№10 (258) 2026

научно-технический и производственный

ГОРНЫЙ
ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА

УЧРЕДИТЕЛЬ И СОБСТВЕННИК
ТОО «Научно-производственное предприятие «ИНТЕРРИН»

INTERRIN

зарегистрирован Министерством культуры и информации Республики Казахстан 04.04.2013 г. Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания 13508-Ж.

Издается с января 2003 г.

Приказом **№ 603 от 12.07.2024 г.** Комитета по контролю в сфере образования и науки МОН РК внесен в перечень научных изданий, рекомендуемых для публикации основных результатов научной деятельности.

В журнале публикуются материалы, отражающие состояние и перспективы развития геологии, горного дела и металлургии не только в нашей стране, но и за рубежом. Журнал освещает проблемы охраны труда и техники безопасности, экономики, подготовки кадров и других вопросов, связанных с горно-металлургическим комплексом. В журнале представлены статьи прикладного характера, результаты фундаментальных исследований, служащие основой для новых технических разработок.

*При перепечатке материалов ссылка на **Горный журнал Казахстана** обязательна. Ответственность за достоверность сведений в публикуемых статьях и рекламных материалах несут авторы и рекламодатели. Мнение редакции не всегда может совпадать с мнением авторов.*

Адрес редакции:
050026, г. Алматы, ул. Карасай батыра, 146, оф. 401,
+7 (747) 343-15-02
minmag.kz

Представитель журнала на специализированных мероприятиях – Общество с ограниченной ответственностью «Маркетинг от Тимченко»

Представители журнала:

Республика Узбекистан –
ШЕРЗОД ВАФО-ОГЛЫ КАРИМОВ
karimov20-13@mail.ru

Российская Федерация, Сибирский регион –
ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ ШАПОШНИК
shaposhnikyury@mail.ru

Периодичность 12 номеров в год

Тираж 1500 экземпляров

ISSN 2227-4766

Подписной индекс **75807** в каталогах:
АО «Казпочта»,
ТОО «Агентство «Евразия пресс»

Подписано в печать **30.10.2026 г.**

Отпечатано:
«Print House Gerona»
ул. Сатпаева 30А/3, офис 124
тел: + 7 727 250-47-40,
+ 7 727 398-94-59,
факс: + 7 727 250-47-39

Главный редактор
М.Ж. БИТИМБАЕВ, *mbitimbaev@mail.ru*

Заместитель гл. редактора
Л.А. КРУПНИК, *leonkr38@mail.ru*

Заместитель гл. редактора
Х.А. ЮСУПОВ, *yusupov_kh@mail.ru*

Ответственный редактор
Т.С. ДОЛИНА, *Tatyana.Dolina@interrin.kz*

Редакционная коллегия:

Барменшинова М.Б., канд. техн. наук, ассоц. профессор

Бекботаева А.А., PhD, ассоц. профессор

Бондаренко В.И., д-р техн. наук, профессор (Украина)

Vach K., доктор Ph.D (Чехия)

Демин В.Ф., д-р техн. наук, профессор

Каримов Ш.В., PhD, и.о. доцента кафедры (Узбекистан)

Кожогулов К.Ч., д-р техн. наук, профессор, засл. деятель науки КР, академик (Кыргызская Республика)

Levin E., доктор Ph.D, ассоц. профессор (США)

Mishra B.M., профессор (США)

Молдабаев С.К., д-р техн. наук, профессор

Nikoloski A.N., профессор (Австралия)

Петров Е.А., д-р техн. наук, профессор (Россия)

Ратов Б.Т., д-р техн. наук, профессор

Рысбеков К.Б., канд. техн. наук, профессор

Sladkovsky A., д-р техн. наук, профессор (Польша)

Столповских И.Н., д-р техн. наук, профессор

Тамбиев П.Г., канд. техн. наук

Хайитов О.Г., д-р геол.-минерал. наук, профессор, академик (Узбекистан)

Чепуштанова Т.А., доктор Ph.D, канд. техн. наук, профессор

Yeneneh A.M., ассоц. профессор (Оман)

© Горный журнал Казахстана 2003-2026

Содержание

® – статья на правах рекламы
ⓘ – информационное сообщение
– статья публикуется в авторской редакции

4 **Горные предприятия в поисках эффективности**

Геотехнология

*А. М. Габитова, *З. Ж. Абдрашева, З. К. Тунгушбаева, Е. А. Абеуов*
6 **Байыту қалдықтарын жоғары тығыздықта дайындау және қазылған кеңістікті толтыруға қолдануды ғылыми-техникалық негіздеу**
*А. А. Бояндинова, *Ж. А. Адилханова*
13 **Методология диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров на базе цифровых технологий**
**Zh. S. Kenzhetaev, M. K. Kylyshkanov, T. B. Yelemessov, R. G. Temirkhanova*
20 **Desilication of macroporous anion-exchange resins using hydrofluoric acid in uranium hydrometallurgy**

Геология

*Л. Д. Исаева, Б. Б. Амралинова, К. С. Тогизов, *Ж. Б. Досымбекова*
29 **Петроплотностная аномалия в среде отложения шеелита на месторождении Баян**

Геодезия

*Д. Ж. Рахимбаева, *Д. А. Шоганбекова, А. А. Алтаева*
35 **Использование ГИС и дистанционного зондирования для мониторинга береговой линии Северного Каспия в интересах освоения нефтегазовых месторождений**

Геомеханика

*С. С. Шерубаев, Р. К. Жанакова, Ж. Б. Тошов, *М. А. Сарыбаев*
42 **Закономерности изменения напряженно-деформированного состояния целиков при отработке наклонных залежей**
*Р. А. Мусин, Д. Р. Ахматнуров, *А. Н. Есендосова, Н. М. Замалиев*
46 **Геомеханическое обоснование параметров анкерного крепления подготовительных выработок Карагандинского угольного бассейна**
*N. Kerimbayeva, G. M. Zhunis, *D. T. Ivadilinova, A. R. Abdiev*
52 **Current state of research on the geomechanical conditions of rock masses during the deepening of open-pit mining operations**

Металлургия

**Р. Т. Төлеуқадыр, А. Қ. Смағұлов, Ж. О. Садық, О. В. Заякин*
58 **Прямое легирование стали хромом в индукционной печи методом металлотермического восстановления**

Обогащение полезных ископаемых

*А. Р. Мамбеталиева, *А. Ж. Танабаева, Т. А. Карабалаев, Ю. П. Морозов*
64 **Оценка технологической эффективности гравитационного обогащения окисленных свинцово-цинковых руд месторождения Коскудук**

Охрана труда и безопасность в горной промышленности

*Г. Ю. Абдугалиева, А. О. Орсаринова, *С. О. Хусаинова, Т. Ж. Саукен*
70 **Уранды жерасты ұңғымалық сілтілеу әдісімен өндіру кезіндегі апаттық жағдайларды сценарийлік талдау**

Нефтегазовое дело

**Д. С. Садуакасов, Р. У. Баямирова, А. Р. Тогашева, Р. Т. Асылбек*
76 **Комплексный подход к оптимизации заводнения на поздней стадии разработки многопластовых залежей (на примере 3-го блока месторождения Узень)**

Юбилеи

83 **К 75-летию Низаметдинова Фарита Камаловича**
84 **К 55-летию Милетенко Натальи Александровны**

5 ГОРНОРУДНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ УЗБЕКИСТАНА И ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

ЮБИЛЕЙНЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС

1–2 ДЕКАБРЯ 2026, ТАШКЕНТ, УЗБЕКИСТАН

VOSTOCK CAPITAL
24 года динамичного успеха

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

MINISTRY OF MINING INDUSTRY AND GEOLOGY OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN
МИНИСТЕРСТВО ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ГЕОЛОГИИ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ЗОЛОТОЙ СПОНСОР:

METTLER TOLEDO
Your Partner in Precision™

ЛОГИСТИЧЕСКИЙ ПАРТНЕР:

DBF Lojistik Anonim Şirketi

СРЕДИ ДОКЛАДЧИКОВ И ПОЧЕТНЫХ ГОСТЕЙ



Гулбахор Тожимирзаева

председатель,
Ассоциация металлургии Узбекистана



Zehra Zeynep Dereli

генеральный директор,
ODAŞ CA



Leyla Keser

председатель,
TETHYS Gateway Trading LLC



Céleste Laporte Talamon

аналитик по вопросам политики,
Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)



Сергей Руднев

главный геолог,
Навоийский горно-металлургический комбинат (НГМК)



Кубаныч Молдобеков

директор рудника,
Кумтор



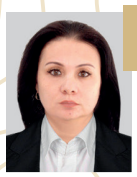
Тимур Хикматуллаев

директор департамента,
Узбекский комбинат технологических металлов



Гульвира Шаймерденова

директор департамента по связям с государственными органами,
АО Qarmet



Шахноза Абдуллаева

ведущий инженер сектора по координации и проведению тендерных торгов, заключению, экспертизе и регистрации контрактов,
Алмалыкский горно-металлургический комбинат (АГМК)

СРЕДИ ПОСТОЯННЫХ УЧАСТНИКОВ

orano | O'ZBEKKO'MIR | odaş | NKMK Navoiy Kon-Metallurgiya Kombinati | "OLMALIQ KON-METALLURGIYA KOMBINATI" AKSIYADORLIK JAMIYATI | NAVOIYURAN State-owned Enterprise

WWW.MININGUZ.COM

events@vostockcapital.com

ГОРНЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ В ПОИСКАХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

По данным PwC в обзоре Mine 2026, совокупная выручка 40 крупнейших по капитализации горнодобывающих компаний мира в 2025 году выросла на 3,3%, до $909 млрд. Улучшение финансовых результатов связываются с ростом цен на ряд металлов, а также с повышением операционной эффективности и контролем затрат. Благоприятная конъюнктура поддерживает доходы, однако дальнейшее развитие требует работы с производительностью самих предприятий.

Рост доходов горнодобывающих компаний не снимает вопроса об эффективности производства. Предприятиям приходится одновременно учитывать стоимость энергии, износ техники, доступность персонала и изменение характеристик сырья. Потери на каждом участке увеличивают себестоимость конечной продукции. Поэтому предложения участников сентябрьской Mining and Metals Central Asia 2026 в Алматы интересны прежде всего тем, как они связывают отдельные операции в производственную цепочку.

Общие ограничения проявляются по-разному. При работе с бедными рудами для прежнего выпуска требуется переработать больше сырья. На угольном разрезе результат зависит в том числе от согласованности выемки, транспортировки и отгрузки. На обогатительной фабрике увеличение подачи может оказаться бесполезным без подходящего технологического режима. Универсального оборудования для этих задач нет, зато у заказчиков есть общий критерий — затраты на единицу товарной продукции с учетом простоев и обслуживания.

Для заказчика отсюда следует практический вопрос: где дополнительное вложение даст больший эффект — в пропускной способности, ресурсе оборудования или извлечении.

Производительность оборудования и ресурс техники

Интерес к системному подходу у казахстанских клиентов отмечает Гидо Хессе из **FAM Minerals & Mining**, входящей в BEUMER Group. По его словам, намечается тенденция к спросу на современные системные решения с соответствующими гарантиями производительности и в меньшей степени — на стандартное оборудование. Для поставщика это означает необходимость показать, как оборудование будет работать в составе единой системы, а заказчику — заранее определить, каких производственных результатов он ожидает от инвестиции.



На MMCA 2026 FAM Minerals & Mining представила внутрикарьерные системы дробления и конвейерной транспортировки IPCC, складские комплексы и цифровые решения. Их экономика оценивается в общей цепочке: дополнительная мощность дробления останется невостребованной, если транспортировка не справляется с потоком. Компания работает и с модернизацией установленной техники. Замена одного узла может потребовать пересмотра режимов смежных участков.



Повысить эффективность можно и за счёт увеличения срока службы деталей карьерной техники — кузовов, ковшей и футеровки. Шведская компания **SSAB** представила на выставке износостойкую сталь Hardox 500 Tuf, сочетающую твердость и ударную вязкость, и Hardox HiAce для условий коррозионного износа. Применение первой позволяет облегчить конструкции ради увеличения полезной нагрузки при сохранении необходимых эксплуатационных свойств. Вторая предназначена для сред, в которых к абразивному воздействию добавляется коррозия.





Представитель компании Хосе Ровира связывает перспективы новых марок стали в Центральной Азии с потребностью в защите от износа и коррозии. При выборе материала важно оценивать совокупные затраты за весь период эксплуа-

тации детали — от закупки и изготовления до обслуживания и замены, включая потери от простоев техники.

Технология под конкретное сырье

На обогатительной фабрике сопоставлять приходится уже свойства сырья, расход реагентов и извлечение. Flotent Chemicals представила на выставке новинку — гидроксаматы для смешанных и окисленных руд. По данным компании, в ряде случаев их применение позволяет повысить извлечение на 15–20% по сравнению с другими реагентами. Эффект на конкретной фабрике требует испытаний на ее сырье и предварительной проверке при переходе к непрерывному производству.



Flotent Chemicals также представила реагенты для обогащения угля, пылеподавления и борьбы со смерзанием. Такие решения помогают работать с потерями на разных этапах переработки, хранения и транспортировки сырья.



«Наша команда не только подбирает подходящую марку под уникальные особенности конкретного производства, но и обеспечивает полную технологическую поддержку внедрения», — отмечает генеральный директор Flotent Chemicals Алексей Марфицин. Компания сопровождает заказчика на всех ключевых этапах от лабораторных исследований до отработки технологии на площадке.

Сервис как часть производственного результата

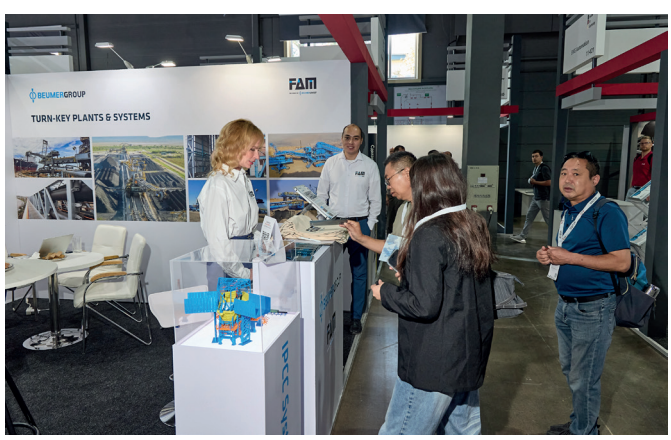
Сопровождение оборудования дополняют цифровые инструменты. Например, системы FAM для мониторинга, сигнализации и предупредительного обслуживания могут применяться и на технике других производителей. Это существенно для модернизации смешанного парка оборудования. Чтобы своевременно реагировать на предупреждения системы мониторинга и предотвращать длительные простои, предприятию необходимы запасные части, ремонтная база и оперативная техническая поддержка.



Здесь технологическое предложение упирается в географию. «Наше производство находится далеко от заводов региона», — говорит Хосе Ровира об одном из вызовов Центральной Азии. Поэтому SSAB отвечает на него формированием региональных запасов, локальной команды и технической поддержки. Еще одно направление — сеть Hardox Wearparts, участники которой изготавливают износостойкие компоненты. Компания заинтересована в дополнительных партнерах: между закупкой стального листа и установкой готовой детали остаются обработка и доставка, от которых также зависит длительность ремонта.

FAM также развивает бизнес в Казахстане благодаря работе локальной команды. При этом, как отмечает Гидо Хессе, запуск проектов зависит одновременно от инвестиционного цикла, интеграции с действующей техникой и согласований. «Хорошая консультация проясняет технические возможности, а финансовое обоснование облегчает принятие решения», — говорит он. Локальный сервис становится частью предложения наряду с характеристиками оборудования.

Для поставщика комплексность означает необходимость доказывать экономику конкретного изменения: сколько дополнительного сырья пройдет через участок, насколько сократится длительность ремонта и как изменится выход товарной продукции. Для заказчика — оценивать приобретение вместе с затратами на внедрение и обслуживание. Именно здесь сходятся задачи предприятий, добывающих разные виды сырья: производительность отдельного узла имеет значение в той мере, в какой она помогает всей цепочке работать устойчивее и с меньшими потерями.



Код МРНТИ 52.13.15

А. М. Габитова[1], *З. Ж. Абдрашева[1], З. К. Тунгушбаева[2], Е. А. Абеуов[3]

[1]Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Өскемен қ., Қазақстан),

[2]РМК «ҚР МШКӨ ҰО» «ШҒЗТКМИтүстімет» (Өскемен қ.,Қазақстан),

[3]Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті (Қарағанды қ., Қазақстан)

БАЙЫТУ ҚАЛДЫҚТАРЫН ЖОҒАРЫ ТЫҒЫЗДЫҚТА ДАЙЫНДАУ ЖӘНЕ ҚАЗЫЛҒАН КЕҢІСТІКТІ ТОЛТЫРУҒА ҚОЛДАНУДЫ ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕУ

Аңдатпа. Жұмыста байыту қалдықтарын жоғары тығыздықта дайындау және оларды қазылған кеңістікті толтыруда қолдану технологиясы негізделді. Зерттеудің мақсаты – қоюландыру, гранулометриялық құрам, реологиялық қасиеттер, байланыстырғыш шығыны және жасанды массивтің нормативтік беріктігі арасындағы өзара байланысты анықтау. Салыстырмалы, құрылымдық-технологиялық және параметрлік талдау әдістері, сондай-ақ цементті және цемент-күлді қоспалардың зертханалық сынақ нәтижелері пайдаланылды. Жоғары тығыздықтағы толтырма цемент шығынын 15–35%-ға дейін азайтуға мүмкіндік беретіні анықталды. Артемьев кеніші үшін тығыздығы 1860–1963 кг/м³, беріктігі 1–4 МПа болатын базалық толтырма құрамдары талданды. Жұмыстың жаңалығы – қоюландыру, реологияны реттеу, байланыстырғышты мөлшерлеу, тасымалдау және жасанды массивті қалыптастыру кезеңдерін бірыңғай технологиялық сұлбаға біріктіру.

Түйінді сөздер: *байыту қалдықтары, жоғары тығыздықтағы толтырма, пасталық толтырма, қазылған кеңістік, қоюландыру, реология, цемент-күлді байланыстырғыш, құбыржолдық тасымалдау, жасанды массивтің беріктігі.*

Scientific and technical justification of high-density mineral tailings preparation for mine backfill

Abstract. The study substantiates a technology for preparing and applying high-density mineral processing tailings for backfilling mined-out areas. The aim is to establish relationships among thickening parameters, particle-size distribution, rheological properties, binder consumption, and the required strength of the artificial backfill mass. Comparative, structural-technological, and parametric analyses were applied using laboratory data on cement and cement-fly ash backfill mixtures. High-density backfill was shown to reduce cement consumption by 15–35%. For the Artemyevsky mine, baseline backfill mixtures with densities of 1860–1963 kg/m³ and strengths of 1–4 MPa were analyzed. The novelty lies in integrating thickening, rheology control, binder dosing, transportation, and artificial backfill mass formation into a unified technological scheme.

Keywords: *mineral processing tailings, high-density backfill, paste backfill, mined-out area, thickening, rheology, cement-fly ash binder, pipeline transport, strength of the artificial backfill mass.*

Научно-техническое обоснование подготовки и применения высокоплотных хвостов обогащения для закладки выработанного пространства

Аннотация. В работе обоснована технология подготовки и применения высокоплотных хвостов обогащения для закладки выработанного пространства. Цель исследования — установить взаимосвязь параметров сгущения, гранулометрического состава, реологических свойств, расхода вяжущего и нормативной прочности искусственного массива. Применены сравнительный, структурно-технологический и параметрический методы анализа, а также результаты лабораторных испытаний цементных и цементно-зольных закладочных смесей. Установлено, что применение высокоплотной закладки позволяет снизить расход цемента на 15–35%. Для Артемьевского рудника проанализированы базовые составы плотностью 1860–1963 кг/м³ и прочностью 1–4 МПа. Научная новизна состоит в объединении стадий сгущения, регулирования реологии, дозирования вяжущего, транспортирования и формирования искусственного массива в единую технологическую схему.

Ключевые слова: *хвосты обогащения, высокоплотная закладка, пастовая закладка, выработанное пространство, сгущение, реология, цементно-зольное вяжущее, трубопроводный транспорт, прочность искусственного массива.*

Кіріспе

Полиметалл кен орындарын қазылған кеңістікті толтыру жүйелерімен игеру геомеханикалық және экологиялық міндеттерді бір мезгілде шешуге мүмкіндік береді. Байыту қалдықтарын жинақтау және олармен байланысты техногендік объектілерді басқару тау-кен өндірісіндегі маңызды технологиялық міндеттердің бірі болып табылады [1]. Сонымен қатар, толтыру жұмыстары материалдық және еңбек ресурстарын көп қажет ететін үдерістер қатарына жатады. ШҒЗТКМИтүстімет деректері бойынша, толтыру жұмыстарына 1 т кен өндіруге жұмсалатын жалпы еңбек шығындарының 30%-ына дейінгі бөлігі тиесілі болуы мүмкін, ал цементке жұмсалатын шығындар 1 м³ толтырма қоспасын дайындаудың өзіндік құнының 60–70%-ын құрайды [2]. Осыған байланысты толтырма қоспасының тасымалданғыштығы мен нормативтік беріктігін қамтамасыз ете отырып, байланыстырғыш материал шығынын азайту толтыру технологияларын жетілдірудің негізгі міндеттерінің бірі болып табылады.

Байыту қалдықтарын басқарудың заманауи тәсілі сұйылтылған пульпалардан қоюландырылған және паста тәрізді жүйелерге көшуді көздейді. Паста тәрізді толтырма жүйелері қатты фазаның жоғары мөлшерімен, судың шектеулі бөлінуімен және сегрегацияға тұрақтылығымен сипатталады; олардың ағындық қасиеттері қоюландыру дәрежесіне және гранулометриялық құрамға тәуелді. Жерасты қазбаларын толтыру үшін мұндай көшу ерекше маңызға ие, өйткені бұл жағдайда байыту қалдықтары тек өндірістік қалдық ретінде ғана емес, сонымен қатар жасанды массивтің негізгі минералдық құрамдас бөлігі ретінде де пайдаланылады.

Зерттеудің мақсаты — байыту қалдықтарын қоюландыру және олардың реологиялық қасиеттері жөніндегі деректерді Қазақстанның жерасты кеніштеріне арналған жоғары тығыздықтағы қатайғыш толтырма қоспаларының құрамдарын зерттеу нәтижелерімен біріктіру арқылы қазылған кеңістікті толтыру үшін жоғары тығыздықтағы байыту қалдықтарын дайындау және қолданудың технологиялық реттілігін негіздеу.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Зерттеудің ақпараттық және тәжірибелік базасы ретінде жоғары тығыздықтағы байыту қалдықтарын дайындау, қоюландыру, тасымалдау және реологиялық қасиеттерін зерттеуге арналған ғылыми еңбектер мен ШҒЗТКМИтүстіметтің қорытынды ғылыми-зерттеу есебіндегі зертханалық-технологиялық деректер пайдаланылды [3]. Жаңа зертханалық сынақтар жүргізілген жоқ; есептегі экспери-

менттік нәтижелер салыстырмалы, құрылымдық-технологиялық және параметрлік талдаудың бастапқы деректері ретінде қабылданды.

ШҒЗТКМИтүстімет зерттеулерінде М400 портландцементі, байыту қалдықтары, байыту фабрикасының жеңіл фракциясы, ұсақталған тау жынысы, құм және технологиялық су қолданылған. Қоспаның жылжымалылығы СтройЦНИИЛ конусымен, тығыздығы стандартты әдістермен, шекті ығысу кернеуі Штренберг аспабымен анықталған, ал беріктігі 70 × 70 × 70 мм текше үлгілерде бағаланған.

Талдауда беріктігі арттырылған, пасталық және сусыздандырылған жоғары тығыздықтағы толтыру нұсқалары қарастырылды. Салыстырылатын негізгі параметрлер: ылғалдылық, тығыздық, цемент шығыны, гранулометриялық құрам, реологиялық қасиеттер, тасымалданғыштық және жасанды массивтің беріктігі. Артемьев кеніші үшін цементті және цемент-күлді құрамдардың шығындары, тығыздығы және 28 және 90 тәуліктегі беріктік көрсеткіштері салыстырылды. Паста тәрізді жүйелердің ағындық қасиеттерін сипаттау үшін Гершель-Балкли реологиялық моделі пайдаланылды [3]:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n, \qquad (1)$$

мұндағы τ — ығысу кернеуі, Па;

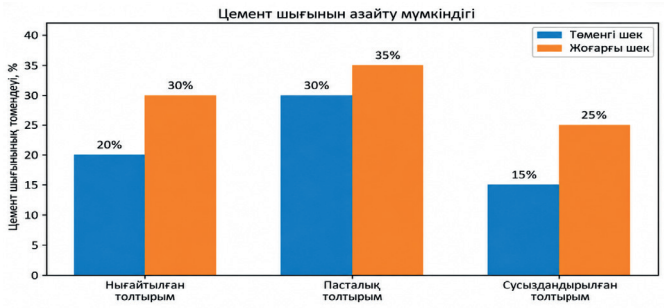
τ_0 — бастапқы ығысу кернеуі, Па;

k — консистенция коэффициенті, Па·с^n;

$\dot{\gamma}$ —ығысу жылдамдығы, с$^{-1}$;

n — ағын индексі.

(1) теңдеуге сәйкес, паста тәрізді қоспаның реологиялық мінез-құлқы бастапқы ығысу кернеуі, консистенция коэффициенті және ағын индексі арқылы сипатталады. Бұл параметрлер қоспаның жылжымалылығын, құбыржол арқылы айдалу қабілетін және тасымалдау кезіндегі гидравликалық кедергілерді бағалау кезінде ескеріледі.



Сурет 1. Зерттеу нәтижелері бойынша цемент шығынын азайту мүмкіндігін салыстыру [2].
Figure 1. Comparison of the potential for reducing cement consumption based on the research results [2].
Рис. 1. Сопоставление потенциала снижения расхода цемента по данным исследований [2].

Зерттеу нәтижелері

Паста тәрізді күйдің параметрлері және байыту қалдықтарын дайындау

Зерттеу есебінің деректері бойынша пасталық толтырым 18–22% ылғалдылықпен және толтырғыш массасына шаққанда 4–10% цемент мөлшерімен сипатталады. Толтырғыш ретінде 0–0,5 мм ұсақ флотациялық қалдықтар немесе олардың 3–30 мм ірі толтырғышпен қоспасы қарастырылған. Қоспаның қажетті иілімділігін қамтамасыз ететін шамамен 20 мкм бөлшектердің үлесі қатты фазаның 15–20%-ын құрайды. Ұсақ дисперсті материал мен қатты фаза мөлшері қоспаның су бөлуіне, сегрегацияға тұрақтылығына және реологиялық қасиеттеріне елеулі әсер етеді [4].

Практикалық талдау Артемьев кенішінің екінші кезегіне арналған қоспа құрамдарына негізделген. Төмен бағытта қабаттап қазу жүйесінде өңделген кеңістік аралығы 4 м болғанда қалыңдығы 1,5 м көтергіш қабаттың норма-

Кесте 1

Жоғары тығыздықтағы толтырудың технологиялық нұсқаларының салыстырмалы сипаттамасы [3]

Table 1

Comparative characteristics of high-density backfill technology options [3]

Таблица 1

Сравнительная характеристика технологических вариантов высокоплотной закладки [3]

Нұсқа	Негізгі сипаттамасы	Тығыздық/ылғалдылық көрсеткіші	Цемент шығынына әсері	Тасымалдау ерекшеліктері
Нығайтылған	Құйма қатайғыш қоспа + ірі толтырғыш	Су-цемент қатынасының төмен мәні (С/Ц)	200 → 140–160 кг/м³	Өздігінен ағатын/аралас тасымалдау
Пасталық	0–0,5 мм фракциялы ұсақ байыту қалдықтары, ірі толтырғышпен бірге қолданылуы мүмкін	Ылғалдылығы18–22%	30–35%-ға төмендету	Мәжбүрлі құбыржолдық тасымалдау
Сусыздандырылған	Төсеу алдында судың бір бөлігін шығару	Жылжымалылығы > 15 см орнына 10–12 см	15–25%-ке төмендету	Өздігінен ағу арқылы тасымалдау сақталады

тивтік беріктігі кемінде 4–4,5 МПа, ал тік ашылым биіктігі 4–5 м болатын төмендетілген беріктіктегі қабат үшін 0,7–1,0 МПа деп қабылданған [2]. Бұл толтырма құрамын жасанды массив қабатының функционалдық мақсатына қарай саралап таңдаудың қажеттілігін көрсетеді.

2-кесте деректерін салыстыру Ақсу ЖЭО және Екібастұз ГРЭС-1 ұшпа күлдері қолданылған толтырма қоспаларында цемент пен күл шығыны бірдей болғанымен, су мен тау жынысының мөлшеріне байланысты қоспа тығыздығында айырмашылықтар қалыптасатынын көрсетеді. Қабаттап өрлеу жүйесіне арналған негізгі толтырымда Ақсу ЖЭО күлі қолданылған қоспаның тығыздығы 1920 кг/м³, ал Екібастұз ГРЭС-1 күлі қолданылған нұсқада 1860 кг/м³ құрайды. Қабатаралық-камералық жүйедегі көтергіш қабат үшін екі құрамның көрсеткіштері іс жүзінде бірдей: тиісінше 1962 және 1963 кг/м³. Негізгі толтырым үшін Ақсу ЖЭО күлі негізіндегі құрамның тығыздығы 1960 кг/м³, ал Екібастұз ГРЭС-1 күлі қолданылған құрамда 1943 кг/м³ болды. Барлық қарастырылған нұсқаларда қабаттың функционалдық мақсатына сәйкес 1–4 МПа деңгейіндегі нормативтік беріктік қамтамасыз етіледі.

Кесте 2

Артемьев кенішіне арналған Ақсу ЖЭО және Екібастұз ГРЭС-1 ұшпа күлдері негізіндегі толтырма қоспалары құрамдарының салыстырмалы сипаттамасы [4]

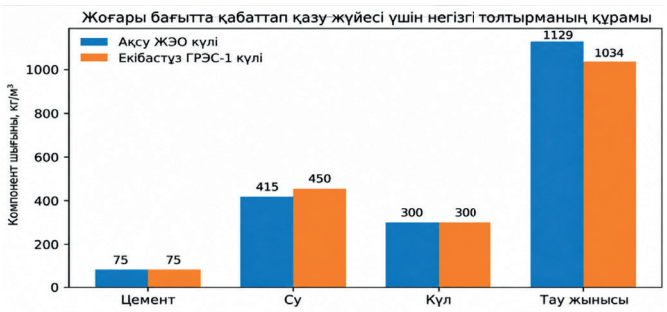
Table 2

Comparative characteristics of backfill mixture compositions based on fly ash from the Aksu TPP and Ekibastuz GRES-1 for the Artemyevsky mine [4]

Таблица 2

Сравнительная характеристика составов закладочных смесей на основе золы-уноса Аксуской ТЭС и Экибастузской ГРЭС-1 для Артемьевского рудника [4]

Қазымдау жүйесі	Тағайындау	Ұшпа күл көзі	Цемент, кг/м³	Су, кг/м³	Күл, кг/м³	Жыныс, кг/м³	Тығыздық, кг/м³	Беріктік
Қабаттап өрлеу	Негізгі толтырым	Ақсу ЖЭО	75	415	300	1129	1920	R28 = 1 МПа
		Екібастұз ГРЭС-1	75	450	300	1034	1860	R28 = 1 МПа
Қабатаралық-камералық	Көтергіш қабат	Ақсу ЖЭО	200	415	200	1147	1962	R90 = 4 МПа
		Екібастұз ГРЭС-1	200	415	200	1148	1963	R90 = 4 МПа
Қабатаралық-камералық	Негізгі толтырым	Ақсу ЖЭО	100	410	200	1250	1960	R90 = 2 МПа
		Екібастұз ГРЭС-1	100	420	200	1223	1943	R90 = 2 МПа
Қабаттық төмендеме	Көтергіш қабат	Ақсу ЖЭО	200	415	200	1147	1962	R90 = 4 МПа
		Екібастұз ГРЭС-1	200	415	200	1148	1963	R90 = 4 МПа
Қабаттық төмендеме	Қосымша құю	Ақсу ЖЭО	75	415	300	1129	1920	R28 = 1 МПа
		Екібастұз ГРЭС-1	75	415	300	1034	1860	R28 = 1 МПа



Сурет 2. Ақсу ЖЭО және Екібастұз ГРЭС-1 күлдерін қолданған негізгі толтырма компоненттері шығынының салыстырмасы.
Figure 2. Comparison of component consumption in the main backfill using ash from the Aksu TPP and Ekibastuz GRES-1.
Рис. 2. Сравнение расхода компонентов основной закладки с золой Аксуской ТЭС и Экибастузской ГРЭС-1.

Гранулометриялық құрамы және тасымалданғыштығы

Қоспаның тасымалданғыштығын және нормативтік беріктігін қамтамасыз ету мақсатында зерттеулерде шынайы тығыздығы 2,7 г/см³, шаңды және сазды бөлшектерінің мөлшері 3%-дан аспайтын Камышин карьерінің ұсақталған тау жынысы пайдаланылды. Тау жынысы ұсақталып, –15+2,5 мм және –2,5+0 мм фракциялары алынды [5]. Қоспаның тығыз қаңқасын қалыптастыру және цемент қамырына қажеттілікті азайту үшін оның гранулометриялық құрамын реттеу маңызды болып табылады.

Жүргізілген талдау жоғары тығыздықтағы байыту қалдықтарын қолдану технологиясын өзара байланысты біртұтас жүйе ретінде қарастыру қажеттігін көрсетті. Алдымен қалдықтардың минералогиялық және гранулометриялық сипаттамалары анықталып, қатты фазаның қажетті мөлшеріне дейін қоюландыру немесе сусыздандыру жүргізіледі [6].

Кесте 3

Жоғары тығыздықтағы байыту қалдықтарын толтырма қоспасына енгізу кезінде оңтайландырылатын негізгі параметрлер

Table 3

Key parameters to be optimized when incorporating high-density mineral processing tailings into the backfill mixture

Таблица 3

Основные параметры, подлежащие оптимизации при введении высокоплотных хвостов обогащения в состав закладочной смеси

Параметр	Базалық құрамдағы рөлі	Байыту қалдықтарын енгізген кезде ескерілетін фактор	Оңтайландыру критерийі
Байыту қалдықтарының гранулометриялық құрамы	Қоспаның түйіршіктік құрылымын қалыптастыру	Ұсақ дисперсті фракциялардың үлесі және түйіршіктердің таралуы	Тығыз және тұрақты құрылым қалыптастыру
Қатты фазаның мөлшері	Қоспаның тығыздығына әсер етеді	Қоюландыру дәрежесіне байланысты өзгереді	Тұрақты паста тәрізді күй
Су мөлшері	Қоспаның жылжымалылығын қамтамасыз етеді	Қоюландырылған қалдықтардың бастапқы ылғалдылығына байланысты түзетіледі	Сегрегациясыз тасымалдану
Цемент шығыны	Жасанды массивтің беріктігін қамтамасыз етеді	Қалдықтардың минералогиялық құрамына байланысты оңтайландырылады	Нормативтік беріктікті қамтамасыз ететін ең төменгі шығын
Үшпа күл	Қосымша минералдық компонент және цемент-күлді байланыстырғыштың құрамдас бөлігі	Байыту қалдықтарымен бірлескен әсері ескеріледі	Беріктік пен экономикалық тиімділіктің оңтайлы арақатынасы
Реологиялық қасиеттер	Құбыржол арқылы тасымалдауды анықтайды	Қатты фазаның мөлшері мен ұсақ бөлшектер үлесіне тәуелді	Рұқсат етілетін қысым жоғалуы және тұрақты ағын
Қоспа тығыздығы	Толтырманың құрылымдық сипаттамасын көрсетеді	Қалдықтардың концентрациясына байланысты өзгереді	Тасымалданғыштық пен беріктіктің оңтайлы үйлесімі
Беріктік	Толтырма массивінің қызметтік қабілетін анықтайды	Қоспа құрамы мен қатаю мерзіміне тәуелді	Қабаттың мақсатына сәйкес 28 және 90 тәуліктегі нормативтік беріктік

Кесте 4

Камышин карьерінің ұсақталған тау жынысының гранулометриялық құрамы [5]

Table 4

Particle size distribution of crushed rock from the Kamyshin quarry [5]

Таблица 4

Гранулометрический состав дробленой породы Камышинского карьера [5]

Материал/ қалдық	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071	-0,071
–15+0 мм, жеке қалдық	44.7	21	9.9	9.1	5.1	3.7	2.4	2.5	1.6
–15+0 мм, толық қалдық	–	65.7	75.6	84.7	89.8	93.5	95.9	98.4	100
–2,5+0,071 мм, жеке қалдық	–	–	–	29.2	24.6	18.2	11.2	11.2	5.6
–2,5+0,071 мм, толық қалдық	–	–	–	–	53.8	72	83.2	94.4	100

Келесі кезеңде қоспа гомогенизацияланып, оның реологиялық қасиеттері реттеледі; қатты фазаның концентрациясы, жылжымалылық, аққыштық шегі және сегрегацияға тұрақтылығы бақыланады. Байланыстырғыш пен минералдық қоспалар мөлшері жасанды массивтің функционалдық мақсаты мен талап етілетін беріктігіне сәйкес белгіленеді.

Құбыржол арқылы тасымалдауда шығын, қысым, қашықтық және биіктік айырмасы ескеріледі, ал реологиялық параметрлер қоспаның тұрақты тасымалдануын қамтамасыз етуі тиіс. Соңғы кезеңде қазылған кеңістік толтырылып, жасанды массивтің 28 және 90 тәуліктегі беріктігі бақыланады [7].

Артемьев кеніші жағдайында бастапқы технологиялық регламент бойынша қоспаны тік бағытта тасымалдау тереңдігі шамамен 200 м, ал жалпы тасымалдау ұзындығы шамамен 500 м деп қабылданған. Толтырма қоспасын өндірудің жылдық көлемі шамамен 90 мың м³ құрайды [8]. Бұл көрсеткіштер жоғары тығыздықтағы қоспаның құрамын таңдауды тек беріктік талаптарымен ғана емес, құбыржол көлігінің гидравликалық параметрлерімен де өзара байланыстыру қажеттігін көрсетеді.



Сурет 3. Жоғары тығыздықтағы қалдықтарды дайындау және толтырма массивін қалыптастырудың ұсынылған интеграцияланған технологиялық сұлбасы.
Figure 3. Proposed integrated technological scheme for high-density tailings preparation and backfill mass formation.
Рис. 3. Предлагаемая интегрированная технологическая схема подготовки высокоплотных хвостов и формирования закладочного массива.

Жоғары тығыздықтағы байыту қалдықтарын қолданған жағдайда қатты фазаның мөлшерін арттыру қоспаның тығыздығын жоғарылатумен қатар, оның реологиялық кедергісінің өсуіне әкелуі мүмкін . Сондықтан қоспа құрамын оңтайландыру кезінде тығыздық — реология — тасымалданғыштық – беріктік көрсеткіштері бір мезгілде ескерілуі тиіс.

Нәтижелерді талқылау

Алынған нәтижелер жоғары тығыздықтағы толтырманың тиімділігі өзара байланысты бірнеше параметрмен анықталатынын көрсетті. Байыту қалдықтарын қоюландыру бос судың мөлшерін азайтып, оларды қазылған кеңістікті толтыруға пайдалану мүмкіндігін арттырады. Алайда қатты фазаның концентрациясы өскен сайын қоспаның аққыштық шегі мен тұтқырлығы артып, құбыржол арқылы тасымалдауға кедергі жоғарылауы мүмкін.

Гранулометриялық құрамды оңтайландыру, су мөлшерін азайту және цемент-күлді байланыстырғышты қолдану қажетті беріктікті сақтай отырып, цемент шығынын төмендетуге мүмкіндік береді. Беріктігі арттырылған толтырмада цемент шығыны 200-ден 140–160 кг/м³-ке дейін, пасталық технологияда 30–35%, ал сусыздандырылған толтырмада 15–25% төмендеуі мүмкін [9].

Артемьев кеніші үшін базалық құрамдардың тығыздығы 1860–1963 кг/м³, ал беріктігі қабаттың функционалдық мақсатына байланысты 1–4 МПа құрайды. Бұл көрсеткіштер жоғары тығыздықтағы байыту қалдықтары негізіндегі құрамдарды әзірлеу үшін салыстырмалы база ретінде пайдаланылуы мүмкін, ал қалдықтардың нақты мөлшері олардың минералогиялық және гранулометриялық ерекшеліктерін ескере отырып тәжірибелік жолмен анықталуы тиіс [10].

Ғылыми жаңалығы және практикалық маңыздылығы

Жүргізілген аналитикалық зерттеудің ғылыми нәтижесі жоғары тығыздықтағы байыту қалдықтарын дайындау параметрлерін, қоспаның реологиялық және тасымалдау қасиеттерін, байланыстырғыш шығынын және қалыптастырылатын жасанды массивтің нормативтік беріктігін біртұтас технологиялық жүйе шеңберінде өзара байланыстыра қарастыру болып табылады.

Қорытынды

Жүргізілген кешенді талдау қоюландырылған байыту қалдықтарын жоғары тығыздықтағы толтырма қоспаларын дайындауда қолданудың технологиялық мүмкіндігін және оларды қазылған кеңістікті толтыру жүйесіне енгізудің перспективалылығын көрсетті.

Паста тәрізді толтырма 18–22% ылғалдылықпен, толтырғыш массасына шаққанда 4–10% цемент мөлшерімен және қоспаның қажетті пластикалығы мен тұрақтылығын қамтамасыз ететін ірілігі шамамен 20 мкм ұсақ дисперсті бөлшектердің қатты фазадағы 15–20% үлесімен сипатталады.

Талданған зертханалық деректер қоспаның тығыздығын арттыру, су мөлшерін азайту, гранулометриялық құрамын оңтайландыру және реологиялық қасиеттерін реттеу байланыстырғыш шығынын төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Цемент шығыны беріктігі арттырылған толтырмада 200-ден 140–160 кг/м³-ке дейін, пасталық толтырмада 30–35%, ал сусыздандырылған толтырмада 15–25% төмендеуі мүмкін. Бұл ретте қоспаның тұрақтылығы, айдалу қабілеті және жасанды массивтің нормативтік беріктігі сақталуы тиіс.

Артемьев кеніші үшін Ақсу ЖЭО және Екібастұз ГРЭС-1 ұшпа күлдері негізіндегі базалық құрамдардың тығыздығы 1860–1963 кг/м³, ал беріктігі 1–4 МПа құрайды. Бұл құрамдар жоғары тығыздықтағы байыту қалдықтары негізіндегі толтырма қоспаларын одан әрі әзірлеу мен оңтайландыру үшін салыстырмалы база ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Ұсынылған технологиялық реттілік мынадай кезеңдерді қамтиды: байыту қалдықтарының қасиеттерін анықтау → қоюландыру/сусыздандыру → гомогенизациялау және реологияны реттеу → байланыстырғыш пен қоспаларды мөлшерлеу → құбыржол арқылы тасымалдау → жасанды массивті қалыптастыру және беріктігін бақылау.

Одан әрі тәжірибелік зерттеулер нақты байыту қалдықтарының қасиеттерін, тасымалдау жағдайларын және нормативтік беріктік талаптарын ескере отырып, қатты фазаның оңтайлы мөлшерін, реологиялық параметрлердің жұмыс диапазонын және байланыстырғыштың тиімді шығынын анықтауға бағытталуы тиіс.

Алынған нәтижелер жоғары тығыздықтағы байыту қалдықтары негізіндегі толтырма технологиясының параметрлерін одан әрі тәжірибелік оңтайландыруға және қазылған кеңістікті толтырудың тиімді технологиялық шешімдерін әзірлеуге ғылыми-әдістемелік негіз болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Шершнев А. А. Байыту қалдықтарын жинақтау кезінде аршынды тау жыныстары үйінділерін қалыптастыру технологиясын негіздеу: техн. ғыл. канд. … дис. – Красноярск: Сібір федералдық университеті, 2016. – 147 б. (орыс тілінде)*
2. *ВНИИцветмет. Қазақстан Республикасының жерасты кеніштері үшін жоғары тығыздықтағы толтыру технологиясын әзірлеу: ғылыми-зерттеу жұмысы бойынша қорытынды есеп, мемлекеттік*

тіркеу № 0112 РК 02466. – Өскемен, 2014. – 35 б. (орыс тілінде)
3. *Qi C., Fourie A. Минералдық шикізатты байыту қалдықтарын басқаруға арналған цементтелген пасталық толтырма: шолу және даму перспективалары // Minerals Engineering. – 2019. – Т. 144. –106025 (ағылшын тілінде)*
4. *Niroshan N., Sivakugan N., Veenstra R. L. Цементтелген пасталық толтырманың ағу сипаттамалары // Geotechnical and Geological Engineering. – 2018. – Т. 36. – Б. 2261–2272 (ағылшын тілінде)*
5. *Цементтелген пасталық толтырма үшін гравитациялық қоюландырылған қалдықтарды ығысу әсерімен өңдеу арқылы суды қайтару дәрежесін арттыру / H. Jiao [және т. б.] // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Т. 245. – 118882 (ағылшын тілінде)*
6. *Жіктелмеген қалдықтар негізіндегі пасталық толтырманың реологиясын зерттеудің қазіргі жағдайы мен даму перспективалары (2-бөлім): реологиялық өлшеулер және перспективалар / A.Wu [және т. б.] // Chinese Journal of Engineering. – 2021. – Т. 43. – № 4. – Б. 451–459 (ағылшын тілінде)*
7. *Жаңа дайындалған цементтелген пасталық толтырманың реологиялық өлшемдерін, ағу механизмін және құрылымдық эволюциясын түсіндіруге қосқан үлес / Z. Guo [және т. б.] // Cement and Concrete Composites. – 2023. – Т. 143. – 105221 (ағылшын тілінде)*
8. *Реологиялық қоспалардың цементтелген пасталық толтырманың жаңа дайындалған және қатайған күйдегі қасиеттеріне әсері / J. Jin [және т. б.] // Materials. – 2022. – Т. 15. – № 9. – 3006 (ағылшын тілінде)*
9. *Ультрадыбыстық толқын әсері жағдайындағы аса ұсақ қалдықтар негізіндегі цементтелген пасталық толтырманың реологиялық қасиеттері W. Ren [және т. б.] // Minerals. – 2021. – Т. 11. – № 7. – 718 (ағылшын тілінде)*
10. *Dikonda R. K., Mbonimpa M., Belem T. Цементтелген пасталық толтырманы араластырудың меншікті энергиясы. II бөлім: реологиялық және механикалық қасиеттеріне әсері және практикалық қолданылуы // Minerals. – 2021. – Т. 11. – № 11. – 1159 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. *Shershnev A. A. Obosnovanie tekhnologii otsypki otvalov skal'nykh vskryshnykh porod pri skladirovanii otkhodov obogashcheniya [Justification of the Technology for Constructing Rock Overburden Dumps during Mineral Processing Waste Storage]: dis. ... kand. tekhn. nauk. – Krasnoyarsk: Sibirskii federal'nyi universitet, 2016. – 147 p. (in Russian)*
2. *VNIItsvetmet. Razrabotka tekhnologii zakladki vysokoi plotnosti dlya podzemnykh rudnikov Respubliki Kazakhstan [Development of High-Density Backfill Technology for Underground Mines of the Republic of Kazakhstan]: final research report, State Registration No. 0112 RK 02466. – Ust-Kamenogorsk, 2014. – 35 p. (in Russian)*
3. *Qi C., Fourie A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives // Minerals Engineering. – 2019. – Vol. 144. – Article 106025 (in English)*
4. *Niroshan N., Sivakugan N., Veenstra R. L. Flow characteristics of cemented paste backfill // Geotechnical and Geological Engineering. – 2018. – Vol. 36. – P. 2261–2272 (in English)*
5. *Water recovery improvement by shearing of gravity-thickened tailings for cemented paste backfill / H. Jiao et al. // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 245. – Article 118882 (in English)*
6. *Status and prospects of research on the rheology of paste backfill using unclassified tailings (Part 2): rheological measurement and prospects / A. Wu et al. // Chinese Journal of Engineering. – 2021. – Vol. 43. – No. 4. – P. 451–459 (in English)*
7. *A contribution to understanding the rheological measurement, yielding mechanism and structural evolution of fresh cemented paste backfill / Z. Guo et al. // Cement and Concrete Composites. – 2023. – Vol. 143. – Article 105221 (in English)*
8. *The Role of Rheological Additives on Fresh and Hardened Properties of Cemented Paste Backfill / J. Jin et al. // Materials. – 2022. – Vol. 15. – No. 9. – Article 3006 (in English)*
9. *Rheological Properties of Ultra-Fine Tailings Cemented Paste Backfill under Ultrasonic Wave Action / W. Ren et al. // Minerals. – 2021. – Vol. 11. – No. 7. – Article 718 (in English)*
10. *Dikonda R. K., Mbonimpa M., Belem T. Specific Mixing Energy of Cemented Paste Backfill, Part II: Influence on the Rheological and Mechanical Properties and Practical Applications // Minerals. – 2021. – Vol. 11. – No. 11. – Article 1159 (in English)*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Шершнев А. А. Обоснование технологии отсыпки отвалов скальных вскрышных пород при складировании отходов обогащения: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. – 147 с. (на русском языке)*
2. *ВНИИцветмет. Разработка технологии закладки высокой плотности для подземных рудников Республики Казахстан: заключительный отчет о НИР, № гос. регистрации 0112 РК 02466. – Усть-Каменогорск, 2014. – 35 с. (на русском языке)*

3. *Qi C., Fourie A. Цементированный пастовый твердеющий материал для управления хвостами обогащения: обзор и перспективы развития // Minerals Engineering. – 2019. – Т. 144. – Ст. 106025 (на английском языке)*
4. *Niroshan N., Sivakugan N., Veenstra R. L. Характеристики течения цементированного пастового твердеющего материала // Geotechnical and Geological Engineering. – 2018. – Т. 36. – С. 2261–2272 (на английском языке)*
5. *Повышение степени возврата воды путем сдвигового воздействия на гравитационно сгущенные хвосты для цементированного пастового твердеющего материала / H. Jiao [и др.] // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Т. 245. – Ст. 118882 (на английском языке)*
6. *Современное состояние и перспективы исследований реологии пастового твердеющего материала на основе неклассифицированных хвостов (часть 2): реологические измерения и перспективы / A.Wu [и др.] // Chinese Journal of Engineering. – 2021. – Т. 43. – № 4. – С. 451–459 (на английском языке)*
7. *Исследование реологических измерений, механизма текучести и структурной эволюции свежеприготовленного цементированного пастового твердеющего материала / Z. Guo [и др.] // Cement and Concrete Composites. – 2023. – Т. 143. – Ст. 105221 (на английском языке)*
8. *Влияние реологических добавок на свойства цементированного пастового твердеющего материала в свежеприготовленном и затвердевшем состоянии / J. Jin [и др.] // Materials. – 2022. – Т. 15. – № 9. – Ст. 3006 (на английском языке)*
9. *Реологические свойства цементированного пастового твердеющего материала на основе ультратонких хвостов при воздействии ультразвуковых волн / W. Ren [и др.] // Minerals. – 2021. – Т. 11. – № 7. – Ст. 718 (на английском языке)*
10. *Dikonda R. K., Mbonimpa M., Belem T. Удельная энергия перемешивания цементированного пастового твердеющего материала. Часть II: влияние на реологические и механические свойства и практическое применение // Minerals. – 2021. – Т. 11. – № 11. – Ст. 1159 (на английском языке)*

Авторлар туралы мәліметтер:
Габитова А. М., техника ғылымдарының магистрі, Жер туралы ғылымдар мектебінің аға оқытушысы, «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ (Өскемен қ., Қазақстан), *ayauzhan.gabitova@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0000-7279-0433
Абдрашева З. Ж., техника ғылымдарының магистрі, Жер туралы ғылымдар мектебінің аға оқытушысы, «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ (Өскемен қ., Қазақстан), *zamira91189@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0007-8916-1845
Тунгушбаева З. К., техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «ҚР Минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу Ұлттық орталығы» «ШҒЗТКМИтүстімет», РМК филиалының ғылыми хатшысы (Өскемен қ., Қазақстан), *zuhratungushbaeva@gmail.com;* https://orcid.org/0000-0002-1366-1196
Абеуов Е. А., техника ғылымдарының кандидаты, доцент, «Абылқас Сагинов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан), *erkebulan69@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0002-6420-565X

Information about the authors:
Gabitova A. M., Master's degree, Senior Lecturer at the School of Earth Sciences, NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University» (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)
Abdrasheva Z. Zh., Master's degree, Senior Lecturer at the School of Earth Sciences, NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University» (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)
Tungushbayeva Z. K., Cand. of tech. sc., docent, Scientific Secretary of filial agency of the National Center for Complex Processing of Mineral Raw Materials, VNIItsvetmet (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)
Abeuov Ye. A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Информация об авторах:
Габитова А. М., магистр технических наук, старший преподаватель Школы наук о Земле, НАО Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)
Абдрашева З. Ж., магистр технических наук, ст. преподаватель Школы наук о Земле, НАО Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)
Тунгушбаева З. К., к. т. н., доцент, ученый секретарь филиала РГП «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья РК» ВНИИцветмет (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)
Абеуов Е. А., кандидат технических наук, доцент, НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)

Код МРНТИ 52.01.85

А. А. Бояндинова, *Ж. А. Адилханова

Филиал РГП «НЦ КПМС РК» «Институт горного дела им. Д. А. Кунаева» (г. Алматы, Казахстан)

МЕТОДОЛОГИЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КАРЬЕРОВ НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. В статье представлена методология диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров на основе двухуровневого подхода и имитационного моделирования. Рассмотрены этапы укрупненной и детальной диагностики, предусматривающие оценку технико-экономических показателей, анализ отдельных звеньев технологической цепи и выявление «узких» мест. Сформирована система критериев оценки эффективности функционирования геотехнологического комплекса. Предложенная методология позволяет выявлять резервы производственной мощности, оценивать альтернативные варианты организации технологических процессов и обосновывать управленческие решения, направленные на повышение эффективности эксплуатации оборудования и транспортных коммуникаций, снижение затрат и рациональное использование производственных ресурсов.

Ключевые слова: *геотехнологический комплекс, диагностика, техническое состояние, карьер, методология, оценка, цифровые технологии.*

Карьерлердегі геотехнологиялық кешендердің техникалық жағдайын цифрлық технологиялар негізінде диагностикалау әдістемесі

Аңдатпа. Мақалада карьерлердің геотехнологиялық кешендерінің техникалық жағдайын екі деңгейлі тәсіл және имитациялық модельдеу негізінде диагностикалау әдістемесі ұсынылған. Іріленген және егжей-тегжейлі диагностика кезеңдері қарастырылған, олар техникалық-экономикалық көрсеткіштерді бағалауды, технологиялық тізбектің жеке буындарын талдауды және «тар» жерлерді анықтауды көздейді. Геотехнологиялық кешеннің қызмет тиімділігін бағалау критерийлері жүйесі қалыптастырылған. Ұсынылған әдістеме өндірістік қуаттың резервтерін анықтауға, технологиялық процестерді ұйымдастырудың балама нұсқаларын бағалауға және жабдықтар мен көлік байланыстарын пайдалану тиімділігін арттыруға, шығындарды азайтуға және өндірістік ресурстарды рационалды пайдалануға бағытталған басқарушылық шешімдер қабылдауды негіздеуге мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: *геотехнологиялық кешен, диагностика, техникалық жағдайы, карьер, әдістеме, бағалау, цифрлық технологиялар.*

Methodology for diagnosing the technical condition of open-pit geotechnological complexes based on digital technologies

Abstract. This article proposes a methodology for diagnosing the technical condition of geotechnological complexes in open-pit mines, based on a two-level approach and simulation modeling. It outlines stages for both high-level and detailed diagnostics, which include evaluating technical and economic performance indicators, analyzing individual components of the technological chain, and identifying operational bottlenecks. A system of criteria for assessing the efficiency of a geotechnological complex has been developed. The proposed methodology enables the identification of latent production capacity, the evaluation of alternative technological process configurations, and the substantiation of management decisions aimed at improving the operational efficiency of equipment and transport infrastructure, reducing costs, and ensuring the rational use of production resources.

Keywords: *geotechnological complex, diagnostics, technical condition, open-pit, methodology, assessment, digital technologies.*

Введение

Современное развитие открытых горных работ характеризуется повышением сложности производственных процессов открытой разработки месторождений, ростом интенсивности эксплуатации горного оборудования и увеличением требований к надежности функционирования карьеров. Это обусловливает необходимость совершенствования методов диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров на основе цифровых технологий, позволяющих своевременно выявлять отклонения параметров работы оборудования, оценивать состояние взаимообусловленных и взаимозависимых подсистем и давать обоснованные управленческие решения для повышения эффективности работы комплекса.

Проведенный авторами анализ публикаций в данном направлении за последние годы показал, что проводимые исследования охватывают вопросы эксплуатационной надежности, оценки эффективности, мониторинга оборудования и оптимизации ремонтных работ и техобслуживания. Так в работах [1–2] рассмотрены вопросы математического моделирования надежности экскаваторно-автомобильных комплексов и оценки эффективности их функционирования. Авторами статьи [1] был применен системный подход к анализу взаимодействия экскаваторов и автосамосвалов, в исследовании [2] предложен интегральный показатель эффективности, который базируется на совокупности эксплуатационных критериев. Несмотря на практическую значимость, следует отметить, что в данных подходах не рассматриваются вопросы диагностики технического состояния отдельных единиц оборудования. Оценка надежности комплекса не обеспечивает детального выявления неисправностей отдельных машин, а применение интегрального показателя зависит от способов нормирования и исходных параметров.

В последние годы широкое применение в горнодобывающей промышленности получили методы цифровых двойников, в частности в направлении мониторинга и анализа эксплуатационных параметров карьерных самосвалов. Так, в работах [3–4] представлены разработки цифровых двойников карьерных самосвалов, ориентированные, главным образом, на мониторинг параметров в режиме реального времени и выявление отклонений. В обзоре [5] рассматриваются существующие исследования в области цифровых двойников производственных систем. Данные исследования отражают растущий интерес к применению цифровых двойников для комплексного анализа состояния техники, повышения эффективности производственных процессов и демонстрируют потенциал объединения цифровых двойников с методами прогнозирования отказов оборудования. Однако эффективность цифровых решений зависит от полноты исходных данных, выбранных моделей и возможности их адаптации к конкретным условиям эксплуатации карьерного транспорта.

Другим активно развиваемым направлением являются оценка надежности, оптимизация эксплуатации и организация технического обслуживания карьерного транспорта. В исследовании [6] приведен сравнительный анализ методов оценки надежности карьерных автосамосвалов, по-

зволяющий обосновать выбор математических подходов к анализу отказов в работе оборудования. Авторами исследования [7] рассмотрены методы формирования парка экскаваторов и автосамосвалов с учетом условий эксплуатации. Однако данные подходы направлены на оценку надежности, оптимизацию производственных процессов и повышение эффективности технического обслