук о Земле, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; ORCID 0000-0001-7092-1671, Scopus ID 8417022400; e-mail snv63@yandex.com

Юрий Белов – старший геолог, ТОО «KazGeoExploration», г. Астана, Республика Казахстан; ORCID 0009-0003-9596-4952; e-mail belov010885@mail.ru

Наталья Александровна Зимановская – PhD (геология и разведка полезных ископаемых), ассоциированный профессор, старший научный сотрудник Центра компетенций и трансфера технологий в области геологии и горного дела, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; ORCID 0000-0002-9881-690X; e-mail nata_zim@mail.ru

Гулизат Багдатовна Оразбекова – PhD (геология и разведка полезных ископаемых), преподаватель кафедры автоматизации и информационных технологий, Университет Шакарима, г. Семей, Республика Казахстан; ORCID 0000-0002-4503-6838; e-mail orazbekova@bk.ru

Айжан Третьякова – главный геолог, ТОО «Бирюк-Алтын», г. Алматы, Республика Казахстан; ORCID 0000-0002-0803-1587; e-mail A.Tretyakova@ordabasy.kz

Асем Муратовна Муратова – докторант PhD (геология и разведка полезных ископаемых), Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; ORCID 0009-0003-7241-5571, Scopus ID 58574678800; e-mail muratova.assem@gmail.com

Исатай Касенов – главный специалист по ГИС, ТОО «KazGeoExploration», г. Астана, Республика Казахстан; ORCID 0009-0002-7787-3427; e-mail is.kassenov@gmail.com

Information about the authors

Nadine Seib – PhD (Earth Sci.), Senior Geologist, KeplerGroup LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; Senior Research Fellow, School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; ORCID 0000-0001-7092-1671, Scopus ID 8417022400; e-mail snv63@yandex.com

Yury Belov – Senior Geologist, KazGeoExploration LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; ORCID 0009-0003-9596-4952; e-mail belov010885@mail.ru

Natalya Zimanovskaya – PhD (Geology and Mineral Exploration), Associate Professor, Senior Researcher, Center of Competence and Technology Transfer in Geology and Mining, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; ORCID 0000-0002-9881-690X; e-mail nata_zim@mail.ru

Gulizat Orazbekova – PhD (Geology and Mineral Exploration), Lecturer, Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; ORCID 0000-0002-4503-6838; e-mail orazbekova@bk.ru

Aizhan Tretyakova – Senior Geologist, Biruk-Altyn LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; ORCID 0000-0002-0803-1587; e-mail A.Tretyakova@ordabasy.kz

Assem Muratova – PhD student (Geology and Mineral Exploration), D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; ORCID 0009-0003-7241-5571, Scopus ID 58574678800; e-mail muratova.assem@gmail.com

Issatay Kassenov – Chief GIS Specialist, KazGeoExploration LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; ORCID 0009-0002-7787-3427; e-mail is.kassenov@gmail.com

Поступила в редакцию	20.06.2025	**Received**	20.06.2025
Поступила после рецензирования	21.07.2025	**Revised**	21.07.2025
Принята к публикации	22.07.2025	**Accepted**	22.07.2025

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-03-386
УДК 553.43/.44:553.065(597)

Геологические и изотопные оценки условий образования медных руд в районе Та Фой, провинция Лао Кай, северо-западный Вьетнам

Х.Т. Хунг[1] ✉, **Н.С. Дак**[2]
[1] *Ханойский университет горного дела и геологии, г. Ханой, Вьетнам*
[2] *Вьетнамский институт наук о Земле и минеральных ресурсов, г. Ханой, Вьетнам*
✉ *khuongthehung@humg.edu.vn*

Аннотация
Месторождение меди Та Фой (Ta Phoi), расположенное в северо-восточной части зоны Фан Си Пан на северо-западе Вьетнама, является важным объектом проявления неопротерозойской медной минерализации. Его отличительные геологические характеристики оправдывают его изучение, особенно в сопоставлении с близлежащим месторождением типа Fe-оксидных Au-Cu гидротермальных месторождений (IOCG) Синь Куен (Sin Quyen). Цель данного исследования – выяснить генезис, условия рудообразования и эволюцию флюидов месторождения Та Фой с помощью комплексного подхода, сочетающего анализ геологических, петрографических, геохимических и изотопных данных. В частности, в исследовании используются U-Pb датирование сфена, изотопный анализ серы и микротермометрия флюидных включений для определения возраста, происхождения и физико-химических условий формирования минерализации. Определение возраста сфена U-Pb методом дало согласующиеся возрасты 810,7 ± 4,6 млн лет и 819,5 ± 2,0 млн лет, что указывает на неопротерозойский возраст минерализации, совпадающий с возрастом региональных гранодиоритовых и диоритовых интрузий. Изотопный анализ серы ($\delta^{34}S$ = +2,2 до +3,1‰) указывает на магматическое происхождение рудообразующих флюидов. Данные по флюидным включениям показали, что температура флюидов колебалась от 163,1 до 410 °C, соленость флюидов составляла 2,1–16,25 вес. % в эквиваленте NaCl, а пластовое давление – 44–100 МПа на глубине 3,4–6,5 км. Эти результаты подтвердили, что месторождение Та Фой образовалось в результате воздействия магматогенных гидротермальных флюидов средней и высокой температуры в субдукционных условиях континентальной дуги; оно может представлять собой порфировую скарновую или эндоскарновую систему, которая сформировалась в результате миграции магматических флюидов вдоль литологических контактов и разломов. Эти результаты дают новое представление о металлогенической обстановке формирования месторождения Та Фой и подчеркивают потенциал дальнейшей разведки на медь в северо-западной части Вьетнама.

Ключевые слова
медная руда, U-Pb определение возраста, сфен, металлогения, месторождение Та Фой, северо-западный Вьетнам

Для цитирования
Hung K.T., Dac N.X. Geological and isotopic constraints on the copper ore formation in Ta Phoi area, Lao Cai province, Northwestern Vietnam. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):262–279. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-03-386

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research paper

Geological and isotopic constraints on the copper ore formation in Ta Phoi area, Lao Cai province, Northwestern Vietnam

K.T. Hung[1] ✉, **N.X. Dac**[2]
[1] *Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam*
[2] *Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources, Hanoi, Vietnam*
✉ *khuongthehung@humg.edu.vn*

Abstract
The Ta Phoi copper deposit, located in the northeastern Phan Si Pan zone, Northwestern Vietnam, is a significant site of Neoproterozoic Cu mineralization. Its distinct geological characteristics justify its investigations, especially in comparison to nearby IOCG Sin Quyen deposit. This study is aimed at clarifying the genesis, ore-forming conditions, and fluid evolution of the Ta Phoi deposit through an integrated approach combining geological, petrographic, geochemical, and isotopic data analysis. The research specifically employs U-Pb dating of sphene, sulfur isotope analysis, and fluid inclusion microthermometry to identify the age, origin, and physicochemical environment

© Хунг Х. Т., Дак Н. С., 2025

of the mineralization. Sphene U-Pb dating yielded concordant ages of 810.7 ± 4.6 Ma and 819.5 ± 2.0 Ma, indicating a Neoproterozoic mineralization event temporally linked to regional granodiorite and diorite intrusions. Sulfur isotope values ($\delta^{34}S$ = +2.2 to +3.1‰) suggest a magmatic origin for ore-forming fluids. Fluid inclusion data detected fluid temperatures ranging from 163.1 to 410°C, fluid salinities of 2.1–16.25 wt% NaCl equiv., and formation pressures of 44–100 MPa at depths of 3.4–6.5 km. These results confirmed that the Ta Phoi deposit formed from medium- to high-temperature, magmatogene hydrothermal fluids in a subduction-related continental arc setting; it may represent a porphyry-related skarn or endoskarn system that developed in response to magmatic fluid migration along lithological contacts and faults. These findings provide new insights into the metallogenic framework of the Ta Phoi deposit and highlight its potential for further Cu exploration in Northwestern Vietnam.

Keywords
Copper ore, U-Pb dating, sphene, metallogeny, Ta Phoi deposit, North-Western Vietnam

For citation
Hung K.T., Dac N.X. Geological and isotopic constraints on the copper ore formation in Ta Phoi area, Lao Cai province, Northwestern Vietnam. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):262–279. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-03-386

Введение

Процесс формирования минерализации обычно происходит в широком пространственном диапазоне и тесно связан с деформациями, метаморфизмом, разломами и магматическими интрузиями на определенных тектонических стадиях. Эти процессы способствуют образованию значительных месторождений полезных ископаемых, содержащих медь (Cu), золото (Au), свинец (Pb), цинк (Zn) и редкоземельные элементы (REE), а также другие сопутствующие твердые полезные ископаемые (ТПИ) [1–3].

Провинция Лао Кай, расположенная в зоне Фан Си Пан на северо-западе Вьетнама, обладает значительным потенциалом минеральных ресурсов, особенно в отношении медно-золотой минерализации, которая была оценена как высокоперспективная [4]. В связи с этим в 2015 г. правительство Вьетнама одобрило создание Лао Кайской медной металлургической промышленной зоны с мощностью переработки более 10 000 т катодной меди в год. Геологическое картирование и разведка полезных ископаемых, проведенные вдоль северо-восточной окраины зоны Фан Си Пан, позволили выявить несколько крупных месторождений медных руд, в том числе месторождения Синь Куен, Та Фой и Ви Кем, а также ценные рудопроявления медной минерализации, такие как Нам Чак, Чин Туонг, Лунг Тханг и Лунг По [5–9]. Однако эти исследования остаются фрагментарными, не включают углубленного анализа и применения современных методов исследования минерализации. В последние годы некоторые исследования минерализации были сосредоточены на месторождениях меди в провинции Лао Кай, в первую очередь на месторождении Синь Куен [10–12]. Эти исследования открыли новые перспективы в отношении природы и возраста образования медных месторождений в северо-восточной части зоны Фан Си Пан, в частности на месторождении Синь Куен, выявив наличие золота и редкоземельных элементов (РЗЭ) наряду с медью в качестве основных экономически значимых полезных ископаемых [13]. Это поднимает вопрос о том, существуют ли вдоль металлогенического пояса Лунг По – Та Фои месторождения, аналогичные месторождению Синь Куен, имеющие экономическое значение. Запасы меди месторождения Та Фой в пределах этого пояса оцениваются как значительные [14, 15], однако его потенциал в отношении запасов сопутствующих золота и редкоземельных элементов остается неопределенным. Кроме того, требуется выяснить генетические механизмы образования руд на месторождениях Та Фой и Синь Куен – есть ли между ними сходство в процессах формирования минерализации и времени ее образования? Для ответа на эти вопросы необходимо провести комплексные исследования состава, условий образования, пространственного распределения и генезиса минерализации. Такие исследования обеспечат научную основу для разработки более точных стратегий разведки полезных ископаемых и оценки ресурсов в данном регионе.

Целью данного исследования является выяснение геологических факторов, влиявших на образование медных руд на участке Та Фой, и изотопных маркеров процессов формирования минерализации путем комплексного анализа полевых наблюдений, петрографических и геохимических данных.

Для достижения этой цели в рамках исследования усилия были сосредоточены на решении следующих ключевых **задач**:

– характеристика геологического строения и литологических единиц, которые вмещают медную минерализацию;

– анализ петрографических особенностей и минеральных ассоциаций для интерпретации общей картины гидротермально-метасоматических изменений и парагенетических последовательностей;

– интеграция геохронологии сфена U-Pb для определения временных рамок формирования минерализации;

– применение изотопного анализа серы для определения источника рудообразующих материалов;

– проведение исследований газово-жидких включений для определения температуры, минерализации (солености), флюидов, давления и глубины образования руд.

Результаты этого исследования позволят лучше понять процессы металлогении в регионе и предоставят ценную информацию для будущей разведки полезных ископаемых в северо-западной части Вьетнама.

1. Геологическое строение

Северо-западный Вьетнам относится к Южно-Китайскому и Индокитайскому блокам (рис. 1, *а*, *б*). Эти блоки являются неотъемлемыми компонентами палеогеографической реконструкции суперконтинента Родиния [16–19]. Несколько месторождений меди, в том числе Fe-оксидные Au-Cu гидротермальные месторождения (IOCG) Синь Куен, а также месторождения меди Суой Тау и Та Фой, располагаются в северо-западной части Вьетнама (рис. 1, *в*).

Месторождение меди Та Фой расположено в северо-западной части Вьетнама, ограниченной разломом Сонг Чай на севере и поясом Сонг Ма на юге [4]. Этот регион состоит из трех основных тектонических единиц: зоны Фан Си Пан, рифта Сонг Да и бассейна Ту Ле (рис. 2, *а*). Сонг-Да – это вытянутая рифтовая структура, простирающаяся с северо-запада на юго-восток, характеризующаяся присутствием вулканогенно-осадочных отложений девонского и среднетриасового возрастов. Заметной особенностью этого разлома является присутствие хорошо развитых пермско-триасовых щелочных базальтов (~260 млн лет), которые в основном залегают вдоль реки Да [24]. Эти базальты, наряду с кремнистыми вулканическими породами, залегают на раннепермских известняках и впоследствии несогласно перекрыты триасовыми известняками и сланцами, содержащими угольные месторождения [25, 26]. Некоторые исследования предполагают, что вулканическая серия Сун Да связана с плюмом Эмэйшань [27–29]. Бассейн Ту Ле в основном содержит риолиты, трахириолиты и трахидациты. U-Pb датировка циркона указывает на то, что риолиты в этом бассейне образовались в позднепермское время (262–252 млн лет назад), одновременно с мафическими породами рифта Сонг Да [30, 31].

Зона Фан Си Пан служит тектоническим связующим звеном между двумя крупными блоками земной коры: Северо-Вьетнамско-Южно-Китайским и Индокитайским (рис. 2, *б*). Она расположена между зоной сдвига Ред-Ривер и бассейном Ту-Ле и сложена в основном мезоархейскими – ранне-палеопротерозойскими породами фундамента, включая биотитовые

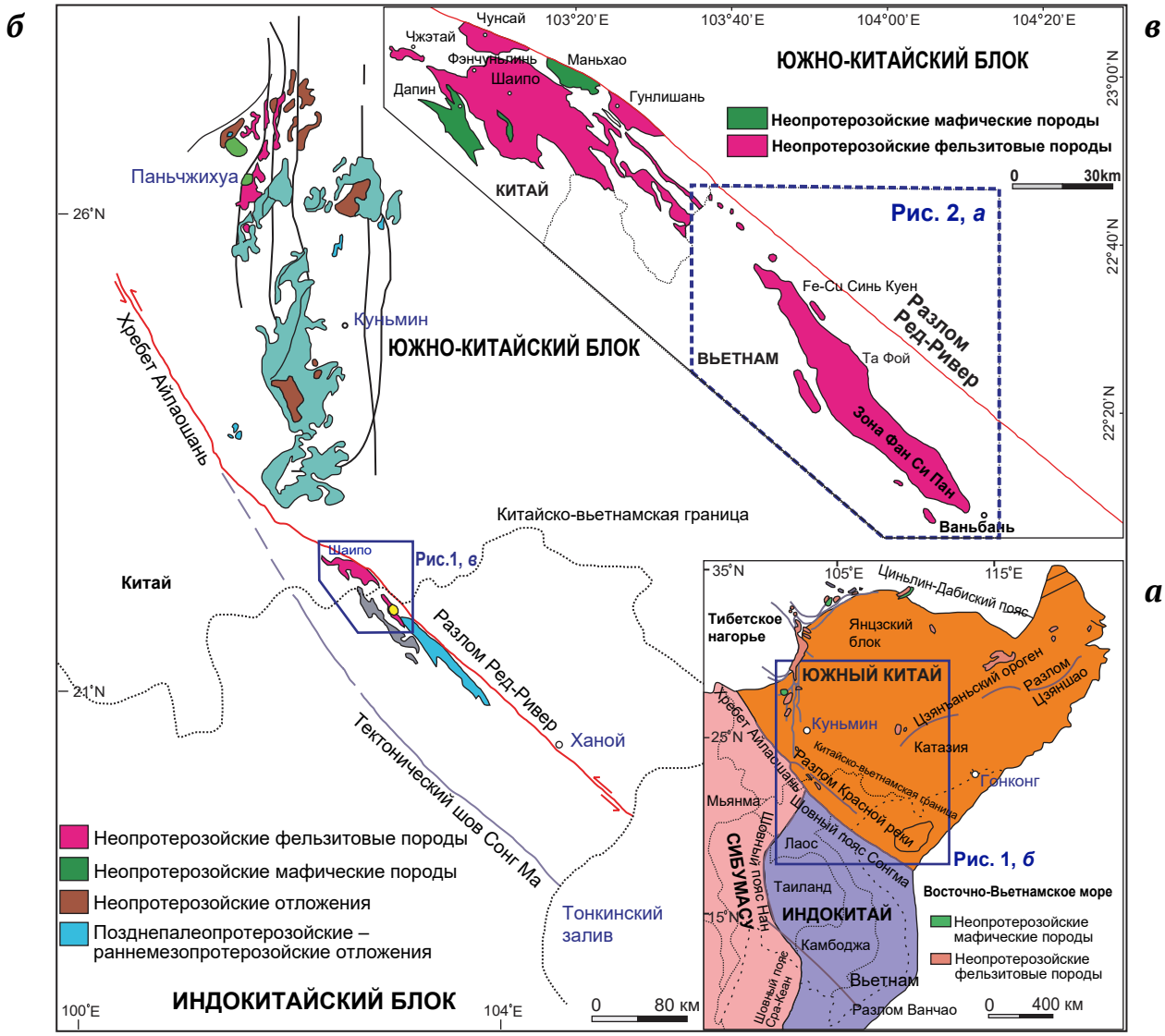


Рис. 1. Упрощенная тектоническая карта северо-западной части Вьетнама и прилегающих районов ([20–23] и ссылки в них)

кварциты, кварц-биотит-гранатовые сланцы и амфиболиты [23, 33]. Палео-мезопротерозойские единицы в зоне представлены биотитовыми сланцами, двухслюдяными сланцами и амфиболитами [23,33]. Докембрийский магматизм в зоне Фан Си Пан характеризуется несколькими гранитоидными и мафическими интрузивными событиями, включая: мезоархейские гранитоиды (2,9–2,8 млрд лет) [33–35], палеопротерозойские гранитоиды (1,8–2,2 млрд лет) [33, 35–37], палеопротерозойские мафические дайки (1,8–2,3 млрд лет) [33] и неопротерозойские гранитоиды (760–751 млн лет) [20, 21, 23, 38].

Мезоархейско-палеопротерозойский кристаллический фундамент несогласно перекрыт палеозойско-мезозойскими метаосадочными и осадочными комплексами, которые включают кварц-серицит-хлоритовые сланцы, кварциты, известняки и доломиты (см. рис. 2). В дополнение к докембрийским гранитоидам, в позднепермское и раннетриасовое время внедрялись массивные граниты типа А, тесно связанные с мантийным плюмом Эмэйшань [29–31, 39]. В этом регионе также были обнаружены кайнозойские плутоны [40, 41].

Неопротерозойские гранитоидные интрузии в зоне Фан Си Пан включают плутоны По Сен, Фин Нган и Лунг Тханг, а также несколько меньших по размерам тел и линз (рис. 2, *б*) [42]. Эти интрузии сопоставимы с широко распространенными неопротерозойскими гранитоидами (~860–740 млн лет) в западной и юго-западной частях Янцзыского блока (рис. 1) [42–47].

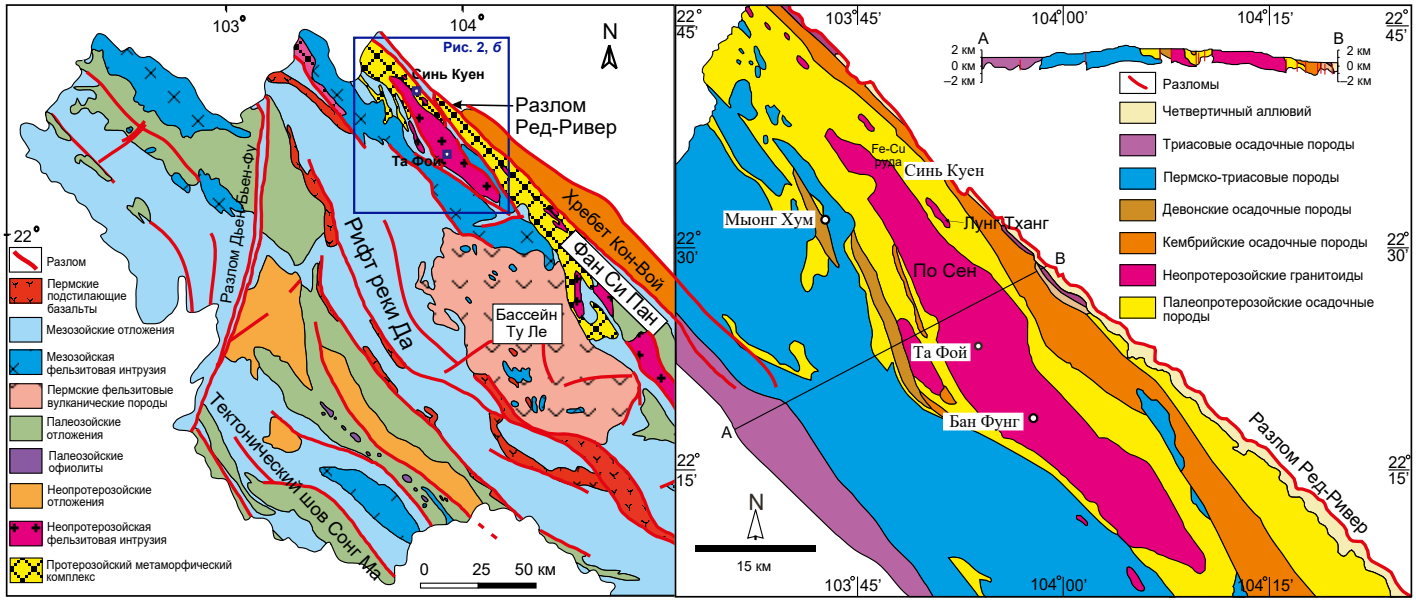
2. Геологическое строение месторождения Та Фой

2.1. Стратиграфия и литология

Месторождение меди Та Фой расположено в районе Та Фой провинции Лао Кай и занимает площадь около 4 км^2. Месторождение расположено в северо-восточной части антиклинория Хоанг Лиен Сон в пределах структурной зоны Фан Си Пан. Месторождение вмещается метаморфизованными осадочными свитами формации Синь Куен, а также небольшими недатированными интрузивными телами, расположенными вблизи крупного интрузивного массива комплекса По Сен. В основном оно вмещается метаморфическими породами второй свиты формации Синь Куен ($PPsq_2$), которые являются ключевым геологическим фактором, тесно связанным с образованием медных руд в исследуемом районе [4, 14].

Вторая свита формации Синь Куен широко распространена в районе Та Фой и состоит из кварц-полевошпатовых биотитовых сланцев, метасоматических пород, линз амфиболитов и графитовых кварц-слюдяных сланцев. Полевошпатовый кварц-биотитовый сланец содержит мало или вообще не содержит графита, имеет коричневый цвет, сланцевую структуру и лепидобластическую текстуру. Вдоль краев рудных тел и в зонах разломов породы обычно обогащены мусковитом и серицитом (1–8 %). Акцессорные минералы включают сфен, апатит, эпидот, цоизит и рудные минералы.

Метасоматические породы встречаются в виде полос в центральной части района, а амфиболиты – в виде линзовидных тел внутри метасоматических пород, характеризующихся матовым обликом, белым цветом, с прослоями зеленоватого цвета. Амфиболиты обычно встречаются вдоль висячих боков меднорудных тел. Графитовый кварц-слюдяной сланец имеет серый цвет и демонстрирует сланцеватую структуру. Медная минерализация в основном вмещается метасоматическими породами, реже полевошпатовыми кварц-биотитовыми сланцами. Вторая свита имеет мощность более 800 м (рис. 3, *а–г*).



а *б*

Рис. 2. Геологическая карта (*а*) северо-западной части Вьетнама и (*б*) зоны Фан Си Пан с указанием местоположения месторождения Та Фой (изменено по [32])

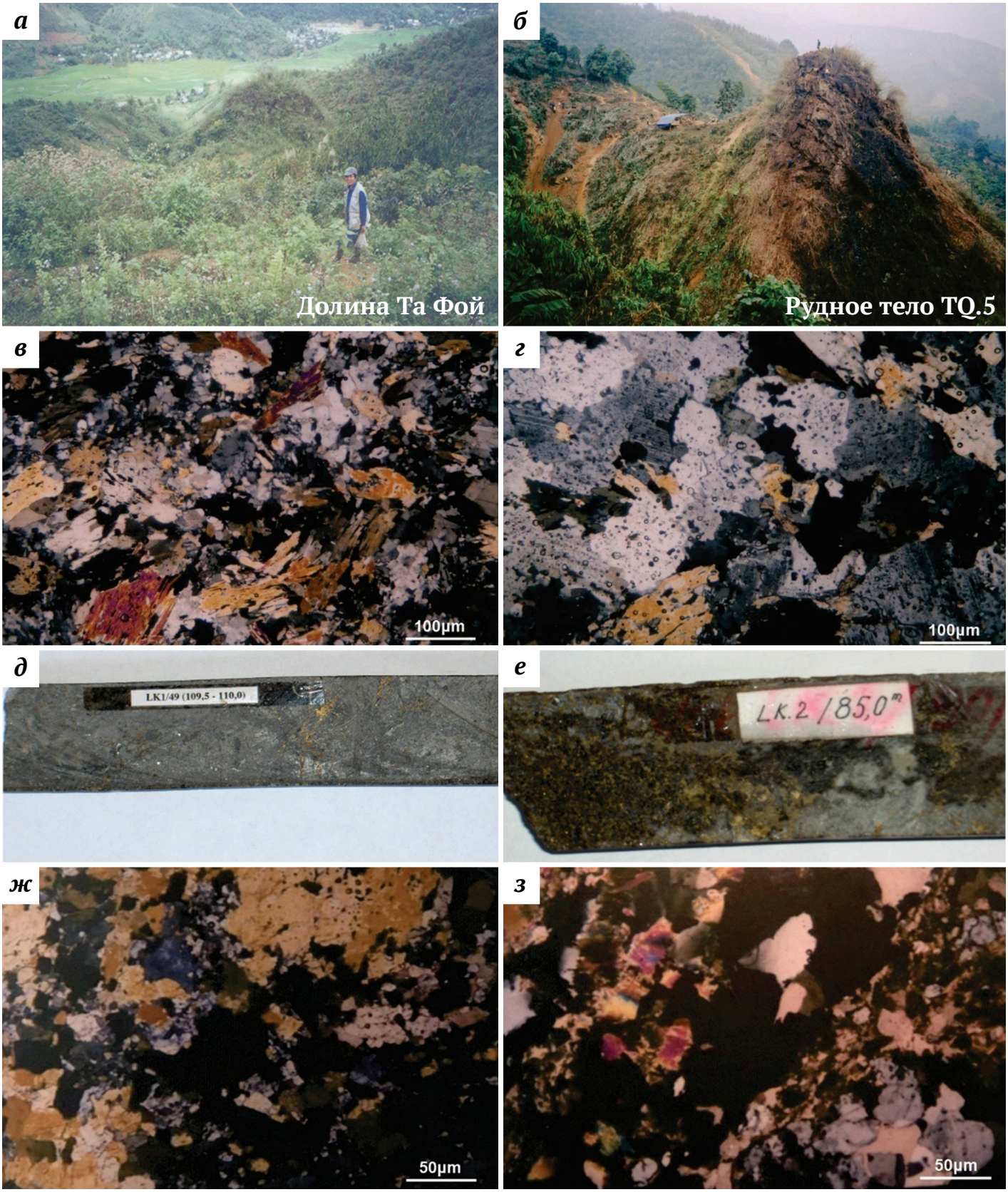


Рис. 3. Геологическое строение и вещественный состав месторождения Та Фой:
а, *б* – общий вид месторождения в долине Та Фой и горные работы на рудном теле TQ.5 (фото из [14]);
в, *г* – микрофотографии пород в проходящем свете (увеличение 35×, микроскоп Nikon): *в* – фельзитовый сланец (полевой шпат, кварц, биотит), керн LK.2/28, глубина 89–91 м; *г* – темноцветная метасоматическая порода, керн LK.1/13, глубина 25–27 м (фото До Ван Ньюана из [14]); *д*–*з* – проявления рудной минерализации: *д*, *е* – вкрапленная руда в темноцветной метасоматической породе, керн LK.1-T.1, глубина 109,5–110 м; *ж*, *з* – вкрапленная руда в фельзитовом сланце, керн LK.2-T.1, глубина 85 м (фото Лай Куок Су из [14])

2.2. Магматические породы

Гранитоидные образования комплекса По Сен и гранодиоритовые, диоритовые интрузии широко распространены в районе Та Фой, наряду с лампрофировыми дайками. Породы комплекса По Сен залегают вдоль западной и юго-западной окраины района, в основном представлены фазой 2 и фазой 3 внедрения. Фаза 2 состоит из биотитовых гранитов и биотит-роговообманковых гранитов, а фаза 3 включает светлого цвета дайки, представленные аплитовыми гранитами и пегматитовыми гранитами.

Методы U–Pb и $^{40}Ar/^{39}Ar$ датирования позволили прояснить термохронологическую историю комплекса По Сен. Анализ U–Pb композитных проб зерен циркона с помощью TIMS (тепловой многозональный сканер ИК-диапазона) дал средний возраст 760±25 млн лет с кластеризацией на кривой согласованных значений абсолютного возраста, в то время как двенадцать анализов SHRIMP (чувствительный высокого разрешения масс-спектрометр с ионным микрозондом) на U–Pb дали согласованный возраст 751±7 млн лет [38]. В сочетании с геохимическими характеристиками эти результаты указывают на то, что комплекс По Сен является позднепротерозойским магматическим комплексом.

Гранодиоритовые и диоритовые породы (а именно массивы Фин Нган, Суой Тау, Лунг Танг) обычно встречаются по краям рудных тел и содержат от 0,01 до 0,4 % меди. Медная минерализация в диоритах встречается в виде редкой вкрапленности и микропрожилков вдоль трещин. Эти породы имеют серый или светло-серый цвет, массивную структуру и мелко- или среднезернистую текстуру, местами слабо деформированы. Их взаимоотношения с окружающими породами неясны (пересечения одних другими не обнаружены).

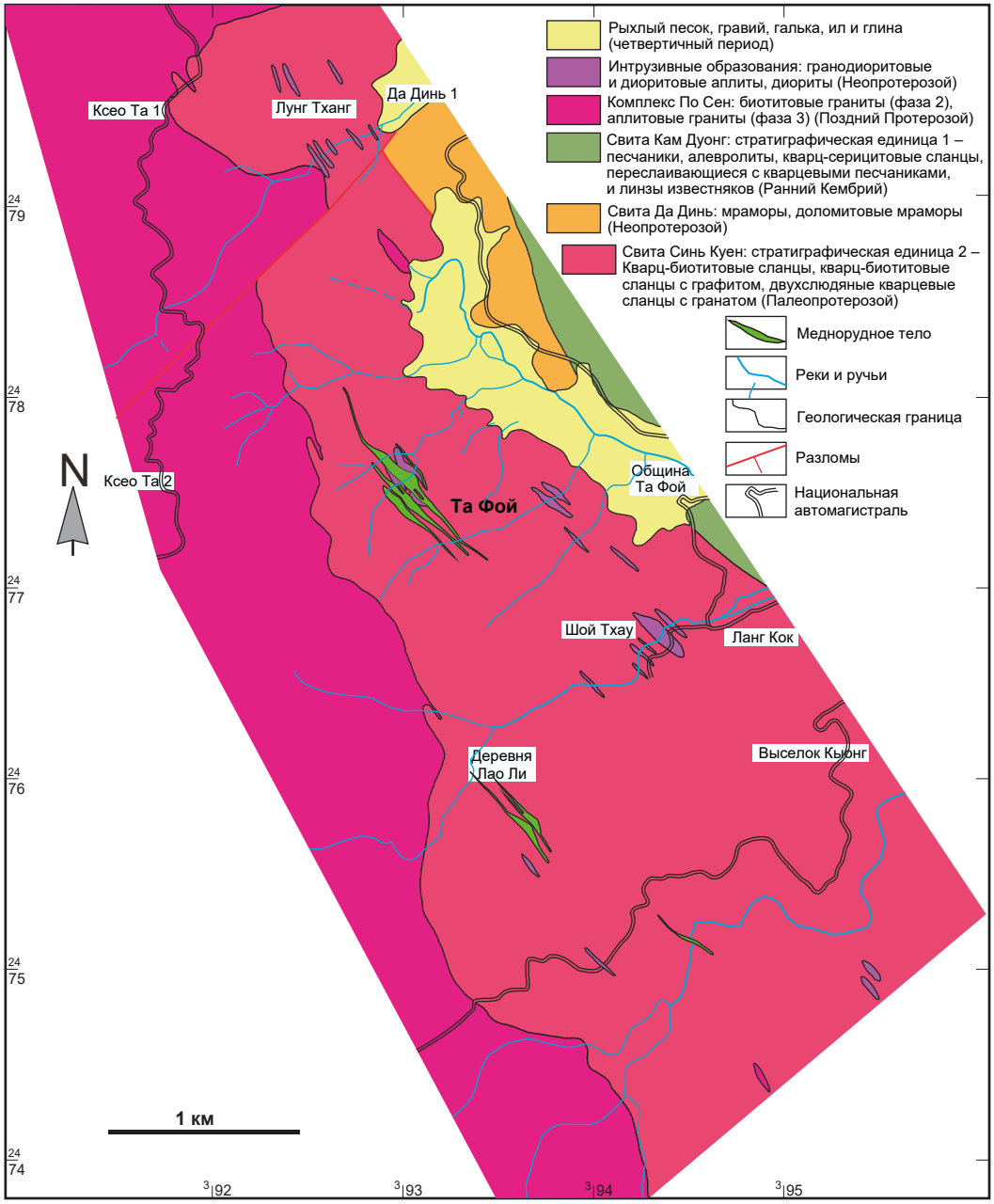


Рис. 4. Геологическая карта района Та Фой с указанием местоположения месторождения Та Фой (изменено по [14])

Результаты абсолютного датирования циркона с использованием U-Pb метода для гранодиоритовых и диоритовых интрузий дали возраст 776±12 млн лет для массива Суой Тау [48], 824±4 млн лет для массива Фин Нган [42] и 803±3 млн лет для массива Лунг Тханг [47]. Эти результаты указывают на то, что образование гранодиоритовых и диоритовых интрузий произошло в неопротерозойское время. Кроме того, большинство исследований указывают на то, что эти интрузивные тела образовались в условиях субдукции при формировании континентальных дуг [42, 47, 48].

Дайки лампрофиров внедрялись в окружающие породы; они характеризуются серовато-зеленым цветом, тонкозернистой структурой, ориентированной текстурой и призматически-зернистым строением. Эти дайки, по-видимому, практически никак не связаны с медной минерализацией.

2.3. Тектоника

Рудное месторождение Та Фой расположено в северо-восточной части антиклинали По Сен, которая демонстрирует в целом моноклинальную структуру с простиранием в направлении северо-запад – юго-восток и падением в северо-восточном направлении. Данные геологоразведочных работ указывают на сильную деформацию поверхностных пород, а данные бурения показывают, что на глубине как вмещающие породы, так и рудные тела сохраняют устойчивое падение на северо-восток под углом от 60 до 75° [4].

Вдоль русла ручья Фой 1 наблюдается разлом, простирающийся в направлении северо-запад – юго-восток, называемый разломом Ланг Фой 1 (F2). Этот разлом является оперяющей структурой разлома Та Фой. Разлом Ланг Фой 1 сечет и смещает породы формации Синь Куен, а также биотитовые граниты комплекса По Сен. Кроме того, в пределах района исследования выявлен разлом Та Ксео 2 – Да Динь (F3). Этот разлом простирается вдоль долины Да Динь до Та Сео 2, его общая длина составляет примерно 2,5 км. Разлом Та Сео 2 – Да Динь смещает породы формаций и сечет разломы, простирающиеся в направлении северо-запад – юго-восток [14] (рис. 4).

2.4. Характеристики распределения рудных тел

Медное месторождение Та Фой состоит из 15 рудных тел, включая линзовидные и жильные тела. Среди них выделены три крупных рудных тела (TQ.4, TQ.5, TQ.6), а остальные 12 представлены более мелкими жилами и линзовидными скоплениями, разбросанными по всей территории или вдоль краев более крупных рудных тел (TQ.1, TQ.2, TQ.3a, TQ.4a, TQ.7, TQ.8, TQ.9a, TQ.9b, TQ.10, TQ.10a, TQ.11, TQ.13) [14, 15]. Эти рудные тела демонстрируют падение в северо-восточном направлении под углом от 60° до 85°, имеют длину по простиранию от 300 до 1200 м, мощность от 1,5 до 94,8 м и залегают на глубине до 30–130 м. Основные рудные минералы включают халькопирит, кубанит, пирит и пирротин, которые демонстрируют неравномерную вкрапленность и встречаются в виде отдельных зерен, скоплений или небольших рудных карманов. Эти минералы также образуют жилы, заполняющие микротрещины и замещающие ранее существовавшие породообразующие минералы (рис. 3, 5, табл. 1).

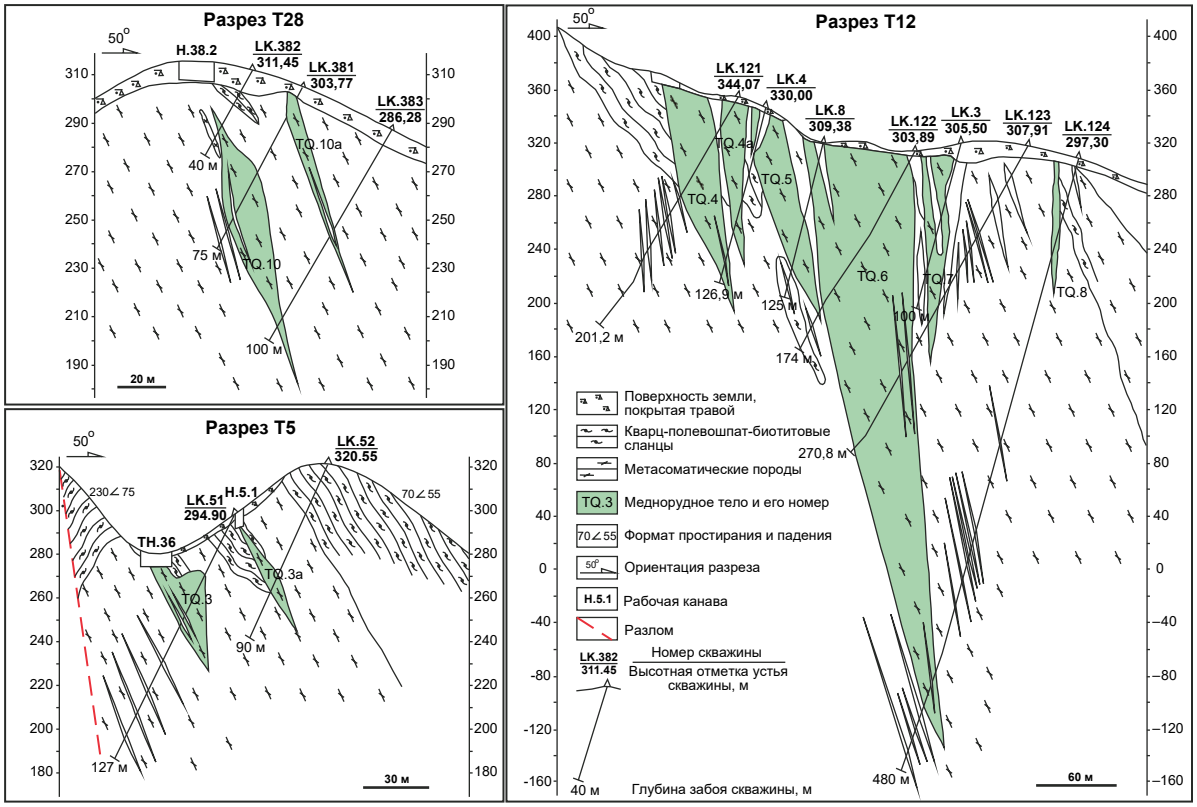


Рис. 5. Геологические разрезы по линиям T5, T12, T28 с представлением рудных тел TQ.3, TQ.3a, TQ.4, TQ5, TQ.6, TQ.7, TQ.8 и TQ.10 [15]

Таблица 1

Морфологические характеристики меднорудных тел и их состав на месторождении Та Фой (по [14, 15])

Номер рудного тела	Морфология рудных тел	Длина, м	Направление падения	Угол падения	Средняя мощность, м	Среднее содержание меди, %	Минералогический состав руд
TQ.1	Жила	442	70°	65°	3,69	0,405	Пирит 2 %, халькопирит 1 %, пирротин 2 %, марказит и арсенопирит в подчиненных количествах, рутил (отдельные зерна)
TQ.2	Жила	300	65°	70°	2,00	0,447	Пирит 3 %, халькопирит в подчиненных количествах, пирротин 2 %, графит 1 %, ильменит в подчиненных количествах
TQ.3a	Жила	210	60°	55°	12,05	0,455	Пирит (отдельные зерна), халькопирит в подчиненных количествах, ковеллин в подчиненных количествах, графит в подчиненных количествах, ильменит 1 %
TQ.4	Крупная линза	580	50°	65°	21,04	0,698	Пирит 1–2 %, халькопирит 0,5–8 %, пирротин 10–55 %, кубанит в подчиненных количествах, графит в подчиненных количествах (до 3 %), ковеллин в подчиненных количествах, молибденит в подчиненных количествах, золото 4–9 зерен
TQ.4a	Жила	240	50°	65°	10,37	0,455	Пирит 1 %, халькопирит 8 %, кубанит в подчиненных количествах, ковеллин в подчиненных количествах, молибденит в подчиненных количествах
TQ.5	Крупная линза	830	50°	70°	16,56	0,638	Пирит до 5 %, халькопирит до 8 %, пирротин 1–12 %, кубанит в подчиненных количествах до 1 %, графит в подчиненных количествах, ковеллин в подчиненных количествах, гематит (отдельные зерна)
TQ.6	Крупная линза	597	60°	75°	16,39	0,835	Пирит до 5 %, халькопирит 1–10 %, пирротин до 8 %, кубанит 1–10 %, ковеллин до 3 %, рутил несколько зерен, лимонит до 5 %, золото 1–18 зерен
TQ.7	Небольшая линза	418	60°	75°	8,37	0,691	Пирит до 5 %, халькопирит 1–10 %, пирротин до 8 %, кубанит 1–10 %, ковеллин до 3 %, рутил несколько зерен, лимонит до 5 %
TQ.8	Жила	270	60°	75°	5,53	0,587	Пирит в небольших количествах, халькопирит 15 %, мельниковит в небольших количествах, кубанит в подчиненных количествах до 1 %, ковеллин 1 %, лимонит 1 %
TQ.9a	Крупная линза	735	65°	65°	13,61	0,530	Пирротин 10–18 %, халькопирит от подчиненных количеств до 2 %, графит от подчиненных количеств до 3 %, кубанит в очень небольших количествах, сфен (несколько зерен)
TQ.9b	Крупная линза	640	60°	60°	9,96	0,516	Пирротин в небольших количествах до 10 %, халькопирит 0,5–12 %, пирит 2 %, арсенопирит 1 %, графит в небольших количествах, кубанит очень редко, сфен (несколько зерен), ковеллин в небольших количествах и лимонит 0,5 %
TQ.10	Небольшая линза	340	50°	70°	11,69	0,568	Пирротин от подчиненных количеств до 8 %, халькопирит 1 %, магнетит 3 %, ильменит 1–2 %
TQ.10a	Небольшая линза	190	50°	70°	13,79	0,763	Пирротин 30 %, халькопирит 4 %, графит 7 %, пирит 1 %, сфалерит очень мало
TQ.11	Жила	718	60°	65°	4,77	0,674	Пирротин 2–6 %, халькопирит 1 %, графит 2 %, сфен несколько зерен, сфалерит очень мало
TQ.13	Жила	400	65°	70°	3,09	0,481	Пирит от «очень мало» до 2 %, халькопирит 1–10 %, графит 1–2 %, марказит от «очень мало» до 3 %, ковеллин в небольших количествах, рутил в небольших количествах

2.5. Текстуры и структуры руд

2.5.1. Типы руд и их свойства

Петрографический анализ проб медной руды из района исследования и их анализ под микроскопом в отраженном свете (в аншлифах) показывают сложную ассоциацию первичных и вторичных рудных минералов. К первичным сульфидным минералам относятся халькопирит, борнит, пирит, пирротин и кубанит, а вторичные минералы, такие как ковеллин, халькозин, малахит и лимонит, представляют продукты окисления в зонах гипергенного изменения. Жильные минералы, ассоциированные с медной минерализацией, в основном представлены кварцем и карбонатами.

Первичные рудные минералы включают халькопирит, борнит, пирит, пирротин, кубанит и магнетит.

Халькопирит ($CuFeS_2$): Наиболее распространенный медьсодержащий минерал, встречающийся в виде от ангедральных до субгедральных зерен размером от 0,1 до 2 мм, обычно от 0,1 до 1 мм. Халькопирит обычно демонстрирует вкрапленную, жильную и замещающую текстуру, образуя срастания с пиритом и пирротином (рис. 6, *а*, *б*). Под микроскопом халькопирит характеризуется соломенно-желтым цветом с умеренной отражательной способностью.

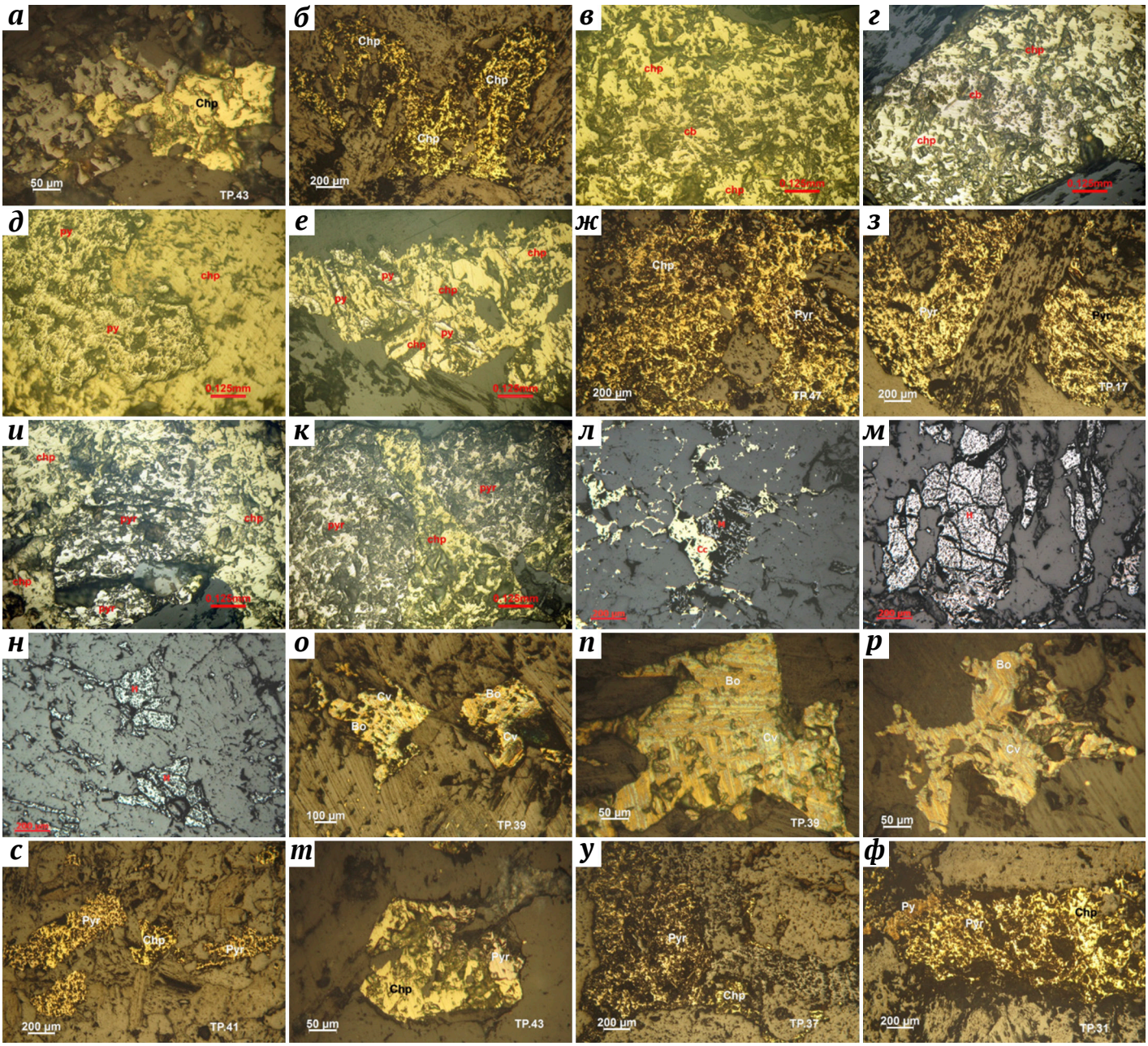


Рис. 6. Первичная минеральная ассоциация медных руд месторождения Та Фой:
а, *б* – вкрапленный халькопирит в жильной матрице; *в*, *г* – сингенетические соотношения между халькопиритом и кубанитом; *д* – халькопирит, замещающий пирит; *е* – вкрапленные халькопирит и пирит в рудной матрице; *ж*, *з*, *и*, *к* – вкрапленные халькопирит и пирротин в жильной матрице; *л* – эвгедральные зерна халькопирита, замещающие магнетит; *м*, *н* – субгедральные зерна гематита, образующие скопления в жильной матрице; *о*, *п*, *р* – борнит, замещенный ковеллином в результате процессов выветривания в зоне гипергенеза; *с*, *т*, *у*, *ф* – эвгедральные халькопирит и пирротин, вкрапленные в жильной матрице

Борнит (Cu_5FeS_4): Встречается в виде тонкозернистой вкраплённости или в виде ободков вокруг халькопирита. В некоторых пробах борнит частично замещен ковеллином, что указывает на вторичное обогащение (рис. 6, *м*, *н*). Под микроскопом он имеет отчетливый пурпурно-коричневый до красноватого оттенок.

Пирит (FeS_2): Представлен эвгедральными и субгедральными зернами размером от 0,1 до 2 мм, часто образующими срастания с халькопиритом. Пирит обычно замещается халькопиритом и борнитом вдоль трещин и границ зерен (рис. 6, *д*, *е*). В отраженном свете пирит выглядит ярко-желтым с высоким коэффициентом отражения.

Пирротин ($Fe_{1-x}S$): Обнаружен в виде ангедральных зерен размером до 2 мм, часто в ассоциации с халькопиритом и кубанитом. Зерна пирротина проявляют слабую анизотропию и обычно замещаются сульфидами более поздней стадии (рис. 6, *ж*, *з*, *и*, *к*).

Кубанит ($CuFe_2S_3$): Подчиненная фаза в руде, проявляющаяся в виде тонких пластинчатых срастаний в халькопирите. Под микроскопом кубанит имеет более темный желтый цвет с едва заметным розоватым оттенком (рис. 6, *в*, *г*).

Магнетит (Fe_3O_4): Встречается в виде мелких, разрозненных зерен в руде, часто с замещением халькопиритом (рис. 6, *л*).

Вторичные рудные минералы – это ковеллин, халькозин, лимонит и малахит.

Ковеллин (CuS): Образуется в качестве гипергенного продукта замещения халькопирита и борнита, часто образуя темно-синие ободки вокруг первичных сульфидов (рис. 6, *р*).

Халькозин (Cu_2S): Встречается в небольших количествах, обычно замещая халькопирит в зонах окисления. Выглядит как мелкозернистый минерал темно-серого цвета с металлическим блеском.

Лимонит ($FeO(OH)\cdot nH_2O$): Широко распространен в зонах окисления, псевдоморфно замещая пирит и халькопирит. Обычно ассоциирует с гетитом и гематитом.

Малахит [$Cu_2(OH)_2CO_3$]: Встречается в виде зеленых гроздевидных корок, часто покрывающих поверхности трещин и пустот в измененных вмещающих породах.

Минералогический анализ проб руд месторождения Та Фой выявил следующие типичные текстуры и структуры руд.

Вкрапленные и кластерные структуры: Это наиболее распространенная структура, наблюдаемая в рудных телах, где халькопирит, пирит, пирротин и кубанит распределены в виде мелко- и среднезернистых агрегатов в матрице вмещающих пород (рис. 6, *с*, *т*, *у*, *ф*). Распределение рудных минералов неравномерно, они образуют скопления различных размеров в измененных вмещающих породах.

Массивная структура: Пирит, пирротин и халькопирит часто встречаются в виде компактных массивных агрегатов, образуя зоны с высоким содержанием сульфидов. Эти зоны часто представляют собой крупнозернистые, плотно агрегированные сульфиды, замещающие более ранние минеральные фазы (рис. 6, *в*, *д*).

Жильные и прожилковые структуры: Гидротермальные процессы замещения и заполнения привели к образованию сульфидных жил и микропрожилков, состоящих в основном из халькопирита, пирротина и небольшого количества халькозина. Эти прожилки имеют различную мощность и секут вмещающие породы, часто заполняя трещины и микротрещины (рис. 6, *ф*).

Структуры замещения и растворения: Вторичные зоны обогащения содержат ковеллин, халькозин, лимонит и гетит, замещающие и корродирующие первичные сульфиды, такие как халькопирит и пирротин. Эти минералы образуют ободки вокруг первичных сульфидов, что указывает на окисление и гипергенные процессы (рис. 6, *и*, *м*).

Эвгедральные до субгедральных текстуры: Халкопирит и пирит часто имеют хорошо развитые кристаллические грани, что свидетельствует о кристаллизации в благоприятных условиях. Эта текстура чаще наблюдается в зонах первичной минерализации.

Ангедральная текстура: Наиболее распространенная текстура в сульфидных рудах, где халькопирит, пирротин и кубанит демонстрируют неравномерную морфологию со срастаниями зерен в результате процессов замещения и разрастания.

Колломорфная текстура: Наблюдается главным образом в присутствии вторичных минералов, таких как марказит, мельниковит и ковеллин, образующих концентрические слои вокруг ранее существовавших сульфидов. Эта текстура указывает на низкотемпературное гидротермальное осаждение.

Остаточная текстура: Ранние сульфиды, такие как пирит и пирротин, частично замещаются более поздними сульфидами, такими как халькопирит и борнит, оставляя после себя изрезанные и корродированные контуры.

Брекчиевая и фрагментированная текстура: в зонах разломов и смятия сульфидные минералы являются фрагментированными и сцементированными более поздними гидротермальными минералами, что образует брекчиевидные текстуры.

2.5.2. Парагенетическая последовательность

На основании геологических условий образования руд, морфологических взаимоотношений минералов в руде и их генетико-морфологических характеристик можно выделить характерные минеральные ассоциации, а также периоды и стадии рудообразования в исследуемом районе. В табл. 2 приведена сводная информация о минеральных парагенезисах в ходе формирования месторождения.

Гидротермальный период включает три стадии рудообразования. На ранней стадии преобладает образование вкрапленного кварца и магнетита с небольшим количеством пирита. Основная сульфидная стадия характеризуется появлением сульфидных минералов, образующих минеральную ассоциацию, включающую пирит, пирротин, халькопирит и кубанит в присутствии кварца. Минерализация представлена преимущественно в виде вкрапленных зерен, с незначительным развитием в прожилках. Стадия

пост-рудной фазы представляет собой основную фазу образования медных руд. На этой стадии образуются кварц-халькопирит-кубанит, что сопровождается обширными гидротермальными изменениями вмещающих пород, включая эпидотизацию, актинолитизацию, тремолитизацию и хлоритизацию.

Период гипергенного обогащения состоит из одной рудообразующей стадии, характеризующейся ковеллинизацией, халкозинизацией и лимонитизацией первичных рудных минералов (см. табл. 2).

3. Методы отбора проб и анализа

3.1. Материалы исследования и петрографические наблюдения

В данном исследовании использовались пробы сульфидной медной руды и сопутствующие жильные минералы, включая сфен и кварц, отобранные как с поверхности, так и из недр месторождения Та Фой. Из выбранных проб были изготовлены аншлифы и исследованы с помощью оптического микроскопа и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) для определения минерального состава, текстурных взаимосвязей и признаков изменения сфена и сопутствующих минералов.

3.2. Аналитические методы

3.2.1. Растровая электронная микроскопия (SEM)

Исследования методом растровой электронной микроскопии проводились с использованием микроскопа FEI Quanta 200, оснащенного системой EDS, при напряжении 20 кВ и токе 20 нА. Для изучения зональности, морфологии и особенностей изменения сфена использовались изображения в обратно рассеянных электронах (BSE). Анализы были выполнены в Национальной базовой лаборатории Китайского Университета Наук о Земле (Ухань).

3.2.2. Микротермометрия флюидных (газово-жидких) включений

Шлифы кварца (толщиной ~0,20 мм) изучались с использованием камеры стадийного нагревания/замораживания Linkam THMSG 600, установленной на микроскопе Olympus BX51. Исследование газово-жидких включений было сосредоточено на первичных, псевдовторичных и вторичных включениях на основе установленных критериев классификации [49, 50]. Для оценки солености и плотности флюидов использовались температуры эвтектики и плавления; расчеты выполнялись с помощью программного обеспечения FLINCOR. Точность определения температуры составляла ±0,2 °C в диапазоне от −20 до +20 °C.

3.2.3. Изотопный анализ серы

Исследования изотопного состава серы проводились с использованием масс-спектрометра Delta V Plus в Пекинском Научно-Исследовательском Институте Геологии Урана CNNC (Национальной Ядерной Корпорации Китая). Результаты представлены в виде значений $\delta^{34}S$ относительно стандарта V-CDT с аналитической точностью выше ±0,2 ‰ (2σ).

3.2.4. Изотопный анализ сфена U-Pb методом

U-Pb датирование сфена была проведена в Государственной Базовой Лаборатории Геологических Процессов и Минеральных Ресурсов (GPMR) Китайского Университета Наук о Земле (Ухань) с использованием системы Agilent 7700x ICP-MS в связке с системой лазерной абляции GeoLas 2005, оснащенной DUV 193 нм ArF-эксимерным лазером. Аналитические процедуры и методы обработки данных соответствовали описанным в работе Спандлера с соавт. (Spandler et al.) [51]. Для всех анализов использовался размер лазерного пятна 32 мкм, а в качестве внутреннего стандартного изотопа использовался 43Ca, ранее измеренный с помощью электронного микрозондового анализа

Таблица 2

Минеральные ассоциации на месторождении Та Фой, северо-западный Вьетнам

Минералы	Гидротермальная минерализация			Эпигенез
	Кварц – магнетит	Кварц – пирит	Кварц – халькопирит – кубанит	Ковеллин – халькозин – лимонит
Кварц	▬		▬	
Магнетит	- - -	- - -		
Пирит		- - -	- - -	
Молибденит		- - -		
Халькопирит			- - -	
Кубанит			- - -	
Пирротин			- - -	
Мельниковит			• • •	
Халькозин				- - -
Ковеллин				- - -
Гетит				- - -
Гидрогетит				- - -
Лимонит				- - -

▬ Основные (более 5 %) - - - В подчиненном количестве (1–5 %) • • • Локально встречающиеся

(EPMA). В качестве внешнего стандарта для ограничения с обеих сторон использовался NIST SRM610 [51] (стандарт, утвержденный Национальным Институтом Стандартов и Технологий). Интенсивность лазерного излучения была установлена на уровне 5 Дж/см^2 с частотой импульсов 10 Гц; параметры были оптимизированы для повышения аналитической чувствительности при минимальном фракционировании элементов. Калибровка геохимических и изотопных данных достигалась путем проведения одного измерения стандартов MKED1 и NIST SRM610 после анализа каждых трех рядовых проб. Эталонный материал MKED1 получен из Cu-Au-R3Э месторождения Элайн Дороти (Elaine Dorothy), залегающего в пределах выступа Маунт-Айза, штат Квинсленд, Австралия. Графики согласованных значений абсолютного возраста и расчеты средневзвешенного возраста по соотношению $^{206}Pb/^{238}U$ были подготовлены и выполнены с помощью Isoplot/Ex_ver3 [52].

4. Результаты и обсуждение

4.1. Изотопный состав серы сульфидных минералов

Результаты изотопного анализа серы в пробах сульфидов приведены в табл. 3. В данном исследовании были определены значения $\delta^{34}S$ в пяти пробах халькопирита и одной пробе пирита из месторождения Та Фой. Изотопный состав серы в этих шести пробах колеблется от +2,2 до +3,1 ‰, со средним значением +2,85 ‰.

Анализ изотопного состава серы в халькопирите и пирите из месторождения Та Фой показывает узкий диапазон, близкий к 0‰, что соответствует характеристикам серы мантийного происхождения (рис. 7). Это позволяет предположить, что источником рудообразующих материалов месторождения меди Та Фой являлся относительно однородный магматический резервуар.

Таблица 3

Изотопный состав серы в кристаллах халькопирита и пирита из проб руды месторождения Та Фой

№	Проба	Место отбора	Минералы	$\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$	2σ
1	TP-01	Поверхность, TQ.4	Халькопирит	2,6	0,2
2	TP-02	Поверхность, TQ.5	Халькопирит	2,4	0,2
3	TP-03	Поверхность, TQ.6	Халькопирит	2,2	0,2
4	TP-04	30 м ниже поверхности, TQ.4	Халькопирит	2,9	0,2
5	TP-05	50 м ниже поверхности, TQ.6	Халькопирит	3,1	0,2
6	TP-06	120 м ниже поверхности, TQ.6	Пирит	3,9	0,1
Среднее		–	–	**2,85**	–

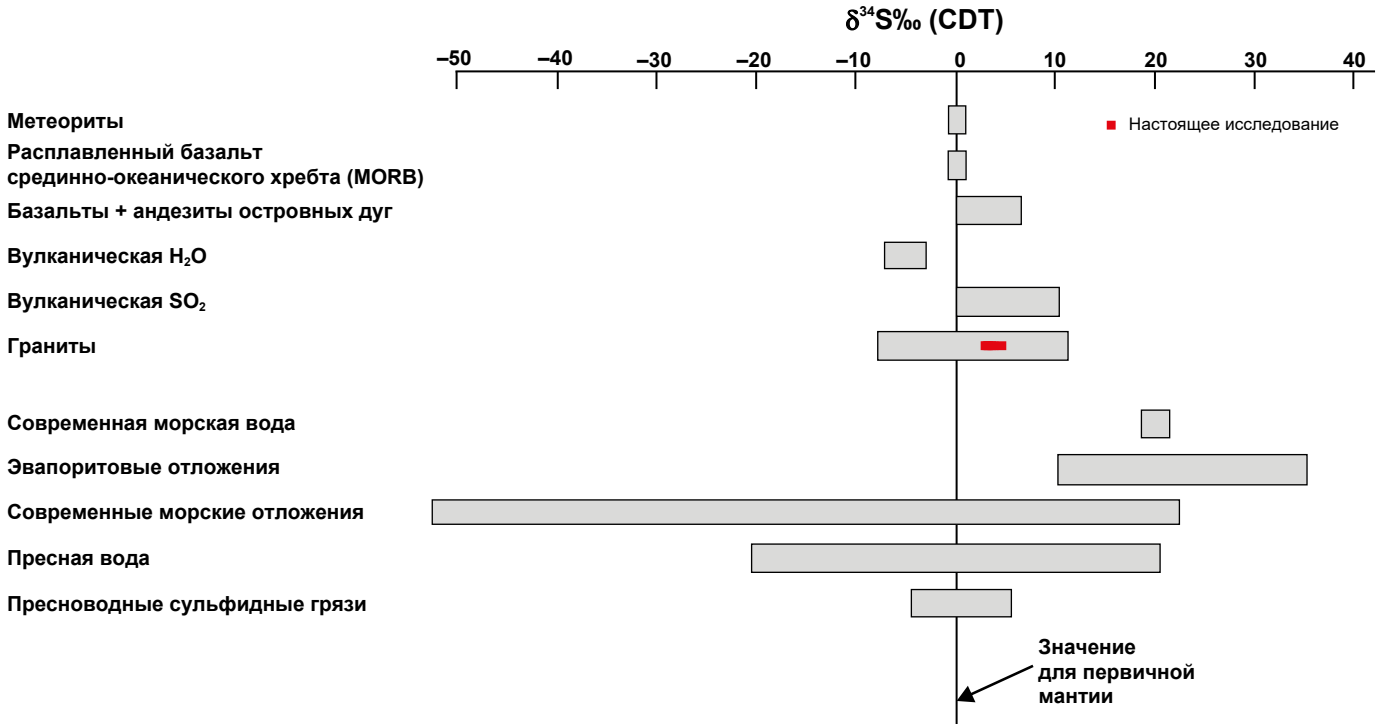


Рис. 7. Диаграмма естественных резервуаров изотопов серы для определения источников меди месторождения Та Фой (данные из [53–59])

4.2. Рудообразующие флюиды

Анализ 8 проб кварца, ассоциированного с медными рудами, выявил 97 флюидных (газово-жидких) включений с эллиптической, треугольной или удлиненной эллиптической морфологией. Эти включения подразделяются на два типа: газово-жидкие (тип I) и газовые включения CO_2-H_2O (тип II) (табл. 4). Из них на включения типа I (из 6 проб кварца) приходится 77 включений, а на включения типа II (из 2 проб кварца) – 20 включений. Микротермометрические измерения температур гомогенизации для включений типа I (газово-жидкие) варьируются от 163,1 до 375,6 °C, со средним значением 256,4 °C. Доминирующий температурный диапазон составляет 240–300 °C. Температура замерзания колеблется от −10,5 до −1,0 °C, преимущественно между −5,0 и −3,0 °C. Для включений типа II (CO_2-H_2O) температура гомогенизации колеблется от 250 до 410 °C, в среднем составляя 350 °C. Доминирующий температурный диапазон составляет 330–360 °C. Температура замерзания колеблется от −11,8 до −3,8 °C, в основном между −6,2 и −4,8 °C. Соленость (минерализация) флюидных включений колеблется от 2,1 до 16,25 вес. %, причем большинство значений находится в диапазоне от 4,0 до 6,6 вес. %, а среднее значение составляет 6,96 вес. %. Плотность флюидов колеблется от 1,15 до 1,91 г/см^3, в среднем составляя 1,35 г/см^3.

Анализ флюидных включений показывает, что измеренные температуры гомогенизации колеблются от 163,1 до 410 °C, с преобладающим диапазоном от 250 до 350 °C, что позволяет классифицировать рудообразующие флюиды как средне- и относительно высокотемпературные. Значения солености колеблются от 2,1 до 16,25 % NaCl экв., что указывает на умеренный уровень солености. Давление рудообразования колеблется от 43,98 до 99,85 МПа, а глубина – от 3,39 до 6,45 км, что позволяет предположить, что руда образовалась на средней глубине.

4.3. Время образования медной минерализации

Представлены результаты U-Pb-датирования двух проб сфена с соответствующими диаграммами (кривыми) согласованных значений абсолютного возраста, показанными на рис. 8. В пробе TP-12 25 точечных анализов, проведенных на 10 зернах сфена, дали согласующиеся U-Pb возрасты со средневзвешенным $^{206}Pb/^{238}U$ возрастом 810,7 ± 4,6 млн лет (n = 25, MSWD (среднеквадратическое отклонение) = 0,82). Аналогично, для пробы TP-19, 25 точечных анализов 12 зерен сфена показали согласующиеся U-Pb возрасты, что дало средневзвешенный $^{206}Pb/^{238}U$ возраст 819,5 ± 2,0 млн лет (n = 25, MSWD = 5,2).

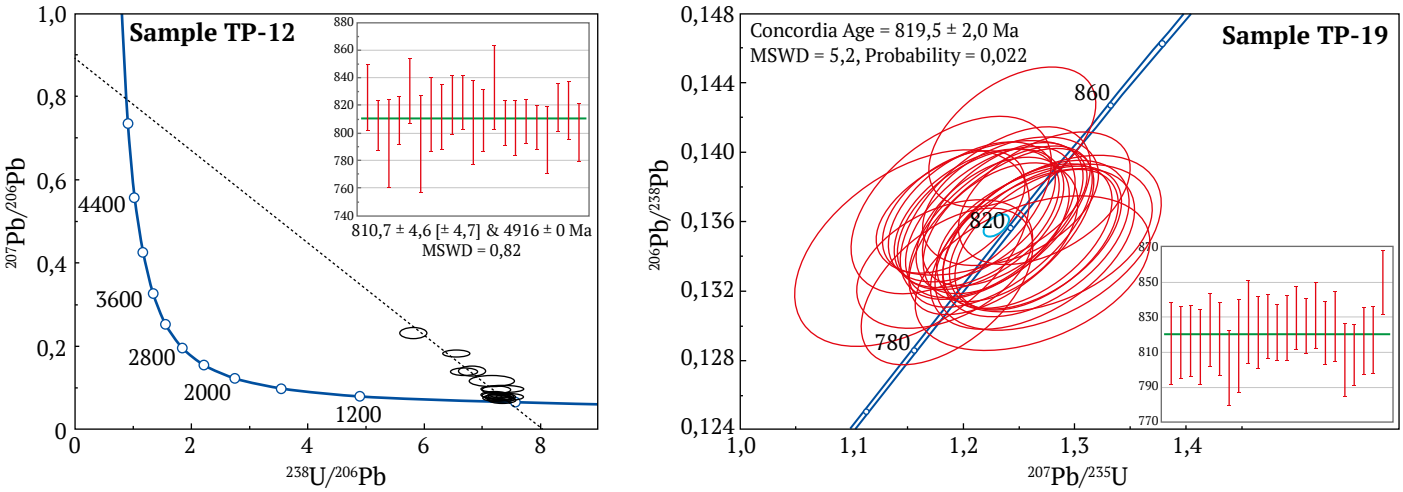
U-Pb датирование сфена из медного месторождения Та Фой указывает на то, что его минерализация образовалась между 810 и 820 млн лет назад (см. рис. 8). Этот возраст сопоставим с возрастом внедрения гранодиоритовых и диоритовых массивов, таких как массивы Фин Нган, Суой Тау и Лунг Тханг, который составляет 860–740 млн лет [11, 47, 65]. Пространственная близость этих интрузий к месторождению Та Фой указывает на генетическую связь между медной минерализацией и магматической активностью.

Таблица 4

Сводка данных по флюидным включениям на месторождении Та Фой

Проба	Тип включения	Количество	$T_{m.ice}$, °C (среднее значение)	T_h, °C (среднее значение)	Минерализация вес. % NaCl экв. (среднее значение)	Плотность, г/см^3 (среднее значение)	Давление, МПа (среднее значение)	Глубина, км (среднее значение)
TP-I.1	Тип I	12	−2,9–−2,1 (−2,53)	290–321 (304,5)	2,1–8,68 (5,19)	1,15–1,54 (1,29)	43,98–95,13 (66,56)	3,46–6,23 (4,76)
TP-I.2		14	−5,2–−1,0 (−2,95)	163,1–372 (335,0)	3,06–14,25 (6,13)	1,16–1,68 (1,31)	44,53–99,85 (68,43)	3,50–6,45 (4,86)
TP-I.3		15	−10,5–−2,3 (−3,94)	272–375,6 (314,24)	2,42–14,15 (7,42)	1,15–1,59 (1,32)	47,36–94,52 (69,70)	3,67–6,20 (4,93)
TP-I.4		12	−5,0–−2,5 (−3,51)	240–350 (308,33)	4,63–11,55 (7,31)	1,13–1,51 (1,33)	46,06–93,44 (70,27)	3,39–6,15 (4,94)
TP-I.5		15	−5,1–−2,5 (−4,21)	210–310 (266,67)	6,73–15,16 (9,99)	1,16–1,41 (1,29)	47,65–77,01 (64,18)	3,69–5,35 (4,65)
TP-I.6		9	−4,2–−1,5 (−3,16)	170–285 (230,44)	7,02–16,05 (10,77)	1,18–1,47 (1,31)	49,19–87,55 (66,45)	3,79–5,87 (4,77)
TP-I.7	Тип II	8	−11,8–−3,8 (−5,81)	250–410 (333,5)	6,31–16,15 (11,62)	1,19–1,56 (1,35)	50,89–89,41 (69,94)	3,89–5,96 (4,96)
TP-I.8		12	−10,5–−4,0 (−5,63)	280–405 (340,58)	7,73–16,25 (11,31)	1,20–1,91 (1,53)	48,34–91,69 (68,10)	3,73–6,07 (4,85)

Примечание: Соленость и плотность рассчитаны по методу, предложенному в [60, 61]; давление рассчитано по методу, предложенному в [62]; глубина оценена по методу, предложенному в [63, 64]; $T_{m.ice}$ – конечная температура плавления льда; T_h – температура гомогенизации.



а *б*

Рис. 8. Диаграммы (кривые) согласованных значений абсолютного возраста по данным U-Pb изотопного датирования сфена из медного месторождения Та Фой: *а* – проба TP-12 (рудное тело TQ.4); *б* – проба TP-19 (рудное тело TQ.6)

4.4. Происхождение минерализации и условия образования

Месторождение Та Фой интерпретируется как средне-высокотемпературное гидротермально-метасоматическое месторождение с магматическим источником рудообразующих материалов. Медные руды концентрируются вдоль контакта между формацией Синь Куен и интрузиями роговообманковых диоритов. Они в основном сосредоточены в измененных породах (в меньшей степени в кварц-полевой шпат-биотитовых сланцах) и ассоциируют с характерной минеральной ассоциацией тремолит-актинолита, альбита и эпидота.

Кроме того, пространственная близость неопротерозойских гранодиоритовых и диоритовых массивов Фин Нган, Суой Тау и Лунг Тханг к месторождению Та Фой указывает на потенциальную генетическую связь между ними. Это означает, что на формирование месторождения Та Фой, возможно, повлияли тектонические процессы, связанные с этими магматическими интрузиями. В частности, массивы Фин Нган, Суой Тау и Лунг Тханг, которые образовались в условиях субдукции при формировании континентальных дуг [11, 42, 47], могли сыграть решающую роль в процессах формирования минерализации.

4.5. Сопоставление с хорошо изученными медно-порфировыми месторождениями

Изотопный состав серы (+2,2 до +3,1 ‰, в среднем +2,85 ‰), установленный на медном месторождении Та Фой, находится в типичном диапазоне для серы мантийного происхождения, который обычно обнаруживается в медно-порфировых системах по всему миру [66, 67]. Например, изотопный состав серы в диапазоне от 0 до +5 ‰ был установлен в сульфидных минералах месторождений порфировых руд меди и молибдена в Андах (например, Чукикамата, Эль-Теньенте) [68], где магматические источники являются основным источником поступления серы. Эта согласованность позволяет предполагать, что источником минерализованного материала месторождения Та Фой, как и в классических порфировых системах, также был относительно однородный магматический резервуар.

По данным изучения флюидных включений, температуры гомогенизации (163–410 °C, их преобладающий диапазон 250–350 °C) и соленость (2,1–16,25 вес. % в эквиваленте NaCl, в среднем ~7 вес. %), наблюдаемые на месторождении Та Фой, сопоставимы с данными, полученными в медно-порфировых системах по всему миру [66-68]. Например, исследования месторождений Бату Хиджау (Индонезия) зафиксировали аналогичные диапазоны температур гомогенизации флюидных включений (250–400 °C) и умеренную до высокой соленость (3–16 вес. % NaCl), что свидетельствует о присутствии магматических гидротермальных флюидов, подвергшихся фазовому разделению и охлаждению в процессе образования руд [69]. Оценки глубин 3,4–6,5 км и давления до ~100 МПа в Та Фой также согласуются с типичной глубиной залегания медно-порфировых месторождений (2–6 км), что дополнительно подтверждает данную интерпретацию.

Кроме того, временные рамки, установленные на основе U-Pb возраста сфена (810–820 млн лет), позволяют предположить, что месторождение Та-Фой образовалось одновременно с залегающими поблизости неопротерозойскими магматическими интрузиями (в частности, Фин-Нган, Лунг-Тханг, Суой-Тау). Это время формирования минерализации, пространственная близость и геохимическая сходство (например, изотопный состав серы, состав флюидов) напоминают временные и пространственные взаимосвязи, обычно наблюдаемые между медно-порфировыми месторождениями и интрузивными телами, с которыми генетически связаны такие месторождения.

В совокупности геологические, геохимические данные и данные изучения флюидных включений, полученные на месторождении Та Фой, указывают на магматогенное гидротермальное происхождение, что соответствует характеристикам медно-порфировых систем. Однако преобладающий структурный контроль и особенности гидротермально-метасоматических изменений, наблюдаемые в полевых условиях, позволяют предположить, что месторождение может представлять собой порфировую скарновую или эндоскарновую систему, сформированную в результате миграции магматических флюидов вдоль литологических и структурных контактов.

4.6. Геологоразведочный потенциал региона в отношении медных руд и металлогенические последствия

Данные из зоны Фан Си Пан (включающей месторождения Синь Куен, Та Фой, Фин Нган, Лунг Тханг и Суой Тау) свидетельствуют о крупном металлогеническом событии, произошедшем между 810 и 820 млн лет назад.

U–Pb датирование гранитоидов по всей зоне и вдоль пояса Айлао-Шань – Ред-Ривер подтверждает синхронность магматизма и минерализации [11, 65], указывая на наличие единой металлогенической системы.

Учитывая широкое распространение гранодиоритовых и диоритовых интрузий и их очевидную связь с медной минерализацией, регион обладает высоким потенциалом обнаружения новых ресурсов меди. В частности, такие районы, как Лунг Тханг и Суой Тау, остаются малоизученными и требуют дальнейшего исследования и разведки.

Выводы

Данное исследование позволяет лучше понять месторождение меди Та Фой благодаря комплексному подходу, включающему петрографический, геохимический, изотопный и геохронологический анализ. Основные выводы исследования следующие:

Во-первых, медь встречается в линзовидных и жильно-прожилковых телах вдоль структур, простирающихся в направлении северо-запад – юго-восток. Скопления рудных минералов – халькопирита, борнита, пирита, пирротина, кубанита и магнетита – формируют вкрапленные, ангедральные и субгедральные текстуры, свидетельствующие о гидротермальном заполнении и замещении.

Во-вторых, изотопный состав серы ($\delta^{34}S$) из халькопирита и пирита свидетельствует о ее магматическом происхождении, что указывает на залегающие поблизости гранодиоритовые и диоритовые интрузии (массивы Фин Нган, Суой Тау и Лунг Танг) как основные резервуары-источники металлов и флюидов.

В-третьих, возраст гидротермального сфена, определенный по U-Pb методу (819,5±2,0 – 810,7±4,6 млн лет), фиксирует время данного события минерализации в неопротерозое, что совпадает со временем внедрения региональных интрузивных комплексов, подтверждая их генетическую связь.

Кроме того, микротермометрия флюидных включений указывает на умеренные и высокие температуры (163–410 °C), умеренную соленость (7–16 % NaCl экв.), глубину образования ~3,4–6,5 км и давление 44–100 МПа – условия, типичные для магматогенных гидротермальных систем.

Наконец, присутствие магматогенной (по изотопному составу) серы, высокотемпературные минерализованные (соленые) флюиды и структурные условия— всё это в совокупности указывает на то, что месторождение Та Фой представляет собой порфировую (вкрапленную) скарновую или эндоскарновую систему, сформировавшуюся в связанной с субдукцией конвергентной окраине в неопротерозойское время.

В совокупности эти результаты уточняют металлогеническое строение района Та Фой и подчеркивают его потенциал для дальнейшей разведки месторождений меди в северо-западной части Вьетнама.

Список литературы / References

1. Evans A.M. *Ore geology and industrial minerals: an introduction.* 3rd ed. Wiley-Blackwell; 1993. 403 p.
2. Misra K.C. *Understanding ore deposits*. Kluwer Academic Publishers; 2000. 845 p.
3. Robb L. *Introduction to Ore-Forming Processes*. Blackwell Publishing, Oxford; 2004. 373 p.
4. Tri T.V., Khuc V. (eds.) *Geology and earth resources of Vietnam*. General Department of Geology, and Minerals of Vietnam. Hanoi: Publishing House for Science and Technology; 2011. 645 p.
5. Fromaget J. *Études géologiques sur le Nortd-Ouest du Tonkin et le Nord du Haut-Laos*. Hanoi; Service Geologique de l' Indochine; 1937. 153 p.
6. Thi P.T. Iron- and copper-bearing metasomatic rocks in the Lao Cai area. *Journal of Geology, Series A*. 1964;32(4):9–15. (In Vietnamese). URL: http://idm.gov.vn/Data/TapChi/1964/A323.htm
7. Hai T.Q. Further insights into ore-bearing metasomatic rocks in Sin Quyen. *Journal of Geology, Series A*. 1969;85–86(5–8):23–40. (In Vietnamese). URL: http://idm.gov.vn/Data/TapChi/1969/a854.htm
8. Cuong H.H., Han N.D. Ore-forming types in the Sin Quyen area. *Journal of Geology, Series A*. 1969;81–82(12):23–32. (In Vietnamese). URL: http://idm.gov.vn/Data/TapChi/1969/a813.htm
9. Mclean R.N. *The Sin Quyen iron oxide-copper-gold-rare earth oxide mineralization of North Vietnam*. In: Porter T.M. (Ed.) *Hydrothermal iron oxide copper–gold & related deposits: a global perspective. Volume 2*. Adelaide: PGC Publishing; 2001. Pp. 293–301.
10. Li X.C., Zhou M.F., Tran M.D. REE mineralization in the Sin Quyen Fe-Cu-LREE-(U-Au) deposit, Northwest Vietnam. In: *Abstracts of the Joint Assembly AGU-GAC-MAC-CGU*. Montreal, Canada; 2015.

11. Dung T.M., Luat N.Q., Hai T.T., et al. *Nature and formation age of copper mineralization in the northeastern Fan Si Pan belt and its metallogenic significance*. Fundamental research project in natural sciences, Code 105.01-2012.06, Ministry of Science and Technology; 2016. 50 p. (In Vietnamese).
12. Dac N.X, Zhao X.F, Hai T.T, et al. Two episodes of REEs mineralization at the sin quyen IOCG deposit, NW Vietnam. *Ore Geology Reviews*. 2020;125:103676. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103676
13. Anh T.T., Dung P.T., Hoa T.T., et al. 2010. *Enhancing mineral extraction efficiency and environmental protection: Investigating associated components in basic metal and rare earth mineral deposits in northern Vietnam*. State Science & Technology Programme, code KC.08.24/06-10. 459 p. (In Vietnamese).
14. Anh B.X. (Ed.) *Report on the assessment of copper ore potential and other mineral resources in the Ta Phoi area, Cam Duong Town, Lao Cai Province*. Hanoi: Intergeo Federation; 2007. (In Vietnamese).
15. San P.V. (Ed.). *Exploration report on copper ore in the Ta Phoi area, Lao Cai City, Lao Cai Province*. Hanoi: Geological Information and Archive Center; 2012. (In Vietnamese).
16. Metcalfe I. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2002;20(6):551–566. https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00022-6
17. Metcalfe I. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context. *Gondwana Research*. 2006. 9(1):24–46. https://doi.org/10.1016/j.gr.2005.04.002
18. Golonka J., Krobicki M., Pająk J, et al. *Global plate tectonics and paleogeography of Southeast Asia*. Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection. Arkadia, Kraków: AGH-University of Science and Technology; 2006. 128 p.
19. Hung K.T. Overview of magmatism in northwestern Vietnam. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*. 2010;80(2):185–226. URL: http://www.asgp.pl/80_2_185_226
20. Pham T.H., Chen F., Wang W., et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Posen granite in northwest Vietnam. *Acta Petrologica Sinica*. 2009;25(12):3141–3152. (In Chinese with English abstract). URL: http://www.ysxb.ac.cn/en/article/id/aps_20091204
21. Wang W., Cawood P.A., Zhou M. F., Zhao J. H. Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events link Yangtze to northwest Laurentia in the Nuna supercontinent. *Earth and Planetary Science Letters*. 2016;433:269–279. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.005
22. Qi X., Santosh M., Zhao Y., et al. Mid-Neoproterozoic ridge subduction and magmatic evolution in the northeastern margin of the Indochina block: Evidence from geochronology and geochemistry of calc-alkaline plutons. *Lithos*. 2016;248–251:138–152. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.12.028
23. Minh P., Hieu P.T., Thuy N.T.B., et al. Neoproterozoic granitoids from the Phan Si Pan Zone, NW Vietnam: Geochemistry and geochronology constraints on reconstructing South China–India Palaeogeography. *International Geology Review*. 2021;63(5):585–600. https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1728584
24. Поляков Г.В., Балыкин П.А., Чан Ч.Х. и др. Эволюция мезозойско-кайнозойского магматизма рифта Шонгда и структур его обрамления (северо-западный Вьетнам). *Геология и геофизика*. 1998;39(6):695–706. Polyakov G., Balykin P., Hoa T.T., et al. Evolution of the Mesozoic-Cenozoic magmatism of the Song Da rift and its contouring structures. *Geologiya i Geofizika*. 1998;39(6):695–706. (In Russ.)
25. Anh T.V., Pang K.N., Chung S.L., et al. The Song Da magmatic suite revisited: A petrologic, geochemical and Sr–Nd isotopic study on picrites, flood basalts and silicic volcanic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011;42(6):1341–1355. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.07.020
26. Metcalfe I. Changhsingian (late Permian) conodonts from Son La, northwest Vietnam and their stratigraphic and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2012;50:141–149. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.01.002
27. Faure M., Lepvrier C., Van Nguyen V., et al. The South China block–Indochina collision: Where, when, and how? *Journal of Asian Earth Sciences*. 2014;79(Part A):260–274. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.09.022
28. Faure M., Lin W., Chu Y., Lepvrier C. Triassic tectonics of the southern margin of the South China block. *Comptes Rendus Geoscience*. 2016;348(1):5–14. https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.06.012
29. Minh P., Hieu P.T., Hoang N.K. Geochemical and geochronological studies of the Muong Hum alkaline granitic pluton from the Phan Si Pan Zone, northwest Vietnam: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *The Island Arc*. 2018;27(4):12250. https://doi.org/10.1111/iar.12250
30. Usuki T., Lan C.Y., Tran T.H., et al. Zircon U–Pb ages and Hf isotopic compositions of alkaline silicic magmatic rocks in the Phan Si Pan-Tu Le region, northern Vietnam: Identification of a displaced western extension of the emeishan large igneous province. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015;97(Part A):102–124. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.10.016
31. Tran T.H., Lan C.Y., Usuki T., et al. Petrogenesis of late permian silicic rocks of Tu Le basin and Phan Si Pan uplift (NW Vietnam) and their association with the Emeishan large igneous province. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015;109:1–19. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.05.009
32. *Geology of Vietnam: Stratigraphy*. DGMVN (Department of Geology and Minerals of Vietnam). Hanoi: Science Publisher; 1995. 359 p. (In Vietnamese).

33. Pham T.H., Lei W.X., Minh P., et al. Archean to Paleoproterozoic crustal evolution in the Phan Si Pan zone, Northwest Vietnam: Evidence from the U-Pb geochronology and Sr-nd-hf isotopic geochemistry. *International Geology Review*. 2022;64(1):96–118. https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1839976
34. Lan C.Y., Chung S.L., Lo C.H., et al. First evidence for Archean continental crust in northern Vietnam and its implications for crustal and tectonic evolution in Southeast Asia. *Geology*. 2001;29(3):219–222. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0219:FEFACC>2.0.CO;2
35. Nam T.N. 750 Ma U-Pb zircon age of the Po Sen Complex and tectonic implication. *Journal of Geology*. 2003;274:11–16. (In Vietnamese). URL: http://idm.gov.vn/Data/TapChi/2003/274/t11.htm
36. Zhao T., Cawood P.A., Wang K., et al. Neoarchean and Paleoproterozoic K-rich granites in the Phan Si Pan Complex, North Vietnam: Constraints on the early crustal evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*. 2019;332:105395. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105395
37. Zhao T., Cawood P.A., Zi J. W., et al. Positioning the Yangtze Block within Nuna: Constraints from paleoproterozoic granitoids in North Vietnam. *Precambrian Research*. 2023;391:107059. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2023.107059
38. Wang P.L., Lo C.H., Lan C.Y., et al. 2011. Thermochronology of the PoSen complex, northern Vietnam: Implications for tectonic evolution in SE Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011;40(5):1044–1055. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.11.006
39. Pham T.H., Chen F.K., Thuy N.T.B., et al. Geochemistry and zircon U–pb ages and Hf isotopic composition of Permian alkali granitoids of the Phan Si Pan zone in northwestern Vietnam. *Journal of Geodynamics*. 2013;69:106–121. https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.03.002
40. Pham T.T., Shellnutt J.G., Tran T.A., Lee H.Y. Petrogenesis of eocene to early Oligocene granitic rocks in Phan Si Pan uplift area, northwestern Vietnam: Geochemical implications for the Cenozoic crustal evolution of the South China block. *Lithos*. 2020;372:105640. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105640
41. Dung P.T., Usuki T., Tran H.T., et al. Emplacement ages, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic characteristics of Cenozoic granites in the phan Si pan uplift, Northwestern Vietnam: Petrogenesis and tectonic implication for the adjacent structure of the red river shear zone. *International Journal of Earth Sciences*. 2023;112:1475–1497. https://doi.org/10.1007/s00531-023-02307-4
42. Li X.C., Zhao J.H., Zhou M.F., et al. Neoproterozoic granitoids from the Phan Si Pan belt, Northwest Vietnam: Implication for the tectonic linkage between Northwest Vietnam and the Yangtze Block. *Precambrian Research*. 2018;309:212–230. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.02.019
43. Zhou M.F., Yan D.P., Kennedy A.K., et al. SHRIMP U–pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*. 2002;196(1–2):51–67. https://doi.org/10.1016/10.1016/S0012-821X(01)00595-7
44. Zhao J.H., Zhou M.F. Neoproterozoic adakitic plutons in the northern margin of the Yangtze Block, China: Partial melting of a thickened lower crust and implications for secular crustal evolution. *Lithos*. 2008;104(1):231–248. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.12.009
45. Cai Y., Wang Y., Cawood P.A., et al. Neoproterozoic subduction along the Ailaoshan zone, South China: Geochronological and geochemical evidence from amphibolite. *Precambrian Research*. 2014;245:13–28. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.01.009
46. Cai Y., Wang Y., Cawood P.A., et al. Neoproterozoic crustal growth of the Southern Yangtze Block: Geochemical and zircon U–Pb geochronological and Lu-hf isotopic evidence of neoproterozoic diorite from the Ailaoshan zone. *Precambrian Research*. 2015;266:137–149. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.008
47. Dac N. X., Khan A., Ullah Z., et al. Neoproterozoic granitoids of northwest Vietnam and their tectonic implications. *International Geology Review*. 2024;66(16):2918–2939. https://doi.org/10.1080/00206814.2024.2309470
48. Dung T.M., Liu J.L., Li X.C., Cung D.M. Geology, fluid inclusion and isotopic study of the neoproterozoic Suoi Thau copper deposit, Northwest Vietnam. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. 2016;90(3):913–927. https://doi.org/10.1111/1755-6724.12733
49. Roedder E. *Fluid inclusions*. *Reviews in Mineralogy*. 1984;12:1–644.
50. Van den Kerkhof A.M., Hein U.F. Fluid inclusion petrography. *Lithos*. 2001;55(1–4):27–47. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00037-2
51. Spandler C., Hammerli J., Sha P., et al. MKED1: A new titanite standard for in situ analysis of SmNd isotopes and U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 2016;425:110–126. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.01.002
52. Ludwig K. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft excel. *Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication*; 2003. 70 p.
53. Coleman M.L. Sulphur isotopes in petrology. *Journal of the Geological* Society. 1977;133:593–608. https://doi.org/10.1144/gsjgs.133.6.0593
54. Claypool G.E., Helser W.T., Kaplan I.R., et al. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chemical Geology*. 1980;28:199–260. https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90047-9

55. Chambers L.A. Sulfur isotope study of a modem intertidal environment and the interpretation of ancient sulfides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1982;46(5):721–728. https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90023-0
56. Sakai H., Casadevall T.J., Moore J.G. Chemistry and isotope ratios of sulfur in basalts and volcanic gases at Kilauea volcano, Hawaii. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1982;46(5):729–738. https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90024-2
57. Kerridge J.F., Haymon R.M., Kastner M. Sulfur isotope systematics at the 21oN site, East Pacific Rise. *Earth and Planetary Science Letters*. 1983;66:91–100. https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90128-0
58. Ueda A., Sakai H. Sulfur isotope study of Quaternary volcanic rocks from the Japanese islands arc. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984;48(9):1837–1848. https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90037-1
59. Chaussidon M., Albarede F., Sheppard S.M.F. Sulfur isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of micro-sulphide inclusions. *Earth and Planetary Science Letters*. 1989;92(2):144–156. https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90042-3
60. Bakker R. *Optimal interpretation of microthermometrical data from fluid inclusions: thermodynamic modelling and computer programming*. Habilitation, Ruprecht-Karls-University; 1999.
61. Bakker R.J., AqSo_NaCl: Computer program to calculate P-T-V-X properties in the H_2O-NaCl fluid system applied to fluid inclusion research and pore fluid calculation. *Computers & Geosciences*. 2018;115:122–133. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.03.003
62. Shao J.L., Mei J.M. On the study of typomorphic characteristics of mineral inclusion in the gold deposit from volcanic terrain in Zhejiang and its genetic and prospecting significance. *Minerals and Rocks*. 1986;3:103–111. (In Chinese with English Abstract).
63. Sibson R.H. Seismogenic Framework for Hydrothermal Transport and Ore Deposition. *Rev. Economic Geology*. 2001;14:25–50. https://doi.org/10.5382/Rev.14.02
64. Sibson R.H. Controls on Maximum Fluid Overpressure Defining Conditions for Mesozonal Mineralisation. *Journal of Structural Geology*. 2004;26(6–7):1127–1136. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.11.003
65. Dac N.X., Son T.H., Tin Q.D., et al. In situ U-Pb isotopic dating method on titanite, and application to determine REE-Fe-Cu mineralization age of the Sin Quyen deposit, Lao Cai province. *Journal of Mining and Earth Sciences*. 2023;64(6):50–57. https://doi.org/10.46326/JMES.2023.64(6).06
66. Seedorff E., Dilles J.H., Proffett J.M. Jr., et al. Porphyry deposits–characteristics and origin of hypogene features. society of economic geologists. *Economic Geology 100th Anniversary Volume, 1905–2005*. 2005:251–298. https://doi.org/10.5382/AV100.10
67. Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*. 2010;105:3–41. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3
68. Berger B.R., Ayuso R.A., Wynn J.C., Seal R.R. *Preliminary model of porphyry copper deposits*. Open-File Report 2008–1321. Reston, VA: U.S. Geological Survey; 2008. 55 p. URL: https://pubs.usgs.gov/of/2008/1321/
69. Imai A., Ohno S., Primary ore mineral assemblage and fluid inclusion study of the Batu Hijau Porphyry Cu-Au deposit, Sumbawa, Indonesia. *Resource Geology*. 2008;55(3):239–248. https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2005.tb00245.x

Информация об авторах

Хуонг Те Хунг – доктор наук (науки о Земле), преподаватель, кафедра поисково-разведочной геологии, Ханойский университет горного дела и геологии, г. Ханой, Вьетнам; ORCID 0000-0003-1544-6470, Scopus ID 36716173500; e-mail khuongthehung@humg.edu.vn

Нго Суан Дак – доктор наук (науки о Земле), научный сотрудник, Вьетнамский институт наук о Земле и минеральных ресурсов, г. Ханой, Вьетнам; e-mail dacbmks@gmail.com

Information about the authors

Khuong The Hung – Dr. Sci. (Earth Sci.), Lecturer, Department of Prospecting and Exploration Geology, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam; ORCID 0000-0003-1544-6470, Scopus ID 36716173500; e-mail khuongthehung@humg.edu.vn

Ngo Xuan Dac – Dr. Sci. (Earth Sci.), Researcher, Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources, Hanoi, Vietnam; e-mail dacbmks@gmail.com

Поступила в редакцию	30.03.2025	**Received**	30.03.2025
Поступила после рецензирования	14.06.2025	**Revised**	14.06.2025
Принята к публикации	16.06.2025	**Accepted**	16.06.2025

ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья
https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-419
УДК 622.765:661.185.223.5

Применение полистиролсульфонатов для депрессии магнийсодержащих силикатов при флотации медно-никелевых руд

А.А. Лавриненко[1] ✉, **Г.Ю. Гольберг**[1], **И.Н. Кузнецова**[1], **О.Г. Лусинян**[1], **В.А. Тверской**[2]

[1] *Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация*

[2] *МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

✉ *lavrin_a@mail.ru*

Аннотация

Весьма актуальной является задача повышения эффективности депрессии магнийсодержащих силикатов (МС) при флотации медно-никелевых руд для снижения содержания в концентрате магния, вызывающего существенное увеличение энергозатрат на пирометаллургическую переработку концентрата. Перспективным направлением представляется применение полимерных реагентов, содержащих сульфогруппы. Однако до настоящего времени изучено действие только лигносульфонатов. Остаётся неясным вопрос об эффективности депрессирующего действия других полимерных сульфонатов, включая полистиролсульфонаты (ПСС), и их сравнении с полисахаридами, применяемыми в промышленных условиях. Цель настоящей работы: изучение депрессирующего действия ПСС на эффективность коллективной флотации медно-никелевой руды. Задачи исследований: экспериментальное сравнение эффективности депрессирующего действия ПСС и реагента из класса полисахаридов на МС; определение режимов применения ПСС, обеспечивающих снижение содержания магния в пенном продукте без существенного снижения извлечения меди и никеля в коллективный концентрат; установление влияния молекулярной массы и способа получения образцов ПСС на эффективность их депрессирующего действия. Выполнены лабораторные экспериментальные исследования по коллективной флотации медно-никелевой руды Кольского полуострова, содержащей 15,7 % магния, 0,44 % никеля и 0,25 % меди. Изучено влияние на флотацию полимерных анионоактивных реагентов: ПСС со значениями молекулярной массы от 89 000 до 208 000 г/моль; для сравнения применяли полианионную целлюлозу (ПАЦ-Н). Для повышения эффективности действия этих реагентов предварительно добавляли хлорид магния. Установлено, что наименьшее содержание магния в концентрате достигается применением композиции хлорида магния и ПСС и составляет 14,7 % против 16,7 % без депрессоров. Показано, что ПСС обеспечивает более высокое извлечение меди (на 7 %) и никеля (на 8 %) в концентрат, чем в случае применения ПАЦ-Н, так как ПСС, в отличие от полисахаридов, не образует хелатные комплексы с указанными металлами. Также показано, что для образцов ПСС значение молекулярной массы в указанных пределах практически не влияет на показатели флотации исследованной руды. Получены новые научные знания о влиянии расхода и свойств ПСС на показатели флотации и показано, что практическое применение этого класса реагентов целесообразно при флотации медно-никелевых руд с высоким содержанием магния в тех случаях, когда требуется достигнуть максимально возможного снижения содержания этого элемента в концентрате без существенного снижения извлечения меди и никеля.

Ключевые слова

флотация, медно-никелевая руда, депрессия магнийсодержащих силикатов, полистиролсульфонаты, катионы магния, полианионная целлюлоза

Для цитирования

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Kuznetsova I.N., Lusinyan O.G., Tverskoy V.A. Application of Polystyrene sulfonates for the depression of magnesium-containing silicates in copper-nickel ore flotation. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):280–288. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-419

© Лавриненко А. А., Гольберг Г. Ю., Кузнецова И. Н., Лусинян О. Г., Тверской В. А., 2025

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

Application of polystyrene sulfonates for the depression of magnesium-containing silicates in copper-nickel ore flotation

A.A. Lavrinenko[1] ✉, **G.Yu. Golberg**[1], **I.N. Kuznetsova**[1], **O.G. Lusinyan**[1], **V.A. Tverskoy**[2]

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

[2] *MIREA – Russian Technological University, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow, Russian Federation*

✉ *lavrin_a@mail.ru*

Abstract

It is very urgent to increase the efficiency of depressing magnesium-containing silicates (MS) in the course of the flotation of copper-nickel ores to reduce the content of magnesium in the concentrate, which causes a significant increase in energy consumption in pyrometallurgical processing of the concentrate. The use of polymer reagents containing sulfo groups seems to be a promising area of research. However, only lignosulfonates have been studied so far in this field. The question of the effectiveness of the depressing effect of other polymer sulfonates including polystyrene sulfonates (PSS), and their comparison with polysaccharides used in industrial conditions remains unclear. The purpose of this work is to study the depressing effect of PSS on the performance of bulk flotation of copper-nickel ores. Research objectives: to experimentally compare the effectiveness of the depressing effect of PSS and a reagent from the polysaccharide class on MS; to determine the modes of PSS use to reduce the magnesium content in the concentrate without significantly reducing the recovery of copper and nickel into the bulk concentrate; to establish the effect of molecular weight and the method of obtaining PSS samples on the effectiveness of their depressing effect. Laboratory experimental studies were carried out on the bulk flotation of copper-nickel ores from the Kola Peninsula, containing 15.7% of magnesium, 0.44% of nickel and 0.25% of copper. The effect of the following polymer anionic reagents on the flotation was studied: PSSs with molecular weight ranging from 89,000 to 208,000 g/mol; polyanionic cellulose (PAC-N) was used for comparison. To increase the effectiveness of these reagents, magnesium chloride was previously added. It was found that the lowest magnesium content in the concentrate of 14.7% was achieved using a composition of magnesium chloride and PSS against 16.7% without the depressants. It was shown that PSS provides a higher recovery of copper (by 7%) and nickel (by 8%) into the concentrate than when using PAC-N, since PSS, unlike polysaccharides, does not form chelate complexes with these metals. It was also shown that for PSS samples, the molecular weight within these limits has virtually no effect on the studied ore flotation performance. New scientific knowledge has been obtained about the effect of the consumption and properties of PSS on the flotation performance. It has been shown that the practical use of this class of reagents is advisable for the flotation of copper-nickel ores with a high magnesium content in cases where it is necessary to achieve the maximum possible decreasing the content of this element in the concentrate without significantly reducing the recovery of copper and nickel.

Keywords

flotation, copper-nickel ore, depression of magnesium-containing silicates, polystyrene sulfonates, magnesium cations, polyanionic cellulose

For citation

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Kuznetsova I.N., Lusinyan O.G., Tverskoy V.A. Application of Polystyrene sulfonates for the depression of magnesium-containing silicates in copper-nickel ore flotation. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):280–288. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-419

Введение

Современный этап развития горнорудной промышленности характеризуется вовлечением в переработку сравнительно бедных медно-никелевых руд [1–4]. Существенной проблемой при флотации таких руд является наличие в их составе магнийсодержащих силикатных минералов (МС), в том числе талька, серпентина и ряда других [5, 6]. В результате извлечения указанных силикатов в концентрат повышается содержание в нём вредных примесей, особенно магния, что, в свою очередь, оказывает неблагоприятное воздействие на последующие процессы пирометаллургической переработки концентрата. Так, согласно [7] влияние МС на переработку сульфидного никелевого концентрата заключается в увеличении энергозатрат, повышении износа оборудования и возрастании количества диоксида серы, выбрасываемого в атмосферу. Это обусловливает актуальность проблемы депрессии МС в процессах флотации медно-никелевых руд.

Снижение извлечения МС в концентрат флотации достигается применением реагентов-депрессоров, изменяющих поверхностные свойства этих минералов за счёт уменьшения краевого угла смачивания и (или) увеличения отрицательного заряда поверхности. В результате между частицей МС и пузырьком воздуха создается потенциальный барьер, препятствующий образованию флотационного комплекса и извлечению его в пенный продукт.

В настоящее время разработаны различные способы депрессии МС, главным образом талька и серпентина. Первый характеризуется природной гидрофобностью, обусловленной особенностями кристаллической структуры: на базальной поверхности, составляющей порядка 90 % от общей поверхности этого минерала, преобладают слабополярные связи Si–O [8]. Поэтому краевой угол смачивания сравнительно высокий – от 60 до 90° [9, 10]. Серпентин, в отличие от талька, более гидрофильный, но при этом заряд его поверхности в кислой, нейтральной и щелочной средах (вплоть до значений pH 11–12) – положительный [11]. В результате взаимного притяжения отрицательно заряженных частиц сульфидов и положительно заряженных частиц серпентина последние извлекаются в концентрат флотации. В связи с этим для депрессии талька и серпентина применяют различные методы.

В качестве депрессоров талька получили распространение полисахариды, в том числе карбоксиметилированные крахмалы и целлюлозы (соответственно КМК и КМЦ) [12, 13]. Они характеризуются сильным депрессирующим действием по отношению не только к силикатам, но и к сульфидным минералам [14], то есть низкой селективностью. Исследования, выполненные в ИПКОН РАН, показали, что образец КМЦ отечественного производства, выпускаемый под маркой ПАЦ-Н (полианионная целлюлоза низкомолекулярная), обладает более высокой депрессирующей способностью по отношению к МС по сравнению с зарубежными образцами реагентов того же класса [15]. Известно, что эффективность КМЦ повышается при совместном действии с жидким стеклом как в подкисленной [16], так и в нейтральной форме [17]. В работах [18, 19] показана возможность эффективной депрессии талька лигносульфонатами с предварительным добавлением катионов кальция. Механизм депрессии в этом случае заключается в снижении гидрофобности талька под действием сильных анионоактивных сульфонатных групп. При этом катионы кальция способствуют увеличению адсорбционной способности талька по отношению к лигносульфонатам. Отмечается, что величина адсорбции лигносульфоната на халькопирите меньше по сравнению с тальком; это дает основание для предположения о селективности депрессирующего действия на тальк полимерных реагентов, содержащих сульфогруппы. В отечественной и зарубежной литературе до настоящего времени не изучено влияние на флотацию медно-никелевых руд других полимерных сульфонатов.

Результаты мономинеральной флотации талька показали депрессирующее действие полистиролсульфонатов (ПСС) натрия, несколько более слабое по сравнению с КМЦ и возрастающее в случае предварительного добавления катионов магния или алюминия [20].

Для депрессии серпентина при флотации медно-никелевых руд применяют, в частности, жидкое стекло [21]. Его действие заключается главным образом в нейтрализации положительного поверхностного заряда этого минерала силикат-анионами. Известно также о применении оксида графена, способного селективно агрегировать серпентин [7, 22], органических фосфатов, в частности, фитата натрия [6], об обработке кислотами [23].

Анализ литературы позволил установить следующее:

– современные методы депрессии МС с применением полисахаридов, жидкого стекла и других реагентов позволяют в ряде случаев эффективно снижать содержание магния в пенном продукте, но при этом уменьшается, и в ряде случаев существенно, извлечение меди и никеля в коллективный концентрат флотации за счёт депрессии сульфидов этих металлов;

– до настоящего времени не проведено сравнение эффективности депрессирующего действия полимерных сульфонатов и полисахаридов;

– влияние ПСС на мономинеральную флотацию талька изучено, но не ясно, какое влияние оказывает ПСС на показатели флотации содержащей МС медно-никелевой руды, в том числе на выход концентрата, содержание в нем магния, на извлечение меди и никеля.

Цель настоящей работы: изучение депрессирующего действия полистиролсульфонатов на эффективность коллективной флотации медно-никелевой руды.

Задачи исследований:

– экспериментальное сравнение эффективности депрессирующего действия ПСС и реагента из класса полисахаридов на МС;

– определение режимов применения ПСС, обеспечивающих снижение содержания магния в пенном продукте без существенного снижения извлечения меди и никеля в коллективный концентрат;

– установление влияния молекулярной массы и способа получения образцов ПСС на эффективность их депрессирующего действия.

Для выполнения поставленной цели предусматривалось проведение экспериментальных исследований по флотации медно-никелевой руды с композициями реагентов, обеспечивающих наименьшее содержание магния в концентрате без существенного снижения извлечения меди и никеля.

Методика проведения экспериментов

Исследования проводили с пробой медно-никелевой руды Кольского полуострова. Элементный состав руды по данным рентгенофлуоресцентного анализа: Si – 17,2, Mg – 15,8, Fe – 12,9, Al – 2,5, Ca – 2,0, S – 1,13, Ni – 0,44, Cu – 0,25, Cr – 0,20 %. Рентгенофазовый анализ выявил в составе руды следующие минералы: антигорит, хлорит, амфибол, оливин, минералы группы шпинели, пентландит, виоларит, пирротин, халькопирит, халькофиллит и др.

Опыты были выполнены на лабораторной флотационной машине с объёмом камеры 150 см^3 по схеме, предусматривающей последовательное проведение основной и контрольной флотации исходной пробы руды с раздельной подачей реагентов и соответствующей агитацией. Готовили пробу водной суспензии исходной руды: масса навески – 45 г, значение pH = 9. После перемешивания в течение 60 с осуществляли последовательную подачу реагентов в следующем порядке: депрессор, собиратели и пенообразователь. Кондиционирование пульпы с каждым реагентом выполняли в течение 60 с. Отбор пенного продукта осуществляли каждые 15 с. По истечении 300 с основной флотации осуществляли контрольную флотацию камерного продукта, добавляя последовательно вышеуказанные реагенты в количестве 40 % от расхода для основной флотации. Время контрольной флотации составляло 180 с. Определяли массу объединенного концентрата и хвостов. Содержание в них меди, никеля, магния и кремния определяли рентгенофлуоресцентным методом. Исследования проводили с параллельными опытами. Статистический анализ показал, что расхождение результатов составило примерно ± 0,8 % (отн.).

Эффективность депрессирующего действия исследованных реагентов определяли по выходу концентрата γ, извлечению меди ε_{Cu} и никеля ε_{Ni} в концентрат; содержанию в концентрате этих металлов (соответственно β_{Cu} и β_{Ni}), а также магния β_{Mg}; критерию Ханкока–Луйкена (ХЛ), учитывающего значения ε, γ, а также содержание меди и никеля в исходной руде α:

$$ХЛ = \frac{\varepsilon - \gamma}{100 - \alpha}. \quad (1)$$

В качестве полимерных депрессоров МС применяли лабораторные образцы ПСС натрия линейного строения, ранее не применявшиеся при флотации руд. Свойства исследованных образцов ПСС представлены в табл. 1. Для сравнения с ними в качестве полимерного депрессора применяли карбоксиметилированную целлюлозу производства ЗАО «Полицелл» ПАЦ-Н со средневязкостной молекулярной массой порядка 116 000 г/моль и степенью замещения 90 %.

В качестве собирателей применяли бутиловый ксантогенат калия (БКК) и дибутилдитиофосфат (БТФ). Для повышения эффективности депрессирующего действия полимерных реагентов применяли $MgCl_2$, так как катион Mg^{2+} согласно [20] способствует депрессии талька с применением ПСС.

Результаты и их обсуждение

При флотации руды без депрессоров, с применением БКК и БТФ наибольшие значения извлечения меди и никеля были достигнуты при расходах БКК – 112 г/т, БТФ – 84 г/т и составили соответственно 89,6 и 85,5 %. Эту композицию реагентов применяли в дальнейших опытах.

Депрессирующее действие полистиролсульфонатов на МС изучали на примере действия Л-50 в сравнении с ПАЦ-Н (рис. 1).

Таблица 1

Свойства исследованных полистиролсульфонатов

Условное обозначение реагента	Средневязкостная молекулярная масса (ММ), г/моль	Регулятор роста цепи; концентрация, моль/л
Л-50	97 000	Изопропанол; 0,3
Л-51	89 000	Изопропанол; 0,9
Л-54	89 000	Глицин, 0,9
Л-55	96 000	Глицин, 0,9
Л-5	93 000	Триметиламин; 0,008
Л-6	208 000	Триметиламин; 0,041
Л-7	176 000	Триметиламин; 0,082

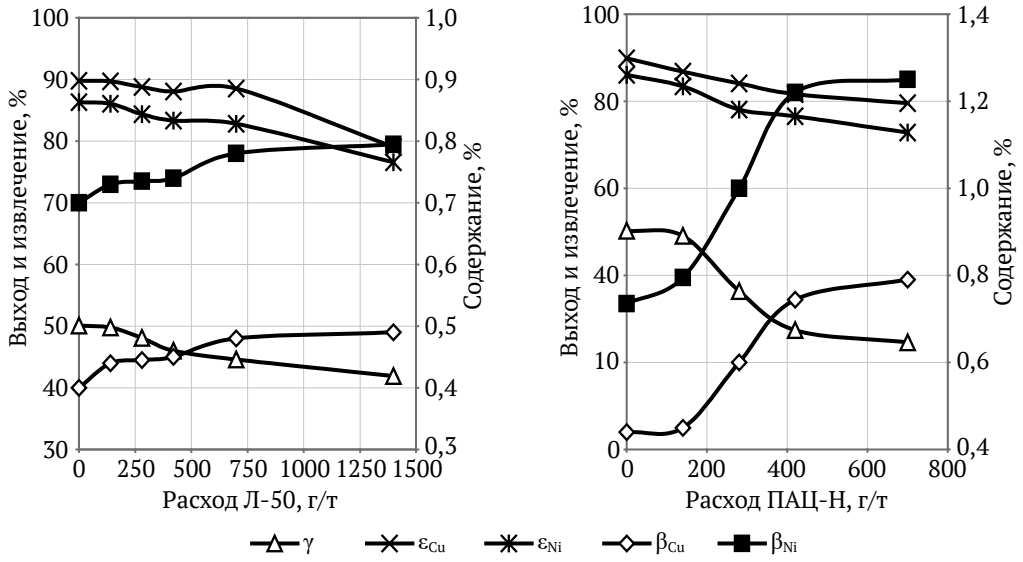


Рис. 1. Влияние расхода депрессоров на флотацию руды: *а* – Л-50; *б* – ПАЦ-Н

На рис. 1, *а* можно видеть, что оптимальный расход депрессора Л-50 –700 г/т. При этом расходе выход концентрата снижается с 49,8 до 44,6 %. При этом извлечение меди падает с 89,7 до 88,5 %, никеля – с 86,1 до 82,8 %. Дальнейшее повышение расхода депрессора приводит к значительному снижению извлечения металлов в концентрат. Так, при расходе Л-50 1400 г/т извлечение меди в концентрат составило 79 %, никеля – 76,6 %.

Из данных, представленных на рис. 1, *б*, следует, что эффективные результаты получены при расходе ПАЦ-Н 420 г/т. При таком режиме флотации извлечение меди составило 81,7 %, никеля 76,6 % при повышении содержания в концентрате: меди с 0,4 до 0,74 %, никеля – с 0,7 до 1,22 %.

Анализ эффективности обогащения при использовании различных депрессоров в соответствии с критерием Ханкока–Луйкена показал (рис. 2), что максимальное значение ХЛ как по меди, так и по никелю достигается при расходах Л-50 и ПАЦ-Н соответственно 700 и 420 г/т.

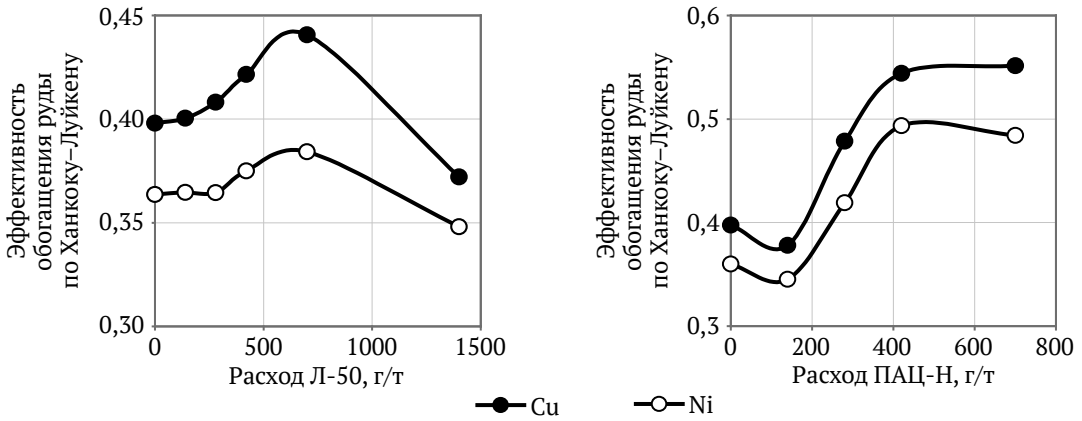
Таким образом, оптимальными расходами депрессоров приняты значения для Л-50 – 700 г/т и для ПАЦ-Н – 420 г/т, соответствующие относительно невысоким потерям металлов при флотации. Эти значения и были приняты для дальнейших исследований по определению наиболее эффективных режимов применения названных реагентов.

По данным ряда работ, например [20], эффективность депрессирующего действия полимерных реагентов на МС увеличивается в случае предварительного добавления многозарядных катионов, в частности Mg^{2+}. Поэтому в настоящей работе исследовали влияние добавления этого катиона на действие ПСС и ПАЦ-Н.

Результаты опытов с применением Л-50 и предварительным добавлением $MgCl_2$ с расходом от 0 до 70 г/т показали, что наименьшее значение выхода коллективного концентрата достигается при расходе $MgCl_2$ 7 г/т за счет снижения флотируемости породных минералов вследствие гидрофилизации их поверхности. Это обеспечивает снижение содержания магния в концентрате примерно на 2,0 % по сравнению с режимом без применения депрессоров.

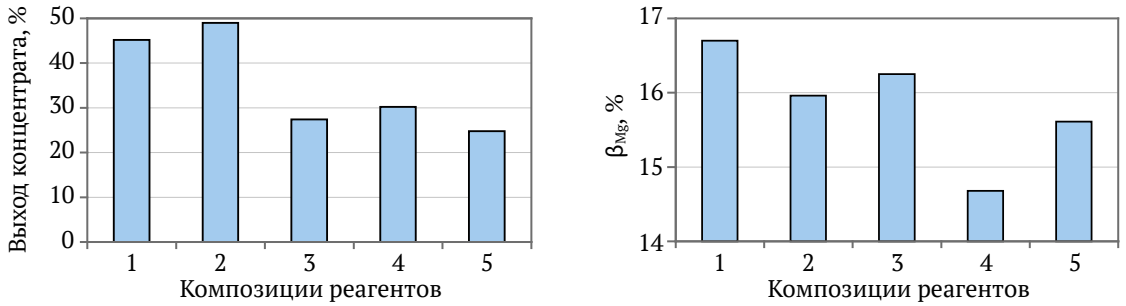
На рис. 3, 4 представлены данные, характеризующие флотацию руды с композициями исследованных депрессоров: 1 – без депрессоров; 2 – Л-50, 700 г/т; 3 – ПАЦ-Н, 420 г/т; 4 – $MgCl_2$, 7 г/т +Л-50, 700 г/т; 5 – $MgCl_2$, 7 г/т +ПАЦ-Н, 420 г/т.

Данные рис. 3, *а* показывают, что наименьшие значения γ, составляющие примерно 27 и 25 %, достигаются применением соответственно ПАЦ-Н и $MgCl_2$ в сочетании с ПАЦ-Н, что указывает на высокую депрессирующую способность последнего. В то же время Л-50 в случае его индивидуального применения даже несколько увеличивает значение γ, что может быть связано с проявлением некоторой флокулирующей способности этого реагента.



а *б*

Рис. 2. Влияние расхода депрессоров на эффективность обогащения руды по Ханкоку–Луйкену: *а* – Л-50; *б* – ПАЦ-Н



а *б*

Рис. 3. Влияние композиций депрессоров: *а* – на выход концентрата; *б* – на содержание магния в концентрате

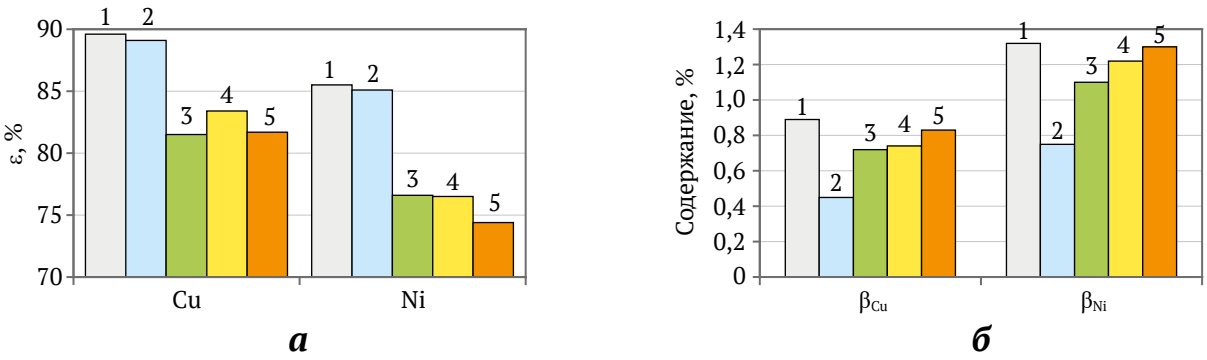


Рис. 4. Влияние композиций депрессоров:
а – на извлечение меди и никеля в концентрат; *б* – на содержание меди и никеля в концентрате

В случае предварительного добавления $MgCl_2$ для Л-50 значение γ уменьшается с 49 до 30 %, а для ПАЦ-Н – с 27 до 25 %. Очевидно, что разница в значениях γ с применением $MgCl_2$ и полимерного реагента по сравнению с индивидуальным применением последнего для Л-50 составляет 19 % против 2 % для ПАЦ-Н. Это, по-видимому, обусловлено тем, что сульфогруппы Л-50 притягиваются к поверхности минералов, модифицированных ионами Mg^{2+}, сильнее, чем карбоксильные группы ПАЦ-Н.

На рис. 3, *б* видно, что композиция № 4 ($MgCl_2$ и Л-50) обеспечивает наименьшее содержание магния в концентрате: 14,7 против 16,7 % для № 1 (без депрессоров) и 15,6 % для № 5 ($MgCl_2$ и ПАЦ-Н). В целом содержание магния в концентрате снижается примерно на 2 %.

На рис. 4, *а* заметна тенденция к снижению значений извлечения ε с применением депрессоров. При этом Л-50 снижает извлечение в меньшей степени по сравнению с ПАЦ-Н, что видно из сравнения композиций №№ 2, 3 и №№ 4, 5: в случае индивидуального применения депрессоров Л-50 снижает извлечение меди и никеля по сравнению с опытом без депрессоров соответственно на 0,5 и 0,4 % против соответственно 8,1 и 8,9 % для ПАЦ-Н при его эффективном расходе. При предварительном добавлении $MgCl_2$ для Л-50 извлечение меди и никеля по сравнению с опытом без депрессоров снижается соответственно на 6,2 и 9,0 %; для ПАЦ-Н – соответственно на 7,9 и 11,1 %. Данные на рис. 4, *б* показывают, что меньше всего снижается β в случае применения $MgCl_2$ и ПАЦ-Н.

Таким образом, Л-50 оказывает действие на МС только в присутствии $MgCl_2$ и при этом по сравнению с ПАЦ-Н характеризуется меньшей эффективностью депрессии. Сравнительный анализ механизмов взаимодействия ПСС и ПАЦ-Н с поверхностью МС с учётом литературных данных показал, что для макромолекул ПСС линейного строения, характеризующихся меньшим значением длины сегмента Куна (4 нм против примерно 20 нм), и, следовательно, более высокой гибкостью по сравнению с ПАЦ-Н, некоторые из анионоактивных групп отдалены от поверхности, или экранированы, и поэтому не участвуют в формировании заряда поверхности. В отличие от ПСС, макромолекула ПАЦ-Н имеет волнообразную, близкую к плоской, форму и расположена вдоль поверхности минерала [24], в результате большая часть анионоактивных групп участвует в формировании заряда поверхности. Также в макромолекуле ПАЦ-Н, в отличие от ПСС, есть атомы водорода, способные к образованию водородных связей с электроотрицательными атомами на поверхности МС. Это, предположительно, обусловливает более слабое влияние ПСС на эти минералы по сравнению с КМЦ.

В то же время полисахариды, в отличие от ПСС, образуют хелатные комплексные соединения с медью и никелем [25, 26], и это обусловливает более низкое извлечение в концентрат указанных металлов для ПАЦ-Н по сравнению с Л-50.

Также было установлено, что между значениями содержания кремния и магния как в концентрате, так и в хвостах существует корреляция с весьма высокими значениями коэффициента детерминации δ, как это видно на рис. 5; это подтверждает, что магний сосредоточен преимущественно в силикатных минералах.

Попытки использования для депрессии МС других образцов ПСС, отличающихся от Л-50 значениями ММ, а также реагентами для регулирования роста цепи, показали весьма близкие значения извлечения и содержания в коллективном концентрате:

– по Cu – соответственно 85,7–87,0 и 0,48–0,59 %;
– по Ni – соответственно 75,2–80,4 и 0,74–0,90 %.

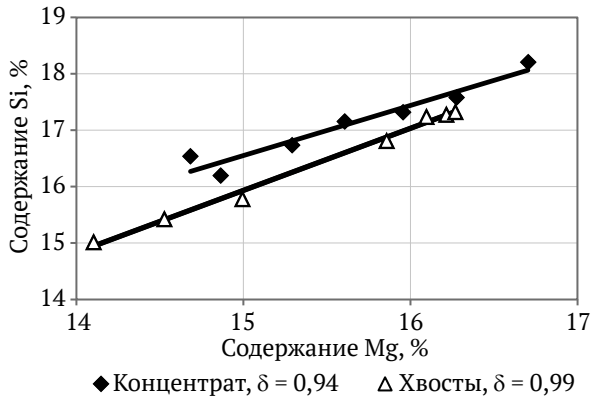


Рис. 5. Корреляционная зависимость между содержанием кремния и магния в продуктах флотации

Анализ зависимостей значений γ, а также ε и β для меди и никеля от ММ указанных образцов ПСС показал, что значение коэффициента детерминации δ не превышает 0,21; это свидетельствует о том, что значение ММ в интервале от 89 000 до 208 000 г/моль практически не влияет на результаты флотации руды с перечисленными образцами ПСС. Также не оказывали влияния и реагенты, применявшиеся для регулирования роста цепи в процессе полимеризации ПСС (изопропанол, глицин, триметиламин, см. табл. 1).

Практическое применение

На основании полученных экспериментальных данных применение ПСС рекомендуется при флотации медно-никелевых руд с высоким содержанием магния в тех случаях, когда требуется достигнуть максимально возможного снижения содержания этого элемента в коллективном концентрате без существенного снижения извлечения меди и никеля, особенно тогда, когда применение полисахаридных депрессоров не позволяет существенно снизить содержание магния в концентрате и (или) имеет место значительное снижение извлечения металлов. Расход ПСС – несколько сотен грамм на тонну; определяется экспериментально для конкретной руды. Целесообразно перед подачей ПСС предусматривать добавление водных растворов соединений магния так, чтобы расход ионов Mg^{2+} составлял бы порядка 5–10 г/т. При этом ожидаемые значения снижения извлечения меди и никеля в коллективный концентрат будут меньше по сравнению с КМЦ. Это позволит получить экономический эффект за счёт снижения энергозатрат на последующую пирометаллургическую переработку концентрата.

Также представляется целесообразным проведение отдельных исследований с образцами ПСС линейного строения, имеющими ММ свыше 1 млн г/моль.

Выводы

На основании экспериментальных исследований по коллективной флотации медно-никелевой руды с применением полистиролсульфоната натрия и карбоксиметилцеллюлозы марки ПАЦ-Н получены новые научные знания о влиянии расхода и свойств полистиролсульфонатов на показатели флотации.

1. Установлено, что с точки зрения снижения выхода концентрата полистиролсульфонат оказывает в целом более слабое депрессирующее действие на магнийсодержащие силикаты, чем ПАЦ-Н. Однако при использовании полистиролсульфоната содержание магния в концентрате примерно на 1 % ниже по сравнению с ПАЦ-Н, что снижает энергозатраты при последующей пирометаллургической переработке концентрата. Также полистиролсульфонат обеспечивает более высокое извлечение меди (до 7 %) и никеля (до 8 %) в концентрат, чем в случае применения ПАЦ-Н, так как не образует хелатные комплексы с указанными металлами, в отличие от полисахаридов.

2. Установлено, что наиболее эффективная депрессия МС достигается последовательным применением хлорида магния с расходом 7 г/т и полистиролсульфоната с расходом 700 г/т. При этом содержание магния в концентрате снижается на 2 % по сравнению с флотацией без депрессоров, что обосновывает целесообразность применения указанной композиции.

3. Установлено, что для образцов полистиролсульфонатов значение молекулярной массы в диапазоне от 89 000 до 208 000 г/моль, а также реагенты, применявшиеся в процессе синтеза для регулирования роста цепи, практически не оказывают влияния на результаты флотации.

4. Показано, что практическое применение ПСС целесообразно при флотации медно-никелевых руд с высоким содержанием магния в тех случаях, когда требуется достигнуть максимально возможного снижения содержания этого элемента в концентрате без существенного снижения извлечения меди и никеля.

Список литературы / References

1. Боярко Г.Ю., Лаптева А.М., Болсуновская Л.М. Минерально-сырьевая база меди России: состояние, возможности развития. *Горные науки и технологии*. 2024;9(4):352–386. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-248
Boyarko G.Yu., Lapteva A.M., Bolsunovskaya L.M. Mineral resource base of Russia's copper: current state and development prospects. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(4):352–386. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-05-248
2. Светлов А.В., Красавцева Е.А., Горячев А.А., Поторочин Е.О. Проблема переработки бедных руд и техногенных отходов, снижение негативного влияния на окружающую среду от деятельности предприятий горнопромышленного комплекса. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2020;12(3):21–33. https://doi.org/10.37614/2307-5228.2020.12.3.003
Svetlov A.V., Krasavtseva E.A., Goryachev A.A., Potorochin E.O. The challenge in mineral processing for low-grade ores and man-made waste: how to reduce the negative environmental impact from the mining industry? *Bulletin of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2020;12(3):21–33. https://doi.org/10.37614/2307-5228.2020.12.3.003
3. Гань Ф., Гао Л., Дай Х. и др. Разработка технологии обогащения бедной медно-никелевой руды. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023;(5):140–151. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230515 (Перев. вер.: Gan F., Gao L., Dai H., et al. Study on beneficiation technology for rational utilization of low-grade copper nickel symbiotic ore. *Journal of Mining Science*. 2023;59(5):828–839. https://doi.org/10.1134/S1062739123050150)
Gan F., Gao L., Dai H., et al. Study on beneficiation technology for rational utilization of low-grade copper nickel symbiotic ore. *Journal of Mining Science*. 2023;59(5):828–839. https://doi.org/10.1134/

S1062739123050150 (Orig. ver.: Gan F., Gao L., Dai H., et al. Study on beneficiation technology for rational utilization of low-grade copper nickel symbiotic ore. *Fiziko-Texhnicheskiye Problemy Razrabbotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2023;(5):140–151. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230515)

4. Степанова К.Д., Казанцева М.И. Влияние вещественного состава медно-никелевых руд на процессы их обогащения. *Горная промышленность*. 2021;(S5–2):17–23.
Stepanova K.D., Kazantseva M.I. Impact of material composition of copper-nickel ores on their processing. *Mining Industry Journal*. 2021;(S5–2):17–23. (In Russ.)
5. Xie J., Sun W., Zhao K., et al. Upgrading of talc-bearing copper-nickel sulfide ore by froth flotation using sodium phytate as depressant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024;687:133561. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133561
6. Zhao K., Yan W., Wang X., et al. Effect of a novel phosphate on the flotation of serpentine-containing copper-nickel sulfide ore. *Minerals Engineering*. 2020;150:106276. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106276
7. Yin F., Zhang Ch., Yu Y., et al. Review on the challenges of magnesium removal in nickel sulfide ore flotation and advances in serpentinite depressor. *Minerals*. 2024;14(10):965. https://doi.org/10.3390/min14100965
8. Dikmen S., Ersoy B., Dikmen Z. Adsorption behaviour of ionic and non-ionic surfactants onto talc a naturally hydrophobic mineral-a comparative study. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering*. 2020;21:139–152. https://doi.org/10.18038/estubtda.829712
9. Douillard J.M., Zajac J., Malandrini H., Clauss F. Contact angle and film pressure: study of a talc surface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002;255(2):341–351. https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8611
10. Galet L., Goalard C., Dodds J.A. The importance of surface energy in the dispersion behaviour of talc particles in aqueous media. *Powder Technology*. 2009;190(1-2):242–246. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.086
11. Binbin Li, Guofan Zhang, Dezhi Liu, Jianhua Chen. Selective alteration mechanisms of sodium tripolyphosphate towards serpentine: Implications for flotation of pyrite from serpentine. *Journal of Molecular Liquids*. 2022;368(Part A):120687. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120687
12. Красавцева Е.А., Горячев А.А. Обзор способов депрессии талька при флотации медно-никелевых руд. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2019;10(6-1):149–154. https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.020
Krasavtseva E.A., Goryachev A.A. Review of methods of talc depression at the flotation of copper-nickel ores. *Proceedings of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2019;10(6-1):149–154. (In Russ.) https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.020
13. Liao R., Deng J., Lai H., et al. An overview of technologies and selective depressing agents for separating chalcopyrite and talc. *International Journal of Metallurgical & Materials Engineering*. 2018;4:146. https://doi.org/10.15344/2455-2372/2018/146
14. Huang R., Liu J., Yang D., et al. Depression effect of CMC on sulfide ore flotation and its influencing factors. *Chinese Journal of Engineering*. 2024;46(4):627–636. (In Chinese) https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.02.28.006
15. Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Лусинян О.Г., Гольберг Г.Ю. Применение отечественных полимерных анионоактивных депрессоров при флотации забалансовой отальковaнной медно-никелевой руды. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(5):5–14. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-5-14
Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Lusinyan O.G., Golberg G.Yu. Utilizing Russian polymer anion active depressants in the flotation of out-of-balance talcose copper nickel ore. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(5):5–14. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-5-14
16. Xue J., Tu H., Shi J., et al. Enhanced inhibition of talc flotation using acidified sodium silicate and sodium carboxymethyl cellulose as the combined inhibitor. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2023;30(7):1310–1319. https://doi.org/10.1007/s12613-022-2582-5
17. Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Гольберг Г.Ю., Лусинян О.Г. Совместное применение жидкого стекла и полисахаридов при флотации отальковaнных медно-никелевых руд. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(2):5–15. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-5-15
Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Golberg G.Yu., Lusinyan O.G. Joint use of sodium silicate and polysaccharides in the flotation of talcose copper-nickel ores. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2024;(2):5–15. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-5-15
18. Fu Y., Zhu Zh., Yao J., et al. Improved depression of talc in chalcopyrite flotation using a novel depressant combination of calcium ions and sodium lignosulfonate. *Colloids and Surfaces A*. 2018;558:88–94. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.08.056
19. Mai Q., Zhou H., Ou L. Flotation separation of chalcopyrite and talc using calcium ions and calcium lignosulfonate as a combined depressant. *Metals*. 2021;11(4):651. https://doi.org/10.3390/met11040651
20. Лавриненко А.А., Кузнецова И.Н., Гольберг Г.Ю. Депрессия флотоактивных силикатов с применением полимерных анионоактивных реагентов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;(6):160–167. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240617 (Перев. вер.: Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Gol'berg G.Yu. Depression of flotation-sensitive silicates using polymeric anion active reagents. *Journal of Mining Science*. 2024;60(6):1022–1028. https://doi.org/10.1134/S1062739124060176)
Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Gol'berg G.Yu. Depression of flotation-sensitive silicates using polymeric anion active reagents. *Journal of Mining Science*. 2024;60(6):1022–1028. https://doi.org/10.1134/

S1062739124060176 (Orig. ver.: Lavrinenko A.A., Kuznetsova I.N., Gol'berg G.Yu. Depression of flotation-sensitive silicates using polymeric anion active reagents. *Fiziko-Texhnicheskiye Problemy Razrabbotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2024;(6):160–167. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240617)

21. Molifie A., Becker M., Geldenhuys S., McFadzean B. Investigating the reasons for the improvement in flotation grade and recovery of an altered PGE ore when using sodium silicate. *Minerals Engineering*. 2023;195:108024. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108024
22. Cao J., Tian X., Luo Y., Hu X. The effect of graphene oxide on the slime coatings of serpentine in the flotation of pentlandite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017;522:621–627. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.03.043
23. Feng B., Lu Y., Feng Q., et al. Mechanisms of surface charge development of serpentine mineral. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013;23(4):1123–1128. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62574-1
24. Wang J., Somasundaran P. Adsorption and conformation of carboxymethyl cellulose at solid-liquid interfaces using spectroscopic, AFM and allied techniques. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2005;291(1):75–83. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.04.095
25. El-Saied H., Basta A.H., Hanna A.A., El-Sayed A.M. Semiconductor properties of carboxymethyl cellulose-copper complexes. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 1999;38(5):1095–1105. https://doi.org/10.1080/03602559909351633
26. Hosny W.M., Abdel Hadi A.K., El-Saied H., Basta A.H. Metal chelates with some cellulose derivatives. Part III. Synthesis and structural chemistry of nickel (II) and copper (II) complexes with carboxymethyl cellulose. *Polymer International*. 1995;37(2):93–96. https://doi.org/10.1002/pi.1995.210370202

Информация об авторах

Анатолий Афанасьевич Лавриненко – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-7955-5273; e-mail lavrin_a@mail.ru

Григорий Юрьевич Гольберг – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-7968-3144, Scopus ID 41761734500; e-mail gr_yu_g@mail.ru

Ирина Николаевна Кузнецова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-5980-8472, Scopus ID 57201564209; e-mail iren-kuznetsova@mail.ru

Оганес Георгиевич Лусинян – кандидат технических наук, ведущий инженер, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-5655-1747, Scopus ID 57201648662; e-mail lusinyan.oganes@yandex.ru

Владимир Аркадьевич Тверской – доктор химических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0003-4348-8854, Scopus ID 6604012434, ResearcherID H-8042-2017; e-mail tverskoj@mirea.ru

Information about the authors

Anatoly A. Lavrinenko – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-7955-5273; e-mail lavrin_a@mail.ru

Grigory Yu. Golberg – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-7968-3144, Scopus ID 41761734500; e-mail gr_yu_g@mail.ru

Irina N. Kuznetsova – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-5980-8472, Scopus ID 57201564209; e-mail iren-kuznetsova@mail.ru

Oganes G. Lusinyan – Cand. Sci. (Eng.), Lead Engineer, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-5655-1747, Scopus ID 57201648662; e-mail lusinyan.oganes@yandex.ru

Vladimir A. Tverskoy – Dr. Sci. (Chem.), Professor, MIREA – Russian Technological University, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0003-4348-8854, Scopus ID 6604012434, ResearcherID H-8042-2017; e-mail tverskoj@mirea.ru

Поступила в редакцию	11.06.2025	**Received**	11.06.2025
Поступила после рецензирования	15.07.2025	**Revised**	15.07.2025
Принята к публикации	17.07.2025	**Accepted**	17.07.2025

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-03-401
УДК 622.45

Исследование надежности шахтных вентиляторов на основе теории марковских процессов

П.В. Вяткин[1], **Н.Г. Валиев**[2], **Д.И. Симисинов**[2] ✉, **Е.Б. Волков**[2]
[1] *АО «АМЗ «Вентпром», г. Артемовский, Российская Федерация*
[2] *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация*
✉ *7sinov@m.ursmu.ru*

Аннотация
Важнейшую роль в аэрологических системах играет безотказность шахтных вентиляторных установок, надежность которых определяется комплексом различных геологических, горнотехнологических и конструктивных факторов, преимущественно стохастического характера. Задача определения количественных показателей надежности шахтных вентиляторных установок решается с применением различных математических методов моделирования случайных процессов. В работе рассматривается возможность использования теории марковских процессов для разработки методики расчета эксплуатационной надежности шахтных вентиляторных установок на примере вентилятора шахтного центробежного главного проветривания ВШЦ-16. Показана ограниченность применимости марковских процессов к анализу теории надежности по условию стохастической независимости отказов. Использование модели однородных марковских процессов имеет свои границы, т.к. интенсивности переходов между отдельными состояниями системы далеко не всегда являются постоянными величинами. В этом случае невозможно составить систему дифференциальных уравнений с зависящими от времени коэффициентами. При наличии стохастической зависимости в потоках отказов механических систем применение теории марковских процессов возможно, но в этих случаях наилучшим инструментом для анализа надежности является численный метод статистических испытаний Монте-Карло.

Ключевые слова
марковские процессы, техническая система, стохастические процессы, надежность, корреляционный анализ, отказ, вентиляторная установка, вентилятор шахтный главного проветривания

Для цитирования
Vyatkin P.V., Valiev N.G., Simisinov D.I., Volkov E.B. Reliability analysis of mine ventilation fans based on Markov process theory. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):289–297. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-03-401

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research paper

Reliability analysis of mine ventilation fans based on Markov process theory

P.V. Vyatkin[1], **N.G. Valiev**[2], **D.I. Simisinov**[2] ✉, **E.B. Volkov**[2]
[1] *AMZ Ventprom JSC, Artyomovsky, Russian Federation*
[2] *Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation*
✉ *7sinov@m.ursmu.ru*

Abstract
The reliability of mine ventilation fans plays a crucial role in aerological systems and is determined by a combination of various geological, mining-technological, and structural factors, most of which are stochastic in nature. The problem of quantifying the reliability indicators of mine fan installations is addressed using various mathematical methods for modeling random processes. This study considers the possibility of applying Markov process theory to develop a methodology for calculating the operational reliability of centrifugal main mine ventilation fans, using the VShTs-16 as an example. The limitations of applying Markov processes to reliability analysis are demonstrated, particularly due to the condition of stochastic independence of failures. The use of homogeneous Markov processes has its constraints, since the transition intensities between individual system states are not always constant. In such cases, it is impossible to construct a system of

© Вяткин П. В., Валиев Н. Г., Симисинов Д. И., Волков Е. Б., 2025

differential equations with time-dependent coefficients. When stochastic dependence is present in failure flows of mechanical systems, the application of Markov process theory remains possible, but the most effective tool for reliability analysis in such cases is the Monte Carlo numerical simulation method.

Keywords
Markov processes, technical system, stochastic processes, reliability, correlation analysis, failure, ventilation fans, main mine ventilation fan

For citation
Vyatkin P.V., Valiev N.G., Simisinov D.I., Volkov E.B. Reliability analysis of mine ventilation fans based on Markov process theory. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):289–297. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-03-401

Введение

Аэрологические факторы риска при подземной добыче полезных ископаемых по данным Ростехнадзора остаются на высоком уровне. При переходе предприятий на подземную разработку в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях и увеличении глубины производства горных работ на действующих рудниках требования к эффективности вентиляционно-дегазационных систем возрастают [1–3]. Важнейшую роль в аэрологических системах играет безотказность шахтных вентиляторных установок.

Надежность шахтных вентиляторных установок определяется комплексом различных геологических, горнотехнологических и конструктивных факторов преимущественно стохастического характера [4, 5].

Задача определения количественных показателей надежности шахтных вентиляторных установок решается с применением различных математических методов моделирования случайных процессов. Впервые основные понятия и показатели надежности ШВС были предложены в следующих методах: метод функции состояния, метод критических путей, статистический метод и метод статистического моделирования [6, 7], нечеткой логики [8].

Математический аппарат теории надежности достаточно многообразен, но ведущее положение в нем, несомненно, занимают математическая статистика, теория вероятностей и теория случайных процессов. Концепция надежности сложных технических систем обусловила широкое применение в качестве математического метода теории марковских процессов. Подобный подход успешно используется при анализе работоспособности сложных электронных устройств и систем [9, 10]. Следует отметить, что и сама теория надежности как общетехническая дисциплина сформировалась прежде всего под влиянием развития радиоэлектроники, вычислительной и ракетной техники, хотя впервые вопросы надежности были поставлены в 1930-е годы специалистами в области строительной механики и систем энергетики. Именно поэтому самое широкое использование в теории надежности нашли те математические методы, возможности которых удовлетворяли требованиям задач, поставленных вычислительной техникой.

Анализ работоспособности механических систем как второе направление развития общей теории надежности изделий начал формироваться несколько позднее. Математический инструментарий этой области надежности в значительной степени пополнялся за счет методов и теорий, получивших глубокое развитие и нашедших широкое практическое применение в электронике. В некоторых случаях такое заимствование проводилось и проводится без учета специфики исследуемых объектов, без достаточно основательного анализа физики отказов. Сказанное можно с успехом отнести и к анализу надежности механических систем с помощью теории марковских процессов. В работах [11–13] авторы используют теорию марковских процессов при разработке методик инженерных расчетов показателей надежности конкретных изделий машиностроения и технологических процессов их производства.

Теория

По определению [14] марковским процессом называется случайный процесс $\xi(t)$, $t \geqslant t_0$, обладающий свойством

$$p(s, x, t, B) = P\{f(s, x, t) \in B\}, B \subseteq R^1, t \geqslant S,$$

при условии

$$\xi(s_1) = x_1, \ldots, \xi(s_m) = x_m, \xi(s) = x,$$

независимо от $x_1, x_2, \ldots x_m$.

Это свойство, называемое марковским свойством случайного процесса, выражает независимость поведения процесса $\xi(t)$, $t \geqslant s$ в «будущем» от его «прошлого» до момента s при фиксированном (известном) «текущем» состоянии $\xi(s) = x$. Условные вероятности

$$p(s, x, t, B) = P\{\xi(t) \in B|\xi(s) = x\},$$

называемые переходными вероятностями марковского процесса, задают вероятности перехода процесса из исходного состояния $\xi(s) = x$ в то или иное состояние $\xi(s) \in B$ из множества $B \subseteq R^1$. Соответствующая плотность $p(s, x, t, y)$, $-\infty < y < +\infty$ называется переходной плотностью. Соответственно, состояния безотказной работы и отказа шахтных вентиляторных установок могут быть описаны указанными переходными вероятностями.

Используемые при анализе надежности сложных технических систем методы теории массового обслуживания предполагают, как правило, изучение стационарных режимов работы простейших эргодических систем [15, 16]. Все потоки отказов, переводящие такую систему из работоспособного в неработоспособное состояние, являются простейшими и, следовательно, предусматривают статистическую независимость составляющих случайных событий.

Таким образом, исследование статистической независимости потока отказов является необходимым условием при анализе вопроса о применимости дискретных марковских процессов с непрерывным временем для оценки надежности шахтных вентиляторных установок как объектов сложных технических систем.

Из теории вероятностей по определению случайные величины $\xi_1, \ldots, \xi_n$ называются независимыми, если порожденные ими алгебры $A_{\xi_1}, \ldots, A_{\xi_n}$ независимы. Поскольку каждая из алгебр A_{ξ_i} состоит из событий вида $\{\xi_i = B\}$, $B \subseteq R^1$, то приведенное определение эквивалентно следующему: случайные величины независимы, если для любых числовых множеств B_i

$$P\{\xi_1 \in B_1, \ldots, \xi_n \in B_n\} = \prod_{i=1}^{n} P\{\xi_i \in B_i\}.$$

На основании известной теоремы теории вероятностей следует, что независимость алгебр $A_{\xi_1}, \ldots, A_{\xi_n}$ равносильна независимости порождающих их разбиений $\alpha_{\xi_1}, \ldots, \alpha_{\xi_n}$. Это приводит еще к одному эквивалентному определению независимости: случайные величины $\xi_1, \ldots, \xi_n$ независимы, если для любых $x_{1j_1}, \ldots, x_{nj_n}$

$$P\{\xi_1 = x_{1j_1}, \ldots, \xi_m = x_{nj_n}\} = \prod_{i=1}^{n} P\{\xi_i = x_{ij_i}\}.$$

Согласно определению ковариация (корреляционный момент) случайных величин ξ и η равна

$$\operatorname{cov}(\xi, \eta) = \mu_{\xi_n} = M(\xi - M(\xi))(\eta - M(\eta)), \qquad (1)$$

в частности, непосредственно из этого определения следует, что $\operatorname{cov}(\xi, \eta) = M(\xi\eta) - M(\xi)M(\eta)$. Тогда выражение (1) можно записать как

$$\operatorname{cov}(\xi, \eta) = \int\int (x - M(\xi))(y - M(\eta))\, dF(x, y),$$

где $F(x, y)$ – функция распределения двумерной случайной величины (ξ, η). В частности, если эта случайная величина обладает плотностью $p(x, y)$, то

$$\operatorname{cov}(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} (x - M(\xi))(y - M(\eta))p(x, y)\, dxdy.$$

Ковариацию используют в качестве меры зависимости случайных величин, что оправдывается известным в теории вероятностей равенством $\operatorname{cov}(\xi, \eta) = 0$ для независимых случайных величин ξ и η с конечными дисперсиями. Отметим, что величина ковариации ξ и η зависит от выбора единиц измерения этих величин, поэтому использовать эту характеристику не всегда удобно. От такого недостатка свободна характеристика, называемая коэффициентом корреляции. По определению, коэффициентом корреляции случайных величин ξ и η называется отношение их ковариации к произведению их средних квадратичных отклонений:

$$\rho_{\xi\eta} = \frac{\operatorname{cov}(\xi, \eta)}{\sigma_\xi \sigma_\eta}.$$

Условия работы шахтных вентиляторных установок приводят как к зависимым, так и независимым отказам. К примеру, отказы типа «люфт рабочего колеса на валу», «износ опорных подшипников» будут зависимыми. Независимыми – «износ опорных подшипников» и отказ системы управления электродвигателем. Указанные события, приводящие к отказам, оценим случайными величинами ξ и η. Очевидно, что коэффициент корреляции независимых случайных величин ξ и η равен нулю, т.е. $\rho_{\xi\eta} = 0$, если ξ и η независимы. Случайные величины ξ и η называются некоррелированными, если их коэффициент корреляции $\rho_{\xi\eta} = 0$. Таким образом, из независимости следует некоррелированность. Утверждение, обратное данному свойству в широком смысле, т.е. в условиях известности только вторых моментов случайных величин, неверно, т.е. если $\operatorname{cov}(\xi, \eta) = 0$, то величины и ξ и η не обязательно независимы.

Рассмотрим пример таких величин.

Пусть ξ – случайная величина с конечным $M(\xi^3)$, обладающая симметричной относительно точки $x = 0$ плотностью $\rho(x)$, т.е. $\rho(-x) = \rho(x)$. Обозначим $\eta = \xi^2$. Тогда

$$M(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\rho(x)dx = 0$$

в силу четности функции $\rho(x)$. Поэтому также на основании четности $\rho(x)$

$$\operatorname{cov}(\xi, \eta) = M(\xi)(\eta - M(\eta)) = M(\xi\eta) = M(\xi)M(\eta) =$$
$$= M(\xi^3) - 0M(\eta) = M(\xi^3) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^3\rho(x)\, dx = 0.$$

В то же время ξ и η зависимы: если x – любое число, для которого $0 < \rho(|\xi| < x) < 1$, то при $y = x^2$

$$\rho(|\xi| < x, \eta < y) = \rho(|\xi| < x, \xi^2 < x^2) =$$
$$= \rho(|\xi| < x) > \rho^2(|\xi| < x) = \rho(|\xi| < x)\rho(\eta < y).$$

Следовательно, некоррелированность случайных событий в потоке не может служить основанием для утверждений о независимости.

Более того, даже для коррелированных случайных величин, имеющих двумерное нормальное распределение, гипотеза о независимости случайных величин x и y в математической статистике [17] проверяется по результатам выборки $(x, y), \ldots, (x_n, y_n)$ объемом n с помощью статистики об отказах шахтных вентиляторных установок

$$t = \frac{r_{xy}}{\sqrt{1 - r_{xy}^2}}\sqrt{n-2},$$

где

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \; –$$

выборочный коэффициент корреляции;

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \; –$$

выборочные средние.

При применении критерия (двустороннего) на уровне значимости α с $m = n - 2$ степенями свободы гипотеза H о независимости случайных вероятностей отказов отвергается, если

$$|t| > t_{m;1-\frac{\alpha}{2}}.$$

Для тех же параметров распределения указанную гипотезу можно проверить, используя критические значения коэффициента корреляции, в этом случае при применении (двустороннего) критерия на уровне значимости α для $m = n - 2$ степеней свободы гипотеза H отвергается, если $|r_{xy}| > r_{m;q}$.

Критические значения коэффициента корреляции определяются по таблицам для $m = n - 2$ и $q = 1 - \alpha/2$.

Методы

На практике проверку стохастической независимости с помощью описанных выражений провести весьма затруднительно. Поэтому чаще всего пользуются другим пояснением, которое, однако, носит чисто качественный характер, а именно случайные величины ξ и η называются независимыми, если случайные механизмы, определяющие распределение ξ и η, протекают независимо друг от друга [9].

Руководствуясь сформулированным выше качественным соображением в ряде случаев для механических систем отказы отдельных элементов нельзя считать независимыми событиями [18]. В качестве примера, подтверждающего это положение, рассмотрим работоспособность узлов вентилятора шахтного центробежного главного проветривания ВШЦ-16.

Вентилятор ВШЦ-16 предназначен для проветривания шахт (рудников) в установке с обводными каналами, работая в режиме нагнетания или всасывания при проходке стволов шахт, в системах отопления и вентиляции, для охлаждения электрических машин и в других промышленных целях. Завод-изготовитель вентилятора – АО «Артемовский машиностроительный завод «ВЕНТПРОМ».

На узлы вентилятора действуют возмущения от воздушного потока, вызванные действием нестационарных аэродинамических сил, возникающих вследствие неравномерности течения потока при взаимодействии с ребрами корпуса, лопатками направляющего и спрямляющего аппаратов [19]. Также следует отметить изменение механической нагрузки на элементы вентилятора, обусловленное как оперативным регулированием подачи воздуха в горные выработки, так и внезапными колебаниями давления при скачкообразных изменениях характеристик внешней вентиляционной сети, связанной с проходами техники и людей через шлюзовые камеры и перемещением сосудов по воздухоподающим стволам [20]. Переходные процессы, происходящие в сложных механических системах, значительно влияют как на технические показатели экономичности установок, так и на показатели надежности функционирования всей системы в целом [21]. Анализ эксплуатационной надежности вентилятора при работе в условиях подземной разработки рудных месторождений полезных ископаемых, проведенный авторами, показал, что нестационарный характер нагружения лопаточных венцов, вызванный внезапными выбросами газа или набегающими волнами давления, образованными проводимыми взрывными работами, обусловливают появление значительного количества отказов типа «люфт рабочего колеса на валу», «износ опорных подшипников».

Подобные отказы приводят к нарушению балансировки ротора, увеличению динамических нагрузок и, следовательно, значительному возрастанию степени износа опорных подшипников. Таким образом, случайные события – отказы «люфт рабочего колеса на валу» и «износ опорных подшипников» – нельзя считать стохастически независимыми. Очевидно, что применение приведённой качественной оценки статистической независимости вносит существенную неопределённость в анализ надёжности механических систем. Однозначное решение вопроса может быть получено только на основании применения четких количественных критериев. В научной и инженерной практике для оценки зависимости случайных величин широко используется корреляционный анализ, описанный в теоретической части статьи.

Таким образом, в случае нормального распределения даже коррелированные случайные величины при использовании указанной гипотезы могут оказаться независимыми.

Отметим, что подобная методика оценки применима лишь к анализу ограниченного числа механических систем, т.к. нормальный закон распределения потока отказов характерен лишь для конструкций, хорошо отработанных на надежность, т.е. с высоким уровнем надежности. Для узлов и механизмов таких изделий наблюдается явное преобладание постепенных, т.е. износных, усталостных, коррозионных и т.д. отказов над внезапными. Большая часть горных машин и шахтных стационарных установок не могут быть отнесены к указанному классу из-за недостаточно высокого технического уровня горного машиностроения и, в особенности, тяжелых условий их эксплуатации и технического обслуживания.

Так, например, для шахтных вентиляторных установок главного проветривания время безотказной работы механических частей приближено к закону Гнеденко–Вейбулла с параметрами $a = 800$, $b = 1{,}31$ и частным случаям этого закона: релеевскому и экспоненциальному с параметром $\omega = 0{,}264$. Для центробежных вентиляторов главного проветривания шахт более справедлив логарифмически-нормальный закон распределения потока отказов [12]. Анализом эксплуатационной надежности вентилятора шахтного центробежного главного проветривания ВШЦ-16, проведенным Артемовским машиностроительным заводом, установлено, что вероятность безотказной работы этих агрегатов на Сибайском и Учалинском горно-обогатительных комбинатах хорошо согласуется по критерию Мизеса $\omega^2 = 2{,}38–3{,}64$ и с экспоненциальным законом распределения $\omega^2 = 0{,}466–0{,}747 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, статистическая оценка стохастической независимости в потоках отказов горных машин и шахтных стационарных установок с помощью вы-

борочных коэффициентов корреляции в большинстве случаев оказывается невозможной, для них можно применять критерии непараметрической статистики критерия точной вероятности Фишера и χ^2. Помимо основного достоинства – возможности применения при любых законах распределения, методы непараметрической статистики в отличие от корреляционного анализа не требуют наличия большого объема априорной информации об отказах, а также могут быть использованы на самых первых (предварительных) стадиях статического анализа надежности.

Анализ рассмотренного выше примера проверки независимости отказов «люфт рабочего колеса на валу» и «износ опорных подшипников», проведенный с помощью критерия независимости χ^2, подтвердил справедливость вывода, сделанного на основании качественной оценки физической картины. Гипотеза H о независимости этих отказов проверялась по таблице сопряженности признаков (табл. 1).

Таблица 1

Сопряженность признаков гипотезы

$j \to i$	$1 \to 2$	h_j
1 **2**	$16 \to 1$ $3 \to 8$	17 11
h_i	$19 \to 9$	28

Статистика для определения критерия в случае размерности матрицы сопряженности признаков 2×2 вычисляется по формуле

$$t = \frac{h(h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})}{h_1 h_2 h_1 h_2} = 13{,}68.$$

Для уровня значимости $\alpha = 0{,}05$ и числа степеней свободы $m = (r - 1)(s - 1) - (2 - 1)(2 - 1) = 1$ табличная величина критического значения χ^2 составляет $\chi^2_{1;\,0{,}95} = 3{,}84$. Так как $t = 13{,}68 > 3{,}84$, гипотезу H следует отвергнуть, т.е. отказы вентилятора шахтного центробежного главного проветривания ВШЦ-16 типа «люфт рабочего колеса на валу» и «износ опорных подшипников» являются стохастически зависимыми событиями.

До сих пор говорилось об ограничении применимости марковских процессов к анализу теории надежности по условию стохастической независимости отказов. Учитывая возможность стохастической зависимости устройств между отказами элементов механических устройств, проф. А.С. Проников предлагает следующую классификацию сложных технических систем с позиции надежности: расчлененные, связанные и комбинированные [18].

К **расчлененным** можно отнести такие сложные технические системы, у которых надежность отдельных элементов может быть заранее определена, т.к. отказ элемента можно рассматривать как независимое событие. Такие системы более характерны для радиоэлектроники, где отдельные элементы, выполненные в виде полупроводниковых приборов, сопротивлений, конденсаторов и т.д., имеют самостоятельные функции и должны обеспечивать значения выходных параметров в определенном диапазоне, независимо от параметров других элементов. Заменой отказавшего элемента полностью восстанавливается работоспособность всей системы.

К **связанным** относятся сложные технические системы, у которых отказ элементов является зависимым событием, связанным с изменением выходных параметров всей системы. Например, надежность работы механической системы, предназначенной для точного перемещения ведомого звена, зависит от износостойкости всех звеньев, передающих движение. Однако износ каждого звена не может быть лимитирован независимо от износа других звеньев, т. к. больший износ одного из них может компенсироваться высокой износостойкостью другого.

К **комбинированным** относятся сложные технические системы, состоящие из подсистем со связанной структурой и с независимостью между подсистемами.

Приведенная (достаточно условная) классификация структур сложных технических систем позволяет определить соответствующие методические подходы для анализа их надежности в целом и применения для этого теории марковских процессов в частности.

Так, для систем с расчлененными структурами ограничение применимости этих методов по условию стохастической зависимости в потоках отказов элементов очевидно несостоятельно. Для механических систем со связанными структурами использование теории марковских процессов ограничено.

Для сложных технических систем с комбинированными структурами марковский подход приемлем с известным приближением лишь для анализа надежности на высшем уровне, т.е. при изучении системы как совокупности подсистем.

Отметим, что все вышесказанное справедливо при анализе надежности функционирования (функциональной надежности), когда под отказом элемента понимается его поломка или выход из строя, приводящий к отказу всей системы, т.е. прекращению ее функционирования.

В смысле параметрической надежности, когда под отказом элемента понимается выход его функциональной характеристики за пределы допустимых значений и тем самым вывод из диапазона допустимых изменений основных параметров системы, использование любых положений, основанных на стохастической независимости исследуемых потоков отказов, недопустимо. Это замечание тем более важно, что для горных машин и шахтных стационарных установок как объектов с огромной материалоемкостью и удельной единичной мощностью значение вопросов стабильности основных параметров в процессе эксплуатации чрезвычайно велико.

Экспериментальные исследования

В качестве примера рассмотрим процесс функционирования системы – вентилятора шахтного центробежного главного проветривания ВШЦ-16 без стохастической зависимости в потоках отказов. Это означает, что вероятность отказа системы не зависит от времени и предыдущих состояний [22]. Предположим, что в течение одних суток система может

находиться в одном из двух состояний: работоспособном – $P_1(t)$ или неработоспособном – $F_1(t)$. Такое представление позволяет упростить анализ работы системы и оценить вероятность перехода из одного состояния в другое.

После сбора данных о переходах системы из одного состояния в другое за промежуток времени t можно представить вероятности этих переходов в виде матрицы:

$$\left\|P_{ij}\right\| = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Предположим, что вероятность безотказной работы в заданное время вентилятора ВШЦ-16 (P_{11}) равна 0,9. Вероятность перехода из состояния отказа (P_{12}) составит 0,1. Вероятность восстановления в заданное время (P_{21}) примем 0,99. Вероятность того, что вентилятор не будет восстановлен (P_{22}), соответственно 0,01. С учётом этих данных матрица (2) будет выглядеть следующим образом:

$$\left\|P_{ij}\right\| = \begin{pmatrix} 0,9 & 0,1 \\ 0,99 & 0,01 \end{pmatrix}.$$

Граф состояний системы, иллюстрирующий возможные переходы между работоспособным и неработоспособным состояниями, представлен на рис. 1.

Зададим вектор начальных вероятностей состояний

$$P(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

тогда для однородной марковской цепи вероятность состояний системы можно определить по формуле:

$$P_i(k) = \sum_{j=1}^{n} P_j(k-1) \cdot P_{ij}, \quad (3)$$

где k – номер шага, мес.

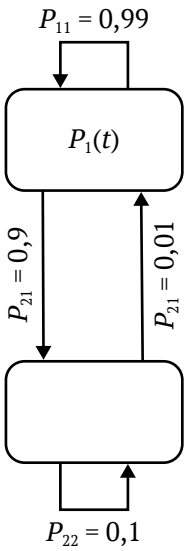


Рис. 1. Граф состояний системы (ВШЦ-16)

Таблица 2

Результаты моделирования

t, мес	$P_1(t)$	$F_1(t)$	t, мес	$P_1(t)$	$F_1(t)$
1	0,99	0,01	6	0,90826	0,09174
2	0,9009	0,099	7	0,90826	0,09174
3	0,9089	0,091	8	0,90826	0,09174
4	0,9081	0,0918	9	0,90826	0,09174
5	0,9082	0,09173	10	0,90826	0,09174

Исходя из выражений (1) и (2) вероятность безотказной работы в первый месяц равна $P_1(1) = P_1(0) \cdot P_{11} + P_2(0) \cdot P_{21} = 0,99$, а вероятность отказа – $P_1(1) = P_1(0) \cdot P_{12} + P_2(0) \cdot P_{22} = 0,01$. На второй месяц вероятность безотказной работы составляет 0,9009, а вероятность отказа – 0,0991. Далее, используя компьютерное моделирование вероятностного процесса, представим полученные данные за несколько циклов (мес) в виде таблицы (табл. 2).

Дискуссия

Анализируя полученные значения, заметим, что использование такого подхода обычно не вызывает принципиальных трудностей, но не учитывает накопительного эффекта отказов при деградации технической системы [23]. Тем не менее провести анализ надёжности системы можно, применив формулу (3), дополнив ее стохастическими коэффициентами $K(t)$, полученными на основе законов распределения показателей надежности от наработки t: $P = f\{P_i(k), K(t)\}$.

В табл. 3 представлены результаты расчёта вероятности нахождения системы (ВШЦ-16) в работоспособном состоянии с учётом коэффициентов, отражающих процесс деградации технической системы. Важно отметить, что в данном расчёте не учитывались частота случайных отказов системы и влияние отказов отдельных элементов на отказ всей системы.

Результаты компьютерного моделирования в графической форме представлены на рис. 2.

Анализируя зависимость (рис. 2, ряд 2), видим, что вероятность нахождения системы в исправном состоянии снижается с увеличением периода эксплуатации и носит нелинейный характер. Таким образом, процесс качественного определения вероятности отказов сводится к уточнению стохастических коэффициентов.

Таблица 3

Результаты моделирования с учетом стохастических коэффициентов $K(t)$

t, мес	$P_1(t)$	t, мес	$P_1(t)$
1	0,98910	6	0,90286
2	0,89910	7	0,90196
3	0,90622	8	0,90106
4	0,90460	9	0,90016
5	0,90376	10	0,89926

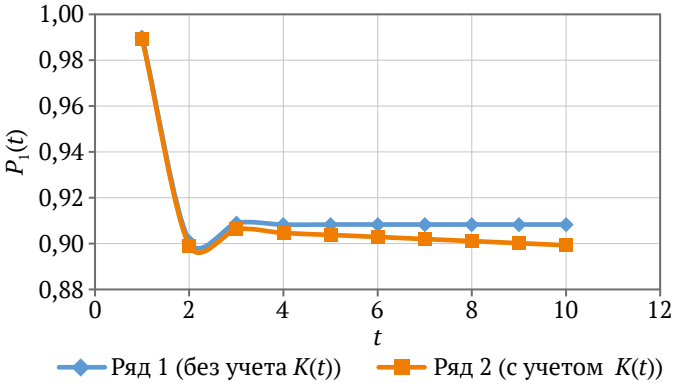


Рис. 2. Зависимость вероятности нахождения ВШЦ-16 в исправном состоянии от периода (сут)

Выводы

Использование модели однородных марковских процессов имеет свои границы, т.к. интенсивности переходов между отдельными состояниями системы далеко не всегда являются постоянными величинами, для случая зависящих от времени интенсивностей переходов расчеты становятся существенно сложнее. Кроме того, все или отдельные интенсивности переходов могут и вовсе не существовать. В этом случае невозможно составить систему дифференциальных уравнений с зависимыми от времени коэффициентами. Примерами таких динамических интенсивностей переходов могут служить в механических системах различные процессы старения.

Анализ эксплуатационной надежности вентилятора шахтного центробежного главного проветривания ВШЦ-16 показал, что вероятность безотказной работы этих агрегатов на Сибайском и Учалинском горно-обогатительных комбинатах хорошо согласуется по критерию Мизеса $\omega^2 = 2{,}38–3{,}64$ и с экспоненциальным законом распределения $\omega^2 = 0{,}466–0{,}747 \cdot 10^{-4}$. Проверка независимости отказов вентиляторов «люфт рабочего колеса на валу» и «износ опорных подшипников», проведенный с помощью критерия независимости χ^2, не подтвердил гипотезу независимости этих отказов, так как вычисленный критерий $t = 13{,}68 > 3{,}84$ (табличного критерия). Таким образом, в рассматриваемом примере доказано, что отказы вентилятора шахтного центробежного главного проветривания ВШЦ-16 являются стохастически зависимыми событиями.

Для учета влияния отказов отдельных элементов на отказ всей системы процесс определения вероятности отказов может сводиться к уточнению стохастических коэффициентов. Подобный подход может стать новой основой для разработки методических принципов системы мониторинга и диагностики технического состояния вентиляционных систем. Кроме того, он может быть использован для создания методических принципов прогнозирования остаточного ресурса действующих вентиляторов на основе мониторинга их технического состояния.

В этом случае для анализа надежности привлекается аппарат теории конечных марковских цепей и полумарковских процессов. При наличии стохастической зависимости в потоках отказов механических систем применение теории марковских процессов возможно, но в этих случаях наилучшим инструментом для анализа надежности является численный метод статистических испытаний Монте-Карло [24].

Список литературы / References

1. Ahaiev R., Prytula D., Kliuiev E., et al. The determination of the influence degree of mining-geological and mining-technical factors on the safety of the degassing system. In: *E3S Web of Conferences. II International Conference Essays of Mining Science and Practice*. 2020;168:00040. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800040
2. Матерова Е.С., Аксенова Ж.А., Никифоров А.А. и др. Потенциал развития горнодобывающего сектора России. *Уголь*. 2024;(12):41–46. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-12-41-46
Materova E.S., Aksenova Zh.A., Nikiforov A.A., et al. Development potential of the mining sector in the Russian Federation. *Ugol'*. 2024;(12):41–46. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-12-41-46
3. Баловцев С.В. Оценка схем вентиляции с учетом горно-геологических и горнотехнологических условий отработки угольных пластов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(6):173–183. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-173-183
Balovtsev S.V. Assessment of ventilation circuits with regard to geological and geotechnical conditions of coal seam mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(6):173–183. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-06-0-173-183
4. Chen Y., Liu R., Liu C., et al. Influence of blade installation angle spanwise distribution on the energy characteristics of mining contra-rotating axial flow fan. *Scientific Reports*. 2025;15(1):6444. https://doi.org/10.1038/s41598-025-90797-4
5. Каледина Н.О., Малашкина В.А. Индикаторная оценка надежности функционирования шахтных вентиляционно-дегазационных систем. *Записки Горного института*. 2021;250:553–561. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.8
Kaledina N.O., Malashkina V.A. Indicator assessment of the reliability of mine ventilation and degassing systems functioning. *Journal of Mining Institute*. 2021;250:553–561. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.8
6. Odeyar P., Apel D.B., Hall R., et al. A review of reliability and fault analysis methods for heavy equipment and their components used in mining. *Energies*. 2022;15(17):6263. https://doi.org/10.3390/en15176263

7. Ушаков В.К. Проблема надежности и эффективности шахтных вентиляционных систем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(4):240–248.
Ushakov V.K. Reliability and efficiency of mine ventilation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(4):240–248. (In Russ.)
8. Кашников А.В., Круглов Ю.В. Определение параметров проветривания рабочей зоны рудника на основе нечеткой логики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(5):68–82. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_5_0_68
Kashnikov A.V., Kruglov Yu.V. Fuzzy logic-based determination of ventilation parameters in active mining areas. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(5):68–82. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_5_0_68
9. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем. М.: Мир; 1979. 452 с. (Ориг. вер.: Reinschke K. *Zuverlässigkeit und verfügbarkeit technischer systeme: theorie – praxis – berechnung*. Berlin: VEB Verlag Technik; 1973. 392 s. (In German))
Reinschke K. *Zuverlässigkeit und verfügbarkeit technischer systeme: theorie – praxis – berechnung*. Berlin: VEB Verlag Technik; 1973. 392 p. (In German) (Trans. ver.: Reinschke K. *Reliability and availability of technical systems: theory – practice – calculation*. Moscow: Mir Publ. House; 1979. 452 p. (In Russ.))
10. Петроченков А.Б., Бочкарёв С.В., Ромодин А.В., Елтышев Д.К. Планирование процесса эксплуатации электротехнического оборудования с использованием теории марковских процессов. *Электротехника*. 2011;(11):20–24.
Petrochenkov A.B., Bochkarev S.V., Romodin A.V., Eltyshev D.K. Planning of electrical equipment operation process using Markov chain theory. *Elektrotekhnika*. 2011;(11):20–24. (In Russ.)
11. Agbinya J.I. Markov Chain and its applications. In: *Applied Data Analytics – Principles and Applications*. 1st ed. New York: River Publishers eBooks; 2022. 15 p. https://doi.org/10.1201/9781003337225-1
12. Ssempijja M.N., Namango S., Ochola J., Mubiru P.K. Application of Markov Chains in manufacturing systems: a review. *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*. 2021;3(1):1–13. https://doi.org/10.22034/ijieor.v3i1.26
13. Wang Y., Xie B., E Sh. Adaptive relevance vector machine combined with Markov-chain-based importance sampling for reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022;220:108287. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108287
14. Розанов Ю.А. *Введение в теорию случайных процессов*. М.: Наука; 1982. 128 с.
Rozanov Yu.A. *Introduction to the theory of random processes*. Moscow: Nauka; 1982. 128 p. (In Russ.)
15. Игнатов В.А., Маньшин Г.Г., Костановский В.В. *Элементы теории оптимального обслуживания технических изделий*. Минск: Наука и техника; 1974. 192 с.
Ignatov V.A., Manshin G.G., Kostanovsky V.V. *Elements of optimal maintenance theory for technical devices*. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1974. 192 p. (In Russ.)
16. Овчаров Л.А. *Прикладные задачи теории массового обслуживания*. М.: Машиностроение; 1969. 324 с.
Ovcharov L. A. *Applied problems of queueing theory*. Moscow: Mashinostroenie; 1969. 324 p. (In Russ.)
17. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике. М.: Финансы и статистика; 1982. 272 с. (Ориг. вер.: Müller P., Neumann P., Storm R. *Tafeln der mathematischen statistik*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften; 1979. 272 s. (In German))
Müller P., Neumann P., Storm R. *Tafeln der mathematischen statistik*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften; 1979. 272 s. (In German) (Trans. ver.: Müller P., Neumann P., Storm R. *Tables of mathematical statistics*. Moscow: Finansy i Statistika; 1982. 272 p. (In Russ.))
18. Проников А.С. *Надежность машин*. М.: Машиностроение; 1978. 592 с.
Pronikov A.S. *Reliability of machines*. Moscow: Mashinostroenie; 1978. 592 p. (In Russ.)
19. Русский Е.Ю. Исследование вибрационной надежности роторов осевых вентиляторов главного проветривания шахт. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2017;2(2):121–125.
Russky E.Yu. Research of vibration reliability of axial fans rotors of the mine main airing. *Interexpo GEO-Siberia*. 2017;2(2):121–125. (In Russ.)
20. Копачев В.Ф. Обоснование срока службы вентиляторов главного проветривания в условиях переменной нагрузки. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020;(6):102–108. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-6-102-108
Kopachev V.F. Rationale for main fans service life in the conditions of changing load. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2020;(6):102–108. (In Russ.) https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-6-102-108
21. Копачев В.Ф., Копачева Е.А. Исследование влияния переходных процессов на технические показатели рудничных систем производства и транспортирования сжатого воздуха. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(1–1):106–119. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_11_0_106
Kopachev V.F., Kopacheva E.A. Effect of transient processes on technical performance of compressed air production and handling systems in mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(1–1):106–119. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_11_0_106

22. Ушаков В.К. *Математическое моделирование надежности и эффективности шахтных вентиляционных систем*. М.: Горная книга; 2003. 181 с.
Ushakov V.K. *Mathematical modeling of reliability and efficiency of mine ventilation systems*. Moscow: Gornaya Kniga; 2003. 181 p. (In Russ.)
23. Потапов В.Д., Призов А.Д. *Имитационное моделирование производственных процессов в горной промышленности*. М.: Высшая школа; 1981. 191 с.
Potapov V.D., Prizyov A.D. *Simulation modeling of production processes in mining industry*. Moscow: Vysshaya Shkola; 1981. 191 p. (In Russ.)
24. Jones G.L., Qin Q. Markov chain Monte Carlo in practice. *Annual Review of Statistics and Its Application*. 2022;9(1):557–578. https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-040220-090158

Информация об авторах

Павел Владимирович Вяткин – генеральный директор, АО «АМЗ «Вентпром», г. Артемовский, Российская Федерация; ORCID 0009-0001-2477-4436; e-mail vyatkinpv@ventprom.com

Нияз Гадым-оглы Валиев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горного дела, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-5556-2217, Scopus ID 55749527900, AuthorID 284710; e-mail Niyaz.Valiev@m.ursmu.ru

Денис Иванович Симисинов – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации горного оборудования, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-6095-0073, Scopus ID 6505975115, AuthorID 435571; e-mail 7sinov@m.ursmu.ru

Евгений Борисович Волков – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-8313-3137, Scopus ID 57220450540, AuthorID 795310; e-mail gmf.tm@ursmu.ru

Information about the authors

Pavel V. Vyatkin – General Director, AMZ Ventprom JSC, Artemovskiy, Russian Federation; ORCID 0009-0001-2477-4436, e-mail vyatkinpv@ventprom.com

Niyaz G. Valiev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mining Engineering, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID 0000-0002-5556-2217, Scopus ID 55749527900, AuthorID 284710; e-mail Niyaz.Valiev@m.ursmu.ru

Denis I. Simisinov – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mining Equipment Operation, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID 0000-0001-6095-0073, Scopus ID 6505975115, AuthorID 435571; e-mail 7sinov@m.ursmu.ru

Evgenii B. Volkov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Technical Mechanics, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation; ORCID 0000-0002-8313-3137, Scopus ID 57220450540, AuthorID 795310; e-mail gmf.tm@ursmu.ru

Поступила в редакцию	22.03.2025	**Received**	22.03.2025
Поступила после рецензирования	29.05.2025	**Revised**	29.05.2025
Принята к публикации	31.05.2025	**Accepted**	31.05.2025

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Научная статья
https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-402
УДК 681.5:004.021

Цифровые двойники и цифровые технологии: особенности и перспективы в угольной отрасли

С.М. Никитенко[1] ✉, Е.В. Гоосен[1], А.А.Рожков[2], М.К. Королев[1]
[1] *Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Российская Федерация*
[2] *Российское энергетическое агентство, Минэнерго России, г. Москва, Российская Федерация*
✉ *nsm.nis@mail.ru*

Аннотация
В настоящее время широко развернулось внедрение цифровых технологий (ЦТ) во всех отраслях российской экономики. Наиболее активно в эти процессы вовлечены высокотехнологичные отрасли. Угольная отрасль, как и остальные добывающие отрасли, отстает во внедрении цифровых технологий. Тем не менее эти процессы идут как на уровне всей отрасли, так и на уровне отдельных компаний. Одним из наиболее популярных направлений развития ЦТ является внедрение цифровых двойников, которые являются частью единой цифровой системы управления компанией – технологией-интегратором всех сквозных ЦТ и субтехнологий. Статья посвящена анализу современных подходов к изучению и практике внедрения цифровых двойников в угольной отрасли. Цель статьи – показать особенности процессов цифровизации, выявить барьеры и перспективные направления внедрения цифровых двойников (ЦД) в угольной отрасли. Для реализации этой цели в статье систематизированы концептуальные и прикладные подходы к изучению ЦД, предложен авторский подход к определению, структуре и типологии ЦД на основе выделения этапов их зрелости. Выявлены общие и отраслевые закономерности развития ЦТ и ЦД. Доказано, что ЦД – это важнейший инструмент управления цепочками создания стоимости (ЦСС), который зависит от степени зрелости производственных и цифровых технологий, а также степени их интероперабельности. Проведены сравнение и оценка опыта внедрения ЦТ и ЦД в зарубежных и отечественных горнодобывающих и угольных компаниях и в страновые модели. Выявлены барьеры внедрения ЦТ и ЦД в угольной отрасли, предложены рекомендации по их устранению. При подготовке статьи использованы следующие научные методы: системный и сравнительный анализ, библиографическое исследование, обобщение, социологический опрос экспертов. Источниками данных послужили материалы СМИ и сайтов ведущих зарубежных и отечественных угольных и горнодобывающих компаний, экспертные оценки, кейс-стади цифровых проектов, аналитические отчеты консалтинговых компаний, материалы первичного и вторичного экспертных опросов. Проведенный анализ показал, что процессы цифровой трансформации и внедрения ЦД в угольной отрасли отстают от других отраслей. Причиной тому являются барьеры как общие для всех отраслей, так и специфичные для угольной отрасли: высокая цена цифровых технологий и нехватка ресурсов, значительный эффект масштаба; отсутствие четко выстроенной модели развития угольной отрасли и стратегии ее цифровизации; низкий уровень автоматизации производства и управления, недостаточность цифровой инфраструктуры; острая нехватка кадров и цифровых компетенций у руководителей компаний.

Ключевые слова
угольная отрасль, цифровизация, цифровые двойники, типология цифровых двойников, анализ, эксперты, внедрение, цепочки создания стоимости, страновые модели, инфраструктура, управление

Финансирование
Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 25-18-00647).

Для цитирования
Nikitenko S.M., Goosen E.V., Rozhkov A.A., Korolev M.K. Digital twins and digital technologies: specific features and prospects in the coal industry. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(4):298–305. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-402

© Никитенко С. М., Гоосен Е. В., Рожков А. А., Королев М. К., 2025

DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Research paper

Digital twins and digital technologies: specific features and prospects in the coal industry

S.M. Nikitenko[1] ✉, **E.V. Goosen**[1], **A.A. Rozhkov**[2], **M.K. Korolev**[1]

[1] *Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation*

[2] *Russian Energy Agency, Ministry of Energy of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation*

✉ *nsm.nis@mail.ru*

Abstract

Across all sectors of the Russian economy, the adoption of digital technologies (DT) is accelerating, with high-tech industries leading the way. The coal industry, like other extractive sectors, has been slower to embrace these solutions, yet digitalization is advancing both at the industry level and within individual companies. One of the most dynamic areas of DT development is the adoption of digital twins (DTw), which form a core element of integrated digital management systems—acting as an integrator for cross-cutting technologies and sub-technologies. This article examines current approaches to studying and implementing digital twins in the coal sector. The objective is to highlight the specific features of digitalization processes, identify barriers, and outline promising directions for the adoption of DTw in the coal industry. To this end, the article systematizes conceptual and applied approaches to DTw, proposes an original framework for defining, structuring, and classifying digital twins based on maturity levels, and identifies both general and industry-specific trends in the development of DT and DTw. The analysis demonstrates that digital twins are a critical tool for managing value chains, and their effectiveness depends on the maturity of production and digital technologies and on the degree of their interoperability. The study compares and evaluates international and domestic experiences of DT and DTw adoption in mining and coal companies, as well as national-level models. It identifies barriers to adoption in the coal sector and offers recommendations for overcoming them. The research applies systems and comparative analysis, bibliographic review, generalization, and expert surveys. Data sources included media reports, websites of leading coal and mining companies, expert assessments, digital project case studies, consulting reports, and primary and secondary expert surveys. The findings show that digital transformation in the coal industry, including the adoption of DTw, lags behind other sectors. This gap is driven by both general and sector-specific factors: high costs and limited resources, scale effects, the absence of a clear development model and digitalization strategy, low levels of automation in production and management, insufficient digital infrastructure, and an acute shortage of personnel with digital competencies, particularly among executives.

Keywords

coal industry, digitalization, digital twins, typology of digital twins, analysis, experts, implementation, value chains, national models, infrastructure, management

Finding

This research was supported by the Russian Science Foundation (Grant Agreement No. 25-18-00647).

For citation

Nikitenko S.M., Goosen E.V., Rozhkov A.A., Korolev M.K. Digital twins and digital technologies: specific features and prospects in the coal industry. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(4):298–305. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-402

Введение

В настоящее время широко развернулось внедрение цифровых технологий (ЦТ) во всех отраслях российской экономики. Наиболее активно в эти процессы вовлечены высокотехнологичные отрасли. Угольная отрасль, как и остальные добывающие отрасли, отстает во внедрении цифровых технологий. Тем не менее эти процессы идут как на уровне всей отрасли, так и на уровне отдельных компаний.

Одним из наиболее популярных направлений развития ЦТ является внедрение цифровых двойников, которые являются частью единой цифровой системы управления компанией – технологией-интегратором всех сквозных ЦТ и субтехнологий.

Последние технологические разработки и достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) позволили активизировать внедрение ЦД в компаниях, работающих в добывающих отраслях, в том числе в угольной отрасли. ЦД сделали возможной автоматизацию всех основных звеньев цепочек создания стоимости, позволили комплексно внедрять перспективные технологии разведки месторождений,

селективной выемки угля, обогащения, формирования проектных угольных смесей, разрабатывать оптимальные пути доставки и переработки угля.

Цель статьи – показать особенности процессов цифровизации, выявить барьеры и перспективные направления внедрения цифровых двойников (ЦД) в угольной отрасли. **Задачи:** *1* – дать определение ЦД и показать особенности и уровень их внедрения в компаниях стран, занимающихся угледобычей; *2* – выделить и дать характеристику базовым страновым моделям управления цифровизацией угольной отрасли, показать в них место ЦД; *3* – выявить барьеры внедрения ЦТ и ЦД в угольной отрасли и предложить меры по их преодолению.

Данные и методы

При проведении исследования использованы следующие научные методы: системный и сравнительный анализ, библиографическое исследование, обобщение, социологический опрос экспертов.

Источниками данных послужили материалы интернета и СМИ, сайтов ведущих зарубежных и отечественных угольных и горнодобывающих компаний, экспертные оценки, кейс-стади цифровых проектов, аналитические отчеты консалтинговых компаний, материалы первичного и вторичного экспертного опроса.

Результаты исследований

Цифровые технологии и цифровые двойники начиная с 2000-х годов активно внедряются в горнодобывающей и угольной отраслях. На начальном этапе внедрение платформ корпоративных ресурсов (ERP) позволило синхронизировать разрозненные производственные операции, корпоративные процессы и отчетность и значительно повысить эффективность. Следствием этого во всем мире стали крупные инвестиции в цифровое ПО и цифровую инфраструктуру для формирования локальных цифровых двойников.

Понятие «цифрового двойника» в научный оборот было введено еще в 2003 г., но в академических кругах до сих пор этот термин трактуется по-разному [1]. Одни авторы ограничивают его программами, моделирующими предметы и результаты деятельности [2, 3], другие видят в нем важнейший инструмент мониторинга и стратегического управления [4–6]. В зарубежной литературе наибольшее распространение получило определение ЦД, понимающее под ЦД «…интегрированное мультифизическое, многомасштабное, вероятностное моделирование сложного продукта, использующее наилучшие доступные физические модели для отражения срока службы соответствующего физического объекта» [1]. В последнее время появились публикации, посвященные роли ЦД в управлении компаниями, регионами, цепочками создания стоимости, учитывающие не только технологические, но и финансовые и организационные и др. аспекты управления сложными системами [7, 8]. С некоторым запозданием формируются и российские школы по теме ЦТ [9, 10] и ЦД [11, 12], в том числе ЦТ [13, 14] и ЦД в угольной отрасли [15, 16].

По мнению авторов, цифровой двойник – это комплексный инструмент управления, представляющий реалистичную виртуальную модель физического объекта, обновляемую в реальном времени.

Лидерами внедрения ЦТ и ЦД являются крупные горнодобывающие и угольные компании Австралии, Китая, США, Канады и Германии. Они не только синхронизируют ЦД с приоритетными ЦТ, активно внедряют ЦД отдельных агрегатов, технологических переделов, рудников и шахт, но и стремятся превратить его в инструмент управления всей цепочкой создания стоимости. Под ЦСС в данной статье понимается вся последовательность переделов продукции в угольной отрасли, начиная от геологоразведки и заканчивая реализацией продуктов переработки угля [17–19]. В качестве целей обозначают поиск и удержание оптимальных режимов работы для максимизации производительности и надежности. Все это позволяет оценить уровень цифровой трансформации и внедрения ЦД (табл. 1).

Анализ официальных отчетов и сайтов горнодобывающих и консалтинговых компаний позволил выделить уровни внедрения ЦТ и ЦД. Уровень 0 – это этап стандартизации и автоматизации управления основными и вспомогательными производствами, начало внедрения базовых цифровых технологий. На этом этапе все процессы производства, включая управление, максимально заменяются машинными, создаются виртуальные модели отдельных продуктов и операций – квази-ЦД. Уровень 1 – это период оптимизации и реинжиниринга бизнес-процессов компании с учетом требований цифровых технологий, создания локальных цифровых двойников (ЛЦД) для наиболее важных активов и процессов, синхронизации цифровых и реальных производственных бизнес-процессов. Уровень 2 – это начало создания комплексных цифровых двойников (КЦД), рекомбинации ЦД и приоритетных ЦТ. Уровень 3 – это этап формирования цифрового двойника всей ЦСС, способного управлять всей ЦСС, решать операционные и стратегические задачи.

Кроме уровней внедрения ЦТ и ЦД, удалось выявить две страновые модели внедрения ЦТ и ЦД в угольной отрасли: корпоративную – в развитых странах (BHP, Anglo American, Glencore, Anglo American и др.) и государственную – Китай (China Shenhua Energy Company Limited, China Coal Energy Company Limited и др.). В основу выделения моделей положены характер ЦСС и уровень развития ЦТ и ЦД (табл. 2).

Также есть группа стран, компании которых только формируют свою модель цифровой трансформации: Индонезия, Монголия, Россия.

В корпоративной модели компании-лидеры ведут деятельность в глобальном масштабе, имеют географическую и пространственную диверсификацию, благодаря чему их ЦСС более гибкие и устойчивые. В их состав входят компании, расположенные в разных частях света, которые ведут добычу, транспортировку и переработку угля, черных и цветных металлов, алмазов. Также там присутствуют сервисные, финансовые и исследовательские структуры, центры цифровизации.

Таблица 1

Особенности внедрения ЦТ и ЦД в крупнейших горнодобывающих и угольных и компаниях, 2024 г.

Компании	Страна регистрации / базирование угольных активов	Роботизированные автономные горные машины, устройства и транспортные средства	Интегрированные удаленные центры управления (IROC)	Цифровые двойники активов, процессов и группы активов	Искусственный и генеративный интеллект	Этап цифровизации
BHP	Великобритания, Австралия / Австралия	+	+	+	+	3
China Shenhua Energy	Китай / Китай, Австралия, Индонезия	+	+	+	+	2–3
China Coal Energy	Китай / Китай	+	+	+	+	2–3
Rio Tinto	Австралия / после 2018 г. не владеет угольными активами	+	+	+	+	2–3
Glencore	Великобритания / Австралия, Колумбия	+	+	+	–	2–3
Anglo American	Великобритания / Австралия	+	–	+	–	2
PT Adaro Energ	Индонезия / Индонезия	+	–	+	–	2
Vale	Бразилия / нет, ранее Мозамбик, Австралия	+	–	+	–	2
Yankuang Energy Group	Китай / Китай, Австралия	+	–	+	–	2
Tata Steel	Индия / Индия	-	–	+	–	1
ArcelorMittal	Швейцария / США, Босния и Герцеговина, США	-	–	+	–	1
Nippon Steel	Япония / косвенно через инвестиции в совместные проекты Австралии и США	-	–	+	–	1
Teck Resources	Канада / Британская Колумбия	+	–	-	–	1
Peabody Energy	США / США, Австралия, Венесуэла	+	–	-	–	1
Coal India	Индия / Индия	–			–	0

Источник: составлено авторами на основе официальных отчетов и сайтов компаний, данных McKinsey, GlobalData.

Таблица 2

Сравнение уровня цифровизации и внедрения ЦД в Австралии, Китае и России

Критерий	Австралия	Китай	Россия
Страновая модель	Частно-корпоративная	Государственная	Нет (пилотные проекты)
Характер ЦСС в отрасли	Открытая, диверсифицированная по горизонтали, глобальная	Закрытая, вертикально-интегрированная, ориентированная на внутренний рынок	Закрытая, вертикально-интегрированная, ориентированная на внешний рынок
Уровень внедрения	Высокий	Средний	Начальный
Основные технологии	Автономная техника, блокчейн	IoT, 5G, AI	Датчики, ГИС, ERP-системы
Безопасность	Превентивный мониторинг	Системы прогнозирования аварий	Локальные решения
Эффективность	+5–10%	+15–20%	+2–5%, часто отрицательная

Источник: составлено авторами на основе официальных отчетов и сайтов компаний, данных McKinsey, Яков и партнеры, GlobalData.

Кейс BHP

BHP – крупнейшая в мире диверсифицированная горнодобывающая и металлургическая компания, имеющая активы в более чем 90 странах. Источниками конкурентоспособности компании являются: высококачественные активы, близость к потребителям, транснациональный масштаб деятельности, производственная и территориальная диверсификация, эффективное корпоративное управление всей ЦСС.

BHP является мировым лидером по внедрению ЦТ и ЦД. Компания перешла на третий уровень цифровизации, завершив синхронизацию КЦД, ИИ и предиктивной аналитики с помощью единого удаленного центра управления (IROC). Центр выполняет функции локального индустриального центра цифровых компетенций, осуществляет мониторинг и анализ тенденций развития ЦТ, разрабатывает стандарты использования ЦТ и ЦД, заключает контракты с партнерами, проводит отбор и мониторинг проектов по внедрению ЦТ в своей компании и компаниях-партнерах.

BHP сотрудничает с лидерами в области ЦТ и горнодобывающей отрасли: AWS (аналитика данных, IoT-платформы), Siemens, Schneider Electric (промышленная автоматизация). Компания реализует совместные проекты с Rio Tinto, Vale по стандартизации цифровых решений, инвестирует в технологические стартапы и создание инновационных центров. IROC в партнерстве с университетами и государственным научным агентством CSIRO участвует в разработке инновационных цифровых и технологических решений.

Источник: официальный сайт компании, данные консалтинговых компаний.

Опыт BHP – это один из самых удачных примеров реализации открытой, преимущественно корпоративной частной модели цифровизации угольной отрасли, в основе которой лежит тесное сотрудничество ведущих глобальных компаний при активной поддержке со стороны национальных государств, которые и обеспечивают компании технологическое лидерство.

В государственных вертикально-интегрированных угольных компаниях Китая государственная поддержка и административный ресурс позволяют снижать операционные расходы и ускоренно внедрять ЦТ и ЦД, догоняя лидеров. Опыт China Shenhua Energy – пример реализации закрытой, преимущественно государственной модели цифровизации угольной отрасли, которая решает проблемы формирования технологического суверенитета и экономической безопасности.

Кейс China Shenhua Energy

China Shenhua Energy – крупнейшая в мире угольная компания. Она входит в государственный энергетический холдинг China Energy Investment Corporation. Ключевыми источниками конкурентоспособности компании являются: масштаб деятельности, низкая себестоимость добычи, жесткий контроль по вертикали за всей ЦСС – от разведки до транспортировки, продажи и переработки, государственное участие и фокус на защищенный внутренний рынок.

Большую роль играет ее статус «национального лидера в энергетике». Он позволяет компании получать государственные субсидии, льготные кредиты, снижать процентные ставки по налогам, получать гарантированный госзаказ на уголь и электроэнергию. Государство предоставляет компании приоритетный доступ к крупнейшим угольным месторождениям и инфраструктурные преференции – строительство ж/д веток и портов за госсчёт (порт Huanghua) и ограничивает вход на китайский угольный рынок иностранных компаний. Через China Energy Investment Corporation (CEIC) China Shenhua Energy активно участвует в разработке отраслевого законодательства и отраслевых стандартов, в которых учитываются ее интересы. При реализации своих проектов компания сотрудничает преимущественно с национальными технологическими компаниями: Huawei – 5G технологии для «умных» шахт, Alibaba – облачные AI-решения, XCMG – автономная горная техника.

Источник: официальный сайт компании, данные консалтинговых компаний.

Угольная отрасль России и российские компании значительно уступают зарубежным лидерам по уровню цифровизации и внедрению ЦД[1]. В целях уточнения ситуации авторами статьи в 2024 г. был проведен опрос 10 экспертов – представителей крупнейших угледобывающих компаний, действующих в Кемеровской области. Полученные результаты в основном совпадают с данными Братарчука и др., проводивших опрос в 2023 г. [15] (табл. 3).

Эксперты сошлись в своих оценках на том, что российские угольные компании пока не готовы внедрять полноценные ЦД, а ЦТ внедряются пока лишь в отдельных звеньях угольных ЦСС: логистика и управление безопасностью (табл. 4).

Таблица 3

Уровень цифровизации угольных компаний России, 2023–2024 гг.

Технология	Данные исследования Братарчука, 2023 г.		Данные опроса авторов статьи, 2024 г.
	Доля в ЦТ в общем объеме инвестиций, %	Средний возраст внедренных систем, лет	Доля в ЦТ в общем объеме инвестиций, %
АСУ ТР	7,2	12,4	8,4
ГИС	5,4	8,6	6,2
SCADA	4,0	10,2	5,0
MES	3,2	6,8	3,8
ИИ	1,2	1,8	1,0
ЦД	1,6	2,4	1,2

Источник: составлено авторами на основе исследования Братарчука и др. [15], официальных отчетов и сайтов компаний, опроса экспертов.

[1] Цифровизация горно-металлургической отрасли России в 2024 году. Долгосрочный оптимизм и высокие цели. М: Яков и Партнёры, ГК «Цифра»; 2024. 20 с.

Таблица 4

Приоритетные направления цифровизации, внедряемые в угольных компаниях России

Компания	Приоритетные направления внедрения ЦТ
АО «Русский Уголь»	Системы беспроводной передачи данных Технологии искусственного интеллекта Управление логистикой
ООО «Восточная горнорудная компания»	
УК «Колмар»	
УК «Кузбассразрезуголь»	
АО «СУЭК»	Комплексные системы MES управления бизнес-процессами Безлюдные роботизированные технологии Локальные цифровые двойники
Шахта «Осинниковская» Распадской угольной компании (угольные активы ЕВРАЗа)	
Разрез «Барзасское товарищество» (АО «Стройсервис»)	

Источник: составлено авторами на основе официальных отчетов и сайтов компаний, опроса экспертов.

Внедрение ЦТ и ЦД «застряло» между первым и вторым уровнями цифровизации. Внедряемые ЦД носят локальный характер и даже в крупных угольных компаниях не обеспечивают ожидаемых результатов.

Обсуждение результатов и выводы

Проведенный анализ показал, что процессы цифровой трансформации и внедрения ЦД в угольной отрасли отстают от других отраслей. Причиной тому являются как общие для всех отраслей барьеры, так и специфичные для угольной отрасли:

– высокая цена цифровых технологий и нехватка ресурсов, значительный эффект масштаба;

– отсутствие четко выстроенной модели развития угольной отрасли и стратегии ее цифровизации;

– низкий уровень автоматизации производства и управления, недостаточность цифровой инфраструктуры;

– острая нехватка кадров и цифровых компетенций у руководителей компаний.

Наконец, серьезным препятствием для внедрения ЦТ и ЦД является сложность оценки реальных эффектов цифровой трансформации. В настоящее время практически отсутствуют измеримые показатели целей, методики оценки эффективности и результативности внедрения ЦТ, а перечень показателей, по которым осуществляются мониторинги и создаются рейтинги, ориентированы на развитые страны и не сбалансированы [20]. Именно поэтому в современных условиях все чаще используют экспертные оценочные суждения и балльно-рейтинговые оценки. Их основной недостаток – субъективность. Без разработки национальных стандартов и методик оценки решить эти вопросы невозможно.

Для преодоления этих барьеров, по мнению авторов, необходимо разработать стратегию цифровизации угольной отрасли, определить ключевые субъекты, цели и механизмы. В условиях санкций и крайней зависимости от импорта производственных и цифровых технологий сделать это невозможно без активного участия государства. В России угольные компании – частные, поэтому это может быть только смешанная модель внедрения ЦТ и ЦД. Инструментом ее реализации могли бы стать индустриальные центры компетенций (ИЦК) – механизм взаимодействия государства, отраслей и IT-компаний, запущенный в 2022 г. ИЦК позволяют государству, частным компаниям и научно-образовательным организациям устанавливать стандарты и приоритеты цифровизации отраслей, совместно финансировать и управлять проектами. Сегодня 36 ИЦК на принципах государственно-частного партнерства созданы во всех ключевых отраслях экономики в рамках национального проекта «Эффективная и конкурентная экономика», но пока отсутствуют в угольной отрасли.

Список литературы / References

1. Grieves M., Vickers. J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: Kahlen F.-J., Flumerfelt Sh., Alves A. (eds.) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Springer, Cham; 2017. Pp. 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
2. Schluse M., Rossmann J. From simulation to experimentable digital twins: simulation-based development and operation of complex technical systems. In: *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*. Edinburgh, UK; 2016. Pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/SysEng.2016.7753162
3. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*. 2017;11:939–948. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198
4. El-Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. In: *IEEE MultiMedia*. 2018;25(2):87–92. https://doi.org/10.1109/MMUL.2018.023121167
5. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective. In: *IEEE Access*. 2020;8:21980–22012. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143
6. Ghahramanieisalou M., Sattarvand J. Digital twins and the mining industry. In: Soni A.K. (ed.) *Technology in Mining Industry*. IntechOpen; 2024. Pp. 1–30. https://doi.org/10.5772/intechopen.1005162
7. Zhang C., Xu W., Liu J., et al. A reconfigurable modeling approach for digital twin-based manufacturing system. *Procedia CIRP*. 2019;83:118–125. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.141

8. Ghahramanieisalou M., Sattarvand J. Applications of digital twin technology in productivity optimization of mining operations. In: *Applications for Computers and Operations Research in the Minerals Industries*. August 2023. Rapid City, USA: SME; 2023. Pp. 1–17.
9. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Щербина Л.А. и др. *Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности*. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета; 2022. 492 с.
Borovkov A.I., Ryabov Y.A., Shcherbina L.A., et al. *Digital twins in high-tech industries*. Saint Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publishing House; 2022. 492 p. (In Russ.)
10. Прохоров А., Лысачев М. *Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт*. М.: Альянс Принт; 2020. 401 с.
Prokhorov A., Lysachev M. *Digital twin: Analysis, trends, and global experience*. Moscow: Alliance Print; 2020. 401 p. (In Russ.)
11. Абрамов В.И. Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития. *Вопросы инновационной экономики*. 2024;14(3):691–716. https://doi.org/10.18334/vinec.14.3.121484
Abramov V.I., Gordeev V.V., Stolyarov A.D. Digital twins: characteristics, typology and development practices. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2024;14(3):691–716. (In Russ.) https://doi.org/10.18334/vinec.14.3.121484
12. Мадатов Д.А., Борисов В.В., Сивков В.С. Будущее технологии цифровых двойников. *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2025;10(1):10–15.
Madatov D.A., Borisov V.V., Sivkov V.S. The future of digital twin technology. *Mezhdunarodnyy Zhurnal Informatsionnykh Tekhnologiy i Energoeffektivnosti*. 2025;10(1):10–15. (In Russ.)
13. Панов Ю.П., Грабский А.А., Рожков А.А. Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий в угольной промышленности России. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2023;(5):8–21. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-5-8-21
Panov Yu.P., Grabsky A.A., Rozhkov A.A. Current state and prospects for digitalization of the Russian coal industry. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2023;(5):8–21. (In Russ.) https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-5-8-21
14. Жданеев О.В., Власова И.М. Вызовы и приоритеты цифровой трансформации угольной отрасли. *Уголь*. 2023;(1):62–69. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-1-62-69
Zhdaneev O.V., Vlasova I.M. Digital transformation of the coal industry. *Ugol'*. 2023;(1):62–69. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-1-62-69
15. Братарчук Т.В., Гладышев А.Г., Лукичев К.Е. и др. Разработка и внедрение цифровых двойников для оптимизации и устойчивого развития угольной промышленности России. *Уголь*. 2024;(11):108–116. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11-108-116
Bratarchuk T.V., Gladyshev A.G., Lukichev K.E. Development and implementation of digital twins for optimization and sustainable development of the coal industry in Russia. *Ugol'*. 2024;(11):108–116. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11-108-116
16. Соловенко И.С., Рожков А.А. Цифровизация предприятий топливно-энергетического комплекса России (рубеж XX–XXI вв.): степень изученности проблемы. *Вестник Томского государственного университета*. 2023;489:153–161. https://doi.org/10.17223/15617793/489/15
Solovenko I.S., Rozhkov A.A. Digitalization of enterprises of the fuel and energy complex of Russia (the turn of the 21st century): The state of the art of the problem. *Tomsk State University Journal*. 2023;489:153–161. (In Russ.) https://doi.org/10.17223/15617793/489/15
17. Никитенко С.М., Гоосен Е.В., Кавкаева О. Моделирование гибких цепочек добавленной стоимости на основе «чистых» технологий переработки угля. *Горная промышленность*. 2023;(S2):126–134. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-126-134
Nikitenko S.M., Goosen E.V., Kavkaeva O. Modeling of flexible value chains based on clean coal processing technologies. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):126–134. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-126-134
18. Никитенко С.М., Павлова Л.Д., Корнева А.В. и др. Формирование и управление цепочками создания стоимости в угольной отрасли на основе перспективных технологий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(8):163–179. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_8_0_163
Nikitenko S.M., Pavlova L.D., Korneva A.V., et al. Formation and control of value chains in coal industry based on emerging technologies. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(8):163–179. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_8_0_163
19. Goosen E.V., Kagan E.S., Nikitenko S.M., Pakhomova E.O. Evolution of VAC in the context of coal industry advance in the conditions of digitization in Russia. *Eurasian Mining*. 2019;(2):36–40.
20. Курлов В.В., Косухина М.А., Курлов А.В. Модель оценки цифровой зрелости промышленного предприятия. *Экономика и управление*. 2022;28(5):439–451. https://doi.org/10.35854/1998-1627-2022-5-439-451
Kurlov V.V., Kosukhina M.A., Kurlov A.V. Model for assessing the digital maturity of an industrial enterprise. *Economics and Management*. 2022;28(5):439–451. (In Russ.) https://doi.org/10.35854/1998-1627-2022-5-439-451

Информация об авторах

Сергей Михайлович Никитенко – доктор экономических наук, доцент, заведующий лабораторией трансформации цепочек создания стоимости в угольной отрасли, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-6684-4159, Scopus ID 56511552300; e-mail nsm.nis@mail.ru

Елена Владимировна Гоосен – кандидат экономических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории трансформации цепочек создания стоимости в угольной отрасли, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-1387-4802, Scopus ID 57192160485; e-mail egoosen@yandex.ru

Анатолий Алексеевич Рожков – профессор, начальник отдела аналитических исследований и краткосрочного прогнозирования развития угольной промышленности, департамент аналитики по сегменту угольной, торфяной промышленности, Российское энергетическое агентство, Минэнерго России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-4541-0922; e-mail rozhkov@rosenergo.gov.ru

Михаил Константинович Королев – научный сотрудник лаборатории трансформации цепочек создания стоимости в угольной отрасли, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-8102-9830, Scopus ID 57246310900; e-mail m.korolev.gm@gmail.com

Information about the authors

Sergey M. Nikitenko – Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Value Chain Transformation in the Coal Industry, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0001-6684-4159, Scopus ID 56511552300; e-mail nsm.nis@mail.ru

Elena V. Goosen – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Value Chain Transformation in the Coal Industry, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-1387-4802, Scopus ID 57192160485; e-mail egoosen@yandex.ru

Anatoly A. Rozhkov – Professor, Head of Analytical Research and Short-Term Forecasting Department for Coal Industry Development, Department of Analytics for Coal and Peat Industries, Russian Energy Agency, Ministry of Energy of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-4541-0922; e-mail rozhkov@rosenergo.gov.ru

Mikhail K. Korolev – Researcher of the Laboratory of Value Chain Transformation in the Coal Industry, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0001-8102-9830, Scopus ID 57246310900; e-mail m.korolev.gm@gmail.com

Поступила в редакцию	01.04.2025	**Received**	01.04.2025
Поступила после рецензирования	21.06.2025	**Revised**	21.06.2025
Принята к публикации	27.06.2025	**Accepted**	27.06.2025

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-06-426
УДК 330.1:622

Оценка горных компаний с проектами на стадии оцененных ресурсов и запасов до этапа строительства предприятия и добычи

А.Н. Лопатников ✉, **А.Ю. Румянцев**
ООО «ААР», г. Москва, Российская Федерация
✉ *alopatnikov@aarcapital.com*

Аннотация
Оценка горных компаний и проектов нередко становится темой дискуссий отраслевых инвесторов, аналитиков и регуляторов. Среди причин – сложности интерпретации геологической информации, высокая волатильность цен на металлы и минералы, повышенный риск при инвестировании и исторически невысокая доходность на капитал в отрасли. Дополнительный и существенный фактор – характерная для горных проектов стадийность, когда профиль риска проектов заметно меняется на разных этапах их развития. Ненулевая вероятность проекта – не перейти к стадии строительства горного предприятия и добычи даже при наличии исследования уровня Feasibility Study (FS) – требует особого внимания к выбору метода оценки и анализу исходных данных. Уникальность горных проектов и относительно небольшой размер рынка публичных компаний отрасли ограничивают надежность сравнительного анализа. После публикации отчета с оценкой ресурсов затраты перестают быть релевантной метрикой стоимости. Ниже мы описываем практический подход к анализу стоимости горной компании или проекта до этапа строительства, который позволяет учесть риски проекта на данной стадии, тем самым повысить надежность оценки его рыночной стоимости. Мы показываем, что несмотря на специфику отрасли использование в расчете NPV ожидаемых денежных потоков и традиционных методов расчета ставки дисконтирования (CAPM) позволяет получить адекватную оценку проекта, которая согласуется с выводами сравнительного анализа. В работе приведен анализ причин нередко кажущегося парадоксальным значительного несоответствия между значением NPV в технических отчетах горных компаний и их рыночной капитализацией.

Ключевые слова
оценка стоимости горных активов и компаний, NPV, рыночная стоимость, Feasibility Study, риски горных проектов, ставка дисконтирования

Для цитирования
Lopatnikov A.N., Rumyantsev A.Y. Valuation of non-producing mining companies. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):306–316. https:/doi.org//10.17073/2500-0632-2025-06-426

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Research paper

Valuation of non-producing mining companies

A.N. Lopatnikov ✉, **A.Y. Rumyantsev**
AAR LLC, Moscow, Russian Federation
✉ *alopatnikov@aarcapital.com*

Abstract
It is not unusual for the valuations of mining companies and projects to be debated by mining investors, analysts and regulators. Difficulties understanding geological information, volatility of metals prices, high investment risks and poor historical returns on capital in the mining industry are among the reasons. An additional and important factor is the varying risk profile at different stages of a mining project. A non-zero probability of not advancing to production for a project with a positive feasibility study (FS) requires a careful analysis of its valuation methods and supportive data. Because each mining project is different, and public mining companies are a small part of the market, it's hard to compare them accurately. Once a company prepares a mineral resources report, the exploration costs cease to be a relevant value metric. We offer a practical valuation method for non-producing mining companies, accounting for development stage risks to determine market value. Recognizing the specific attributes of the mining industry, we show that the NPVs calculated using the expected cash flows and discount rates developed using the traditional CAPM framework provide

© Лопатников А. Н., Румянцев А. Ю., 2025

realistic estimates of the project's value, that compare well to the market indications for the peer groups. We are also investigating the large gap between the NPV values in technical reports and the actual market values of mining companies.

Keywords
Valuation of mining assets and companies, NPV, Market value, Feasibility Study, Risks of mining projects, Discount rates

For citation
Lopatnikov A.N., Rumyantsev A.Y. Valuation of non-producing mining companies. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(3):306–316. https:/doi.org//10.17073/2500-0632-2025-06-426

Введение

Оценка горных компаний и проектов на ранних стадиях считается более сложной, чем оценка средней компании в большинстве других отраслей, за исключением может быть фармацевтических компаний, чем-то похожих по характеру рисков. Причины того, почему горные компании оценивать особенно трудно, включают сложность интерпретации геологической информации, стадийность проектов и бинарный характер рисков на этапах изучения, высокую волатильность цен на металлы и минералы и относительно небольшой размер как самой отрасли, так и большинства горных компаний. Все это, а также и то, что многие компании отрасли не являются публичными, создает у части инвесторов ощущение, что методы оценки, используемые в финансах, не годятся для активов с подобной структурой рисков.

Целью данной работы было пояснить причину различия NPV в технических отчетах и справедливой стоимости, а также привести пример подхода к оценке рыночной стоимости проектов и компаний с подготовленными исследованиями уровня Feasibility Study[1], но до начала строительства и добычи. Для этого в рамках исследования решались три ключевые задачи. Во-первых, привести и систематизировать факторы, объясняющие значительное различие между значениями NPV, приводимыми в технических отчётах, и рыночной стоимостью горных проектов. Во-вторых, предложить практический подход, учитывающий в расчете ставки дисконтирования, полученной с использованием модели CAPM, меняющийся характер рисков горных проектов на разных стадиях изучения до начала строительства и добычи. Наконец, сопоставить результат расчета на основе предложенного подхода с рыночными мультипликаторами на основе рыночной капитализации.

NPV и стандарты раскрытия информации публичными горными компаниями

Несмотря на особенности горных активов и разнообразие методов, доступных инвесторам для их оценки, все они сводятся к одному из трех основных способов или подходов: сравнение с подобным или похожим, обоснованные затраты или текущая стоимость ожидаемых доходов.

В стандартах «NI 43–101 Standards of Disclosure for Mineral Projects», а также в дополняющем их документе приводятся требования к техническим отчетам Form 43-101F1, согласно которым технические отчеты публичных компаний (Preliminary Economic Assessments (PEA), Pre-Feasibility Studies, или Feasibility Studies) должны содержать раздел с экономическим анализом и ключевыми предположениями. В частности, в Form 43-101F1 содержатся требования приводить в отчетах *«описание чистой приведенной стоимости (NPV), ставки внутренней доходности (IRR) и периода окупаемости капитала»*.

The JORC Code ни в версии 2012 г., ни в проекте 2024 г. не упоминает термин NPV и не требует явно его рассчитывать или раскрывать в отчетах для публичного раскрытия [1]. В то же время стандарты JORC требуют раскрывать вся существенную информацию, которая влияет на экономику конкретного горного проекта. Такая информация включает экономические предположения, являющиеся частью модифицирующих факторов (учета таких факторов, как особенности добычи, переработки, металлургии, инфраструктуры, а также экономических, маркетинговых, юридических, социальных факторов, включая вопросы охраны окружающей среды и регуляторные требования), и поэтому должна быть раскрыта в технических отчетах, где приводится оценка ресурсов и запасов.

Несмотря на то что в теории NPV позволяет оценить стоимость любого актива, не любой расчет NPV дает оценку рыночной стоимости. Цели, для которых проводится расчет NPV, влияют на выбор предпосылок при прогнозировании ключевых параметров – денежных потоков и ставки дисконтирования. Основная цель расчета показателей IRR и NPV в технических отчетах – показать положительную экономику реализации проекта. Положительное значение NPV означает, что проект может быть реализован [2].

В результате безусловно полезная практика публикации NPV горного проекта в документах для публичного раскрытия одновременно оказывается источником путаницы, поскольку NPV, рассчитанный в технических отчетах, имеет мало общего с рыночной стоимостью проекта. Описывая природу создания стоимости проекта в горной отрасли и путаницу, которая возникает из-за непонимания целей технических отчетов и природы создания стоимости в отрасли, Michael Samis [3] отмечал, что «и отраслевых специа-

[1] Здесь и далее мы используем без перевода термин Feasibility Study. Сложившийся за долгие годы перевод – ТЭО (Технико-экономическое обоснование) не полностью передает значение термина. Feasibility study (исследование экономической целесообразности) предполагает, что результат исследования может быть и отрицательным, т.е. не обосновывающим инвестицию в конкретный проект в данное время.

листов, и тех, кто просто интересуется горным сегментом, часто путает *значительная разница между рыночной капитализаций компаний, ведущих геологоразведку и изучение объекта, и величиной NPV, показанной в техническом отчете, подготовленном в соответствии с требованиями NI43-101*». В самом деле, приводимые в техническом отчете или новостном сообщении о его публикации значения NPV проекта, как правило, заметно завышают рыночную стоимость компании, реализующей проект. Анализ 100 горных проектов, проведенный в 2024 г. [4], выявил, что NPV, показанные в исследованиях уровня Feasibility Study, превышали рыночные оценки в среднем на 40–60 %.

Типичной для отрасли является ситуация, когда NPV в сотни миллионов долларов, приведенный в исследованиях уровня Pre-feasibility Study (PFS) или Feasibility Study (FS), показывают компании с рыночной капитализацией в первые десятки миллионов долларов США. Один из недавних примеров – сообщение об обновлении PFS отчета компанией TriStar Gold в мае 2025 г., в котором компания отмечала, что «Оценка размера *минеральных ресурсов и запасов не изменилась, основное внимание в обновленном исследовании было уделено оценке затрат с момента выпуска предыдущего pre-feasibility study, а также учету изменений в цене на золото и обменных курсах*» [5]. Рынок положительно отреагировал на удвоение NPV проекта в обновленном PFS с 321 до 603 млн долл. США (рассчитано по цене 2200 долл. США/унция с использованием ставки дисконтирования в 5 %)[2]. Однако реакция не отражала изменения NPV, рыночная капитализация компании выросла на 9,1 % – до 36,5 млн долл. США, что примерно в 16 раз меньше NPV, приведенного в PFS.

Другой пример [6] – обновленное исследование уровня Feasibility Study литиевого проекта в Канаде, опубликованное компанией Frontier Lithium. При рыночной капитализации примерно 90 млн долл. США компания приводит NPV проекта при ставке в 8 % в 932 млн долл. США.

Очевидно, что разница такого размера не может быть результатом систематической ошибки рынка в оценке проектов. Не является она и следствием различия выводов, полученных с использованием разных методов оценки – сравнительного анализа и доходного подхода. Целью данной работы было пояснить причину различия NPV в технических отчетах и справедливой стоимости, а также привести пример подхода к оценке рыночной стоимости проектов и компаний с подготовленными исследованиями уровня Feasibility Study, но до начала строительства и добычи.

NPV, техническая стоимость и рыночная стоимость

Понятие NPV явным образом используется при определении «технической стоимости» в стандарте горной оценки VALMIN, где она определяется как *«размер чистой будущей выгоды от минерального актива (включая нефтегазовые активы) на дату такой оценки с использованием набора предположений, которые отраслевой Эксперт или Специалист считают наиболее приемлемыми, исключая какие-либо премии или скидки для учета текущих цен на рынке, стратегических или иных соображений»*.

Введение специфического понятия «технической стоимости», которое отсутствует в международных стандартах оценки (МСО), финансовой отчетности или экономической литературе и которое по сути является одним из расчетов NPV с использованием субъективных предположений, на самом деле порождает больше вопросов и создает путаницу. В последнем варианте стандартов горной оценки VALMIN была предпринята попытка гармонизации с МСО. В них добавлено, что понятие Техническая стоимость соответствует понятию Инвестиционной стоимости в МСО, что, на наш взгляд, не лучший способ, поскольку Инвестиционная стоимость – это чаще всего не что иное, как тот же самый расчет NPV проекта, рассчитанного в субъективных предположениях. Согласно МСО 2025 «*Инвестиционная стоимость – это ценность актива для конкретного владельца или потенциального владельца исходя из их индивидуальных инвестиционных или операционных целей*».

Предположения, заложенные в расчетах NPV горных проектов или Технической стоимости, которые делают их результат отличным от рыночной стоимости и часто кратно отличающимся от нее, включают:

– использование единственного варианта денежных потоков вместо ожидаемых денежных потоков, включая предположение о том, что проект гарантированно дойдет до стадии строительства, график проекта будет соответствовать прогнозу и проект покажет заложенные в модель экономические результаты;

– использование стандартизованной (нормативной) ставки дисконтирования, не отражающей риски и стоимость капитала проекта.

Первое предположение могло бы выглядеть логично в случае, когда необходимо определить стоимость построенного рудника, вышедшего на запланированные объемы добычи и сбыта продукции. Но даже в этом случае использование единой ставки для всех добывающих проектов выглядит спорным, если стоит задача определить рыночную стоимость.

A. Dixit и R. Pindyck [7], ссылаясь на эмпирические данные, отмечают, что вкладывая деньги в новые проекты, инвесторы предпочитают использовать не opportunity cost, или корпоративный WACC, рассчитанный с использованием CAPM (Capital Asset Pricing Model), а hurdle rate, или барьерную ставку, которая в реальном выражении оказывается кратно выше. Статистика горной отрасли показывает, что вероятность проекта достичь этапа строительства и добычи меняется от стадии к стадии и даже на стадии так называемого исследования уровня bankable Feasibility Study эта вероятность заметно отличается от 100 %. Кроме того, запланированные объемы могут быть не достигнуты или недостижимы по тем или иным причинам. Число исследований вероятности не достичь этапа строительства и добычи невелико, но те, что доступны, указывают на примерно одинаковые значе-

[2] При ставке 10 % значение NPV составило 393 млн долларов США.

ния вероятности переходов между стадиями, которые могут интерпретироваться как показатели риска на соответствующей стадии.

Нужно оговориться, что понятие «стадии» проекта довольно условно и также может быть истолковано произвольно. В частности, стандарты оценки горных компаний и активов CIMVAL обращают внимание на то, что «Выбор подхода к оценке горных проектов зависит от стадии ГРР или разработки горного предприятия. Горные проекты можно разделить для удобства на четыре категории; однако следует отметить, что между ними нет четких границ, а категория горного проекта может меняться со временем, при этом некоторые горные проекты трудно классифицировать так, чтобы они подходили только к одной конкретной категории» [8].

Стадии горных проектов, которые можно выделить как заметно отличающиеся по уровню риска:

– поисковые проекты и проекты без ресурсов;

– проекты с оцененными ресурсами или запасами (до принятия FID и начала строительства);

– построенные горные предприятия, на которых ведется добыча.

Естественно ожидать, что среди проектов с ресурсами и запасами, оцененными в соответствии с международно признанными стандартами семейства CRIRSCO, степень изученности проекта будет влиять на риск и, следовательно, на его стоимость. Очевидно также, что никакое изучение не позволяет устранить все риски и неопределенности горного проекта. В частности, поэтому инвесторы заметно по-разному оценивают проекты на стадии изучения уровня FS, но до начала строительства и добычи, и построенные и работающие горные предприятия.

Статистика, которая позволяет лучше понять риски горных проектов на разных стадиях, приведена J.P. Syles и A. Trench [9] в виде пирамиды статуса медных месторождений в мире. Авторы отмечают, что такое представление наиболее наглядно отражает «постепенный переход от большого числа проектов к нескольким, который имеет форму иерархии проектов или систему с последовательным отсевом».

В табл. 1 мы преобразовали результаты упомянутого выше исследования, приведя процент проектов на последовательных стадиях, чтобы проиллюстрировать структуру вероятности переходов между этапами развития горного проекта.

В работе, в частности, отмечается, что *«Помимо ожидаемого большого числа проектов, которые не переходят из стадии поиска или ранней ГРР в стадию продвинутых ГРР, как и следовало ожидать, значительное количество проектов также не переходят из стадии продвинутых ГРР в стадию предварительного Feasibility Study. Примерная доля таких проектов в данной выборке составила около 85 процентов, что больше, чем доля проектов, не перешедших со стадии ранних ГРР на этап продвинутых ГРР (около 75 %). Это говорит о том, что значительное число проектов прошли стадию продвинутой геологоразведки, но впоследствии оказались нерентабельными»*.

Другие исследования [10] приводят похожие данные, приведенные в табл. 2.

По данным AMC Consultants [11] примерно 25 % проектов, по которым подготовлены исследования уровня Feasibility Study, оказываются неудачными. Согласно исследованию McKinsey (2017) [12] только **20 %** проектов в горной отрасли, по которым было проведено исследование уровня Feasibility Study, впоследствии были построены согласно первоначальному плану, многие строились с многолетним отставанием от графика и заметно отличались по параметрам в сторону уменьшения показателей. По другим данным до 30 % горных проектов не переходят этап Feasibility Study, испытывая сложности с получением регуляторных разрешений, из-за технических проблем или из-за отсутствия финансирования.

Таблица 1

Статус проектов развития медных месторождений в мире

Стадия развития проекта	Строительство и добыча	FS	PFS	Продвинутый ГРР	Начальный ГРР
Число проектов на данной стадии развития	66	75	92	664	2,870
Доля проектов на данной стадии к числу проектов на предыдущей стадии, %	88	82	14	23	N/A

Таблица 2

Вероятность успеха на разных этапах изучения медных месторождений

Год	Год 1	Год 2	Год 3	Год 4	Год 5	Вероятность успеха, %
Квартал (Q)	Q1–Q4	Q1–Q4	Q1–Q4	Q1–Q4	Q1	
Первичный инжиниринг						50
Концепт-инжиниринг						70
Базовый инжиниринг						90
Производство						100

В табл. 3 мы иллюстрируем таксономию основных стадий проектов и методов их оценки в стандартах оценки стоимости горных компаний и проектов VALMIN, CIMVAL and SAMVAL.

Поясняя практические границы применимости расчетов NPV, P.F. Bruce [13] приводит следующие аргументы *«Сложно переоценить полезность метода NPV-DCF для сравнения стоимости различных перспективных объектов геологоразведки, особенно тех, которые имеют схожие технические и финансовые параметры. При этом неправильно использовать данный метод для разведочных объектов, для которых нет необходимых технических и коммерческих данных, необходимых для правильного применения метода. Любая попытка «изобрести» значение параметра для придания денежному потоку некоторого подобия реальности может ввести в заблуждение неопытного или неосведомленного человека. При этом грубая концептуальная модель денежных потоков, основанная на наилучших оценках будущих параметров минеральных ресурсов, является полезным методом для внутреннего использования при определении перспектив геологоразведочного объекта, чтобы оценить его «стоимость» или обосновать дальнейшие расходы на разведку. Метод NPV, применяемый к перспективному геологоразведочному объекту, позволит определить стоимость «того, что можно будет увидеть на объекте»*.

Нужно отдать должное, что, раскрывая информацию компании, оговариваются, что NPV в техническом отчете не отражает рыночной стоимости проекта, и часто иллюстрируют разницу между ними. Типичный пример – одна из презентаций компании West Red Lake, где результаты PFS проекта перезапуска Madsen Mine были описаны следующим образом: «При использовании в прогнозе долгосрочной цены золота в 2600 долл. США/унция Madsen Mine NPV проекта составит 496 млн долл. США. Компании на стадии Development часто оцениваются в ~0,4x стоимости их активов; компании на стадии производства часто оценивают в 0,7x–1,0x стоимости из активов. Рыночная капитализация компании WRLG сегодня составляет ~200 млн долл. США». Даже после возобновления работы рудника в мае 2025 г. рыночная капитализация осталась примерно такой же [14].

Почему NPV в исследованиях PEA, PFS, FS не отражают рыночную стоимость?

Для ответа на вопрос о причине существенного различия между NPV в исследованиях уровня PFS или FS и рыночной стоимости горного проекта важно учитывать, что Feasibility Study – это по сути маркетинговый продукт, подкрепленный результатами исследований и измерений. Его главная цель – «продать» проект акционерам. Поскольку у инвесторов часто на рассмотрении бывает не один и не два варианта для инвестирования, использование в подобных документах «единой» ставки вполне оправданно. Задача инвестора выбрать между двумя привлекательными вариантами, а не определить рыночную стоимость конкретного проекта.

Для того чтобы получить оценку рыночной стоимости, в расчете NPV должны использоваться предположения, соответствующие определению «рыночной стоимости», и данные, прямо или косвенно полученные с рынка [15]. Математически это выражается в требовании использовать для расчета NPV ожидаемые денежные потоки и ставку дисконтирования, отражающую риски денежных потоков данного проекта. Невыполнение этих условий при расчете NPV в исследованиях уровня Feasibility Study является основной причиной значительной разницы NPV и рыночной стоимости.

Риски горного проекта можно учесть в одном из двух или обоих ключевых параметрах расчета NPV – ожидаемых денежных потоках и ставке дисконтирования. В табл. 4 приведены примеры типичных способов отражения отдельных рисков при расчете NPV.

На рис. 1 представлена структура рисков проекта на стадии ГРР. Наличие оценки ресурсов или запасов проекта позволяет применить для его оценки мультипликатор к ресурсам или провести предварительный расчет с использованием денежных потоков при условии, что проведен достаточный объём исследований.

Необходимым условием должно быть использование ожидаемых денежных потоков и ставки дисконтирования, которая отражает риски проекта. При этом, как на стадии анализа уровня Pre-feasibility или Feasibility Study, когда компания может раскрыть запасы, не устраняет существенную часть рисков проекта, которые должны быть учтены при расчете рыночной

Таблица 3

Сопоставление стадий проектов и методов их оценки

Подход к оценке			Стадия проекта согласно соответствующему стандарту		
Сравнительный	Доходный	Затратный	VALMIN	CIMVAL	SAMVAL
ДА	НЕТ	ДА	Проекты на стадии ГРР	Проекты на стадии ГРР	Ранняя стадия ГРР
ДА	В отдельных случаях	В отдельных случаях	Проекты для стадии Development (Pre-Development Projects)	Проекты с оцененными минеральными ресурсами	Продвинутая стадия ГРР
ДА	ДА	НЕТ	Проекты с оцененными ресурсами или запасами до начала строительства и добычи (Development Projects)	Проекты с оцененными ресурсами или запасами до начала строительства и добычи (Development Projects)	Проекты с оцененными ресурсами или запасами до начала строительства и добычи (Development Projects)
ДА	ДА	НЕТ	Проекты, где ведется добыча	Проекты, где ведется добыча	Проекты, где ведется добыча

стоимости проекта с использованием NPV. Неучет таких рисков и есть основная причина, по которой рыночная оценка на основе мультипликаторов к рыночной капитализации наиболее сопоставимых проектов не совпадает с NPV, показываемых в публичной отчетности компаний.

Учитывая практику использования «стандартизованных» ставок дисконтирования в исследованиях уровня Feasibility Study для горных проектов на стадии до начала строительства и проектирования, аналитики отрасли применяют поправку к расчетам NPV (точнее Net Asset value, основная часть которого содержится в NPV). Пример того, как они связывают NPV (или техническую стоимость) и рыночную стоимость, которую отражает рыночная капитализация горных компаний, показан на рис. 2, приведенном консультантами SRK [16].

Инвестбанк BMO [17] так описывает использование мультипликатора P/NAV. «Мы применяем целевые мультипликаторы NAV к каждому активу анализируемых компаний, основываясь на нашей оценке риска актива, включая риск строительства/ввода в эксплуатацию, производственный риск, геополитический риск и т.д. Мы также учитываем возможности развития актива, включая потенциал продления срока службы рудника. Применяемые нами мультипликаторы варьируются от 0,0 до 0,1x для проектов на ранних стадиях, для почти выработанных рудников или проектов с повышенным риском, и до 1,0x для зрелых и стабильно работающих рудников или плавильных предприятий».

Практической проблемой использования поправки P/NAV для оценки рыночной стоимости являются его непрозрачность и ненаблюдаемость, а также тот факт, то это «интегральная» поправка, которая применяется к NPV, а не к двум его ключевым элементам – денежным потокам и ставке дисконтирования.

В исследованиях уровня Feasibility Study часто используется базовый сценарий, однако сложно утверждать, что его предположения соответствуют определению ожидаемого денежного потока для непостроенного и не начавшего добычу проекта. Косвенным подтверждением этого несоответствия является отсутствие вероятностных корректировок в расчётах NPV в исследованиях уровней PEA, PFS и FS.

Таблица 4

Способы отражения различных рисков при расчете рыночной стоимости с использованием NPV

Вид риска	Лучше моделируется	Комментарий
Систематические/Рыночные	Ставка дисконтирования	Ожидаемая доходность и доходность альтернативы
Стоимость денег во времени и инфляция	Ставка дисконтирования	Расчет текущей стоимости
Финансовые риски	Ставка дисконтирования	Дополнительная премия для учета неопределенности
Операционные/проектные риски	Денежные потоки	Требует поправок на ожидаемые изменения или непредвиденные затраты
Технические и регуляторные риски	Денежные потоки	Задержки, неудачи, превышения затрат

Рис. 1. Ключевые факторы и риски при оценке проекта на ранней стадии ГРР

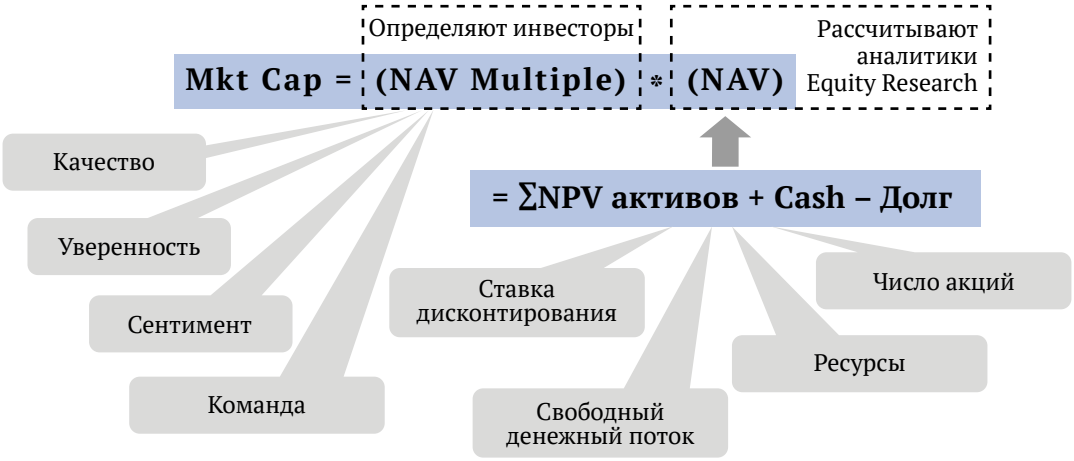


Рис. 2. Соотношение между рыночной капитализацией и NPV

В некоторых случаях риски денежных потоков пытаются компенсировать ставкой дисконтирования, увеличивая ее, исходя из представления, что для рисков выше среднего и ставка должна быть выше при прочих равных. Интуитивно понятная логика крайне субъективна и не подкреплена академическими исследованиями, позволяющими оценить размер поправки.

Расчеты NPV в отчетах PEA, PFS, FS, как правило, используют некоторую референтную нормативную ставку, без учета состояния проекта и его реальных рисков. Можно обсуждать, насколько ставка в 5 % в реальном выражении соответствует стоимости капитала и отражает риски действующего золотого рудника, но такая ставка явно выглядит спорной для горного предприятия, которое еще не начало строиться.

Проекты на ранней стадии – поисковые работы и ГРР в начальной фазе – характеризуются максимальной неопределенностью и крайне ограниченным объемом информации, полученной в ходе изучения объекта. Признавая невозможность надежно оценить стоимость проекта на таком этапе, инвесторы предпочитают отложить решение о его оценке до момента, когда появятся дополнительные данные. Типичный метод инвестирования на этой стадии – делить риски (затраты), закрепив право на последующую более надежную оценку в опционном соглашении в формате farm-in. Расчет NPV в такой фазе проекта не рекомендован ни одним стандартом оценки горных активов и компаний.

Добывающие рудники с установившимся объемом добычи и продаж, а также крупные компании с несколькими рудниками могут относительно надежно оцениваться на основании прогнозов денежных потоков или мультипликаторов публичных компаний, хотя уникальность горных проектов и относительно небольшой размер рынка публичных компаний отрасли и в этом случае ограничивают надежность сравнительного анализа. И здесь у участников рынка существует консенсус.

Основную сложность представляет оценка проектов на стадии PFS или FS, где не началось строительство горного предприятия и не ведется добыча.

Оценка рыночной стоимости проектов и компаний на стадии до начала строительства и добычи

Вероятность проекта дойти до стадии добычи и выйти на ожидаемые показатели можно учесть в денежных потоках, ставке дисконта как в потоках, так и в ставке, или через интегральную поправку, упомянутую выше P/NAV.

Для расчета NPV в исследованиях проектов по добыче золота уровня Feasibility Study наиболее часто в качестве «базовой» используется реальная ставка дисконтирования 5 % (соответствует 7 % номинальной, т.е. с учетом инфляции). Lawrence Devon Smith [18] приводит результаты опросов горных компаний, проведенных в разные годы секцией Экономики горной отрасли CIM с целью выяснить практику отрасли при выборе ставки дисконтирования для проектов на разных стадиях. Респондентов просили дать оценки ставки в реальном выражении (рис. 3). Жирные линии соответствуют математическим средним по всем ответам, прерывистые – показывают диапазон ответов в плюс/минус одно стандартное отклонение. Стоит отметить, что результаты формируют достаточно широкие диапазоны значений.

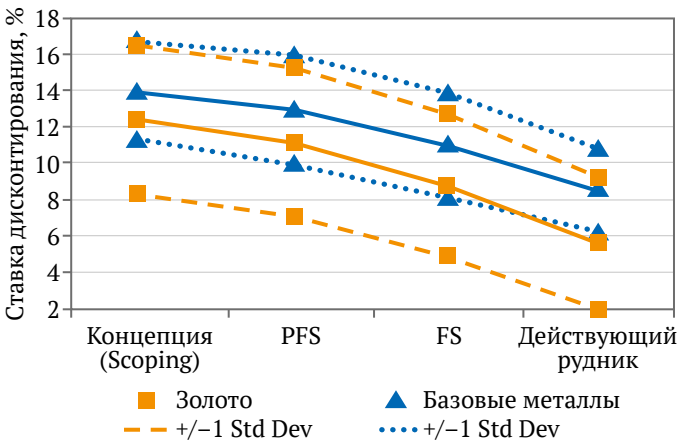


Рис. 3. Ставка дисконтирования для денежных потоков в реальном выражении для проектов на разных стадиях

Таблица 5

Поправки к базовой ставке дисконтирования для разных стадий проекта

Премия к дисконту для действующего рудника	FS, %	PFS, %	PEA/Scoping, %
Золото	3,3	5,7	6,9
Базовые металлы	2,5	4,5	5,5

В исследовании также приведены средние поправки к «базовой» ставке WACC, рассчитанной для действующего рудника, которые применимы для оценки проектов на разных стадиях изученности. Они приведены в табл. 5.

Стоит отметить, что мы приводим данные опросов исключительно как дополнительную иллюстрацию ожиданий участниками рынка отрицательной корреляции между риском определенной стадии проекта и ставкой дисконтирования для оценки его стоимости. G.A. Davis [19] критиковал практику использования ставки дисконтирования как вместилища всех и всяких рисков. Неопределенность конкретного проекта правильно моделировать непосредственно в денежных потоках, не добавляя в ставку дисконтирования «специфические» премии, лишенные как теоретического обоснования, так и практического способа калибровки.

Практики корпоративных финансов в качестве стоимости капитала используют средневзвешенную стоимость капитала (WACC):

$$WACC = R_e \cdot \frac{E}{E+D} + R_d \cdot (1-T) \cdot \frac{D}{E+D},$$

где R_e – стоимость собственного капитала; $E/(E+D)$ – доля собственного капитала; R_d – стоимость долгового финансирования; $D/(E+D)$ – доля долгосрочного долга; T – ставка налога на прибыль.

Для расчета стоимости собственного капитала относительно небольших компаний, как правило, используют модифицированную модель CAPM:

$$R_e = (R_f + CRP) + \beta \cdot ERP + SP,$$

где R_f – безрисковая ставка; CRP – премия за страновой риск; β (Beta) – коэффициент, отражающий связь риска актива со среднерыночным риском; ERP – средняя по рынку премия за риск сверх безрисковой ставки; SP (size premium) – премия за риск, связанный с размером компании.

В качестве иллюстрации ниже мы приводим пример того, как изменился бы результат расчета NPV для проекта Twin Hills, разрабатываемого компанией Osino Resources в Намибии, если в нем оставить предположение о денежных потоках, но поменять ставку дисконтирования, определенную традиционным для финансовых моделей способом, используя модифицированный вариант CAPM для расчета стоимости акционерного капитала.

Наш расчет выполнен по состоянию на июнь 2023 г., дату, на которую компания подготовила технический отчет FS по стандартам NI43-101 (названный компанией DFS – Definitive Feasibility Study) [20]. В исследовании DFS компания приводит расчет NPV проекта в реальных ценах с использованием базового предположения о цене золота в 1750 долл. США за унцию и ставки дисконтирования в 5%, который показал NPV в 480 млн долл. США. Справочно также приведено значение NPV при использовании цены золота в 1950 долл. США за унцию, которое составило 656 млн долл. США. Цена золота в июне 2023 г. находилась в диапазоне 1910–1970 долл. США за унцию, долгосрочный консенсус-прогноз цены на горизонте в 5–7 лет составлял примерно 1500 долл. США за унцию.

Для определения ставки дисконтирования в иллюстративном расчете мы сделали следующие предположения:

R_f – поскольку прогноз денежных потоков в DFS приведен в долларах США, в качестве безрисковой ставки используется доходность 10-летних казначейских облигаций США, составлявшая на дату анализа 3,7 %.

CRP – страновая премия, как правило, определяется на основании разницы доходности государственных облигаций США и долларовых еврооблигаций конкретной страны (если доступны) или стран с аналогичным с рассматриваемой страной кредитным рейтингом. Согласно данным проф. Дамодарана страновая премия за риск для Намибии в 2023 г. составляла 5,5%.

ERP – премия за риск инвестирования в акции, R_m–R_f (Equity Risk Premium, «ERP»), представляет собой разницу между доходностью, ожидаемой от инвестиций в диверсифицированный портфель акций, и доходностью вложения в безрисковые ценные бумаги. Премию за риск инвестирования в акции можно рассматривать как оценку инвесторами дополнительного риска акций как класса инвестиционных активов. Согласно данным Kroll на середину 2023 г. ERP составляло 5,5%.

Beta – величина коэффициента Beta связана с риском, характерным для компании (или отрасли), относительно среднерыночного риска. Указанный коэффициент представляет собой корреляцию между изменениями цен на акции компании (или типичного предприятия отрасли) по отношению к изменениям средних биржевых цен на рынке в целом.

Поскольку измерение величины Beta для конкретной компании может быть сопряжено со значительным шумом, на практике, как правило, рассматривают средние беты для репрезентативной выборки компаний отрасли. Согласно данным проф. Дамодарана средний коэффициент Beta для золотодобывающих компаний составляет 1,17. Среднее значение получено для выборки компаний, которая включает крупнейшие добывающие компании с показателем Beta заметно ниже единицы и юниорные компании, ведущие геологоразведку, для которых этот показатель заметно превышает среднее значение.

Эмпирически установлено, что для компаний любой отрасли показатель Beta растет по мере снижения размера компании. Проведенный нами анализ юниорных золотодобывающих компаний показал, что значение Beta для них начинает заметно расти

у компаний, входящих в 8–10-й дециль по размеру, т.е. имеющих капитализацию менее 1 млрд долл. США. Данная зависимость наглядно иллюстрируется на рис. 4. Более низкие значения для компаний 9-го дециля объясняются структурой выборки, где на этот диапазон капитализации приходится существенная доля компании с уже действующими рудниками, т.е. со значительно сниженными рисками.

Среднее значение показателя Beta для компаний выборки, относящихся к 9–10-му децилям, составило 1,5.

SP – премия за размер, это дополнительная поправка для учета доходности, ожидаемой инвесторами в компании малого размера, сверх той, что учитывает Beta актива.

Публичные юниорные компании, не начавшие добычу, имеют рыночную капитализацию ниже 500 млн долл. США, т.е. относятся к сегменту микрокапитализации. Премия за размер, рассчитываемая компанией Kroll, для компаний такого размера составляет 2,9 %, а для компаний с рыночной капитализацией менее 200 млн долл. США – 4,7%.

Таким образом, стоимость собственного капитала Osino Resources может быть рассчитана как

$$R_e = 3,7\,\% + 5,5\% + 1,5 \cdot 5,5\% + 2,9\% = 20,4\,\%.$$

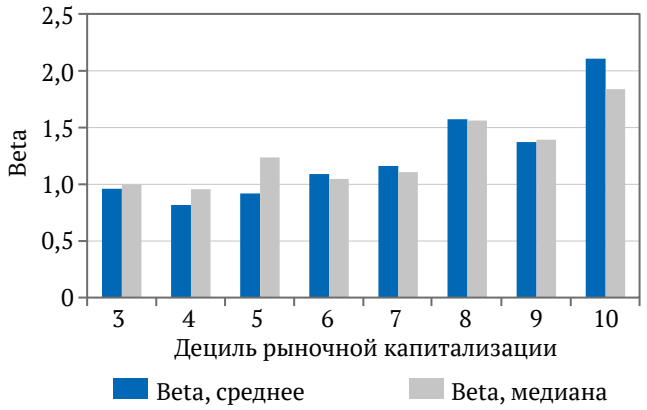


Рис. 4. Beta для выборки юниорных компаний с учетом децилей капитализации

С учетом характерной для компаний отрасли доли долга в структуре капитала и стоимости долга WACC для Osino Resources может составлять примерно 18 % в номинальном выражении или 16 % в реальном. Из расчета видно, насколько рассчитанная выше ставка дисконтирования отличается от использованной в отчете DFS для расчета NPV реальной ставки в 5 %.

Расчет NPV с использованием реальной ставки в 16 %, рассчитанной выше с помощью модифицированного CAPM с учетом премии за размер и вероятностной поправки в 88 % для стадии FS, дает значение NPV в 150 млн долл. США.

На момент выпуска отчета DFS по проекту Twin Hill в середине 2023 г., в котором базовый NPV при ставке дисконтирования WACC в 5 % был рассчитан равным 464 млн долл. США, капитализация компании составляла всего 134 млн долл. США, или примерно 30 % от расчетного NPV. При общих ресурсах золота в 3,19 млн унций и стоимости компании (EV) в 132 млн долл. США рыночная оценка составляла 42 долл. США за унцию.

Отметим, что рыночная стоимость была гораздо ближе к результату расчета с помощью Rule of Thumb (другое название Yardstick Metod) в 129–172 млн долл. США. Этот метод эмпирических коэффициентов, определяемых на основе транзакций с золотыми активами, обычно лучше работает для ресурсных проектов на более ранних стадиях, но может использоваться как дополнительная проверка расчета NPV горных проектов до начала строительства [21, 22].

Динамика рыночной капитализации компании приведена на рис. 5. Пунктиром показаны даты опубликованных компанией исследований PEA (август 2021 г.), PFS (сентябрь 2022 г.) и DFS (июнь 2023 г.).

Динамика цены акций показывает, что публикация DFS существенно не изменила мнение рынка о стоимости проекта Twin Hills. Такой вывод согласуется с типичным для горных проектов профилем эмпирической кривой стоимости, так называемой «Lassonde Curve» [23], когда в период «безвременья» (orphan period), пока не найдется инвестор, готовый реализовать проект, или до того, как такое решение примет текущий владелец, стоимость проекта, как правило, снижается.

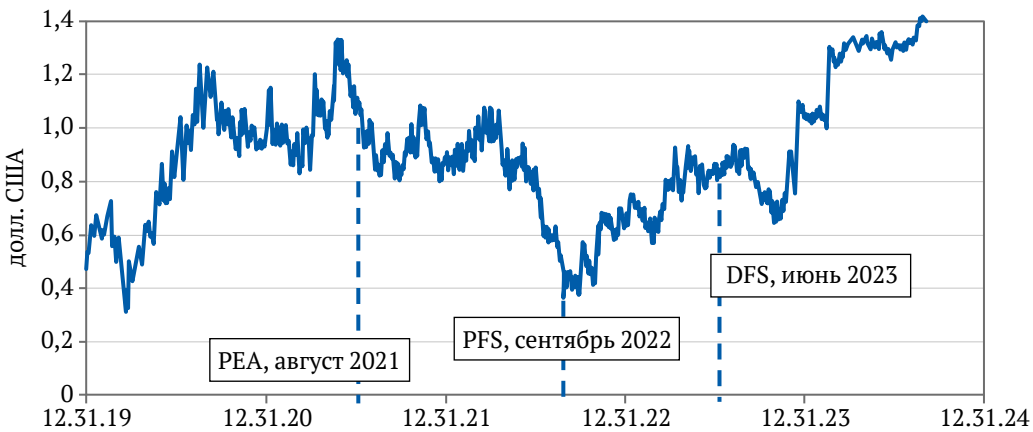


Рис. 5. Цена акций Osino Resources, долл. США

В декабре 2023 г., через полгода после выпуска отчета FS, Dundee Precious Metals сделала предложение о покупке компании Osino Resources, владевшей проектом Twin Hill, за 214 млн долл. США, с премией в 44,3 % к рыночной капитализации компании Osino Resources [24]. В феврале 2024 г. китайская Shanjin International Gold Co., Ltd. (ранее компания называлась Yintai Gold Co., Ltd.) сделала еще более выгодное предложение и стала единственным владельцем проекта за 272 млн долл. США [25]. После чего покупатель провел делистинг Osino Resources с биржи в Торонто.

Как мы видим, даже с учетом значительной премии над рыночной капитализацией в конкурентном соревновании за контроль, цена, предложенная покупателем, все равно оказалась существенно ниже значения NPV, приведенного в DFS, и составила только примерено 60 % от него.

Основной вывод приведенного в данной работе анализа состоит в том, что использование традиционных методов определения ставки дисконтирования, используемых в практике финансового анализа, позволяет получать адекватные оценки горных проектов, не достигших стадии строительства и добычи. Отметим, что такие ставки должны использоваться вместе с ожидаемыми денежными потоками. Для проектов на стадии исследования Feasibility Study и более ранних стадиях PEA и Pre-Feasibility Study это предполагает использование потоков с поправкой на вероятность достижения стадии строительства и добычи.

В качестве дополнительной проверки обоснованности результата расчета NPV проектов на стадиях до начала строительства полезным оказывается использование эмпирического правила Rule of Thumb, выводы которого часто хорошо согласуются с рыночными оценками.

Выводы

Проведенный анализ горных проектов, по которым проведены исследования уровня Feasibility Study, но не построено горное предприятие и не ведется добыча, позволяет лучше понять причину систематического отличия NPV в технических отчетах публичных компаний от рыночной стоимости проектов, оцениваемой с использованием их рыночной капитализации.

Профессиональному сообществу и самим компаниям, раскрывающим информацию для инвесторов, необходимо более детально пояснять различия двух метрик стоимости – NPV и рыночной стоимости, поскольку не все пользователи имеют достаточный опыт работы в горной отрасли и нередко неправильно интерпретируют их. При этом рыночная капитализация и волатильность цены акций служат достаточно информативными индикаторами стоимости и рисков проектов на разных этапах их изучения и развития.

Предложенный подход к анализу стоимости горной компании или проекта до этапа строительства позволяет учесть риски проекта на данной стадии, тем самым повысить надежность оценки его рыночной стоимости. Мы показали, что несмотря на специфику отрасли использование в расчете NPV ожидаемых денежных потоков и традиционных методов расчета ставки дисконтирования (CAPM) позволяет получить адекватную оценку проекта, которая согласуется с выводами сравнительного анализа.

Список литературы / References

1. JORC. JORC Code: Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (Draft for Public Comment, 1 August 2024). URL: https://www.jorc.org/docs/Draft_JORC_Code_01Aug2024_readonly.pdf
2. Samis M., Martinez L., Davis G.A., Whyte J.B. Using dynamic DCF and real option methods for economic analysis in NI43-101 technical reports. URL: https://inside.mines.edu/~gdavis/Papers/ValMin.pdf
3. Samis M. Exploration value differentials. Understanding the value differential attached to early-stage exploration projects. Presented at: IMVAL: Perspectives on Mineral Valuation; 2021 May 13. URL: https://imval.org/uploads/presentation/2021-05-13/Slides/IMVAL_May2021_Samis-Slides.pdf
4. Ovalle A. Analysis of the discount rate for mining projects. In: Castro R., Báez F., Suzuki K. (eds.) *MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition*. Mass Mining, University of Chile, Santiago, 2020. Pp. 1048–1064. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2063_76
5. TriStar Gold Updates Economics of PFS with After-Tax 40% IRR and US$603 Million NPV5 and Provides Update on Permit. URL: https://finance.yahoo.com/news/tristar-gold-updates-economics-pfs-110000667.html
6. Frontier Lithium Inc. Corporate Presentation: Building North America's highest quality source of lithium. URL: https://www.frontierlithium.com/_files/ugd/dec7de_bb60250af14744c9b41b6b36c3890d26.pdf
7. Dixit A.K., Pindyck R.S. *Investment under uncertainty*. Princeton University Press; 1994.
8. Categories of Mineral Properties. In: *The CIMVAL Code for the Valuation of Mineral Properties*. Prepared by the Special Committee of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum on the Valuation of Mineral Properties (CIMVAL).
9. Sykes J.P., Trench A. Resources versus reserves – towards a systems-based understanding of exploration and mine project development and the role of the mining geologist. In: *Ninth International Mining Geology Conference*. Adelaide, SA, 18–20 August 2014. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5083.5600
10. McCarthy P. Why feasibility studies fail. URL: https://www.amcconsultants.com/experience/why-feasibility-studies-fail

11. Dussud M., Kudar G., Lounsbury P., et al. *Optimizing mining feasibility studies: The $100 billion opportunity*. URL: https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/optimizing-mining-feasibility-studies-the-100-billion-opportunity#/
12. Méndez M. Real options valuations of the license of a copper mine. In: *FFM 2011*. (Revised September 2013). ESIC Business and Marketing School, Madrid, Spain. https://doi.org/10.2139/ssrn.2708352
13. Bruce P.F., Clarke D.E., Bucknell W.R. The company perspective on valuation methods for exploration properties. In: *Mineral Valuation Methodologies Conference*. Sydney. 27–28 October 1994
14. West Red Lake Gold shares jump on Madsen restart. URL: https://www.mining.com/west-red-lake-gold-shares-jump-on-madsen-restart/
15. *International Valuation Standards Council*. IVS 104: Bases of value. Para 30.5. In: International Valuation Standards. 2022.
16. Robson D.M. *What does it mean to create value in the mining industry*? CIM MES Discussion Group, Toronto. January 31, 2018.
17. *Initiating at outperform (speculative): where does the value go?* Turquoise Hill Resources, BMO Capital Markets. January 4, 2021. P. 35.
18. Smith L.D. *Mineral economics – risk adjusted cash flows: discount rates*. Risk & Long-Life Projects; 2013.
19. Davis G.A., (Mis)Use of Monte Carlo simulations in NPV analysis. *Mining Engineering*. 1995;47(2):75–79.
20. Armstrong R., Aucamp P.-J., Doundarov G., et al. *Definitive feasibility study of the Twin Hills Gold Project, Namibia*. National Instrument 43-101 Technical Report. URL: https://osinoresources.com/wp-content/uploads/2023/07/Osino-DFS.pdf
21. Roscoe W.E. Metal transaction ratio analysis – a market approach for valuation of non-producing properties with mineral resources. In: *VALMIN Seminar Series 2011–2012*. Perth, Western Australia, 18 October 2011. 17 April 2012, Brisbane, Queensland. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy; 2012.
22. Araujo C.P. Valuation of mineral and coal assets. Presented at: *SMEDGE Conference*. 24 January, 2019.
23. *The Lassonde curve – understanding the mining life cycle*. SmallCapInvestor; 2023. URL: https://smallcapinvestor.ca/the-lassonde-curve-understanding-the-mining-life-cycle/
24. *Dundee to acquire Osino in $214m deal.* Mining Technology; 2023. URL: https://www.mining-technology.com/news/dundee-acquire-osino-214m-deal/
25. *Yintai to acquire Osino Resources in $272m deal*. Mining Technology; 2024 URL: https://www.mining-technology.com/news/yintai-osino-resources/

Информация об авторах

Александр Николаевич Лопатников – управляющий партнер, ООО «ААР», г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-8267-4732; e-mail alopatnikov@aarcapital.com

Александр Юрьевич Румянцев – CFA, директор, финансовый анализ и оценка, ООО «ААР», г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0009-0007-4427-2269; e-mail arumyantsev@aarcapital.com

Information about the authors

Alexander N. Lopatnikov – Managing Partner, AAR LLC, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-8267-4732; e-mail alopatnikov@aarcapital.com

Alexander Yu. Rumyantsev – CFA, Director of Financial Analysis and Valuation, AAR LLC, Moscow, Russian Federation; ORCID 0009-0007-4427-2269; e-mail arumyantsev@aarcapital.com

Поступила в редакцию	26.06.2025	**Received**	26.06.2025
Поступила после рецензирования	28.07.2025	**Revised**	28.07.2025
Принята к публикации	01.08.2025	**Accepted**	01.08.2025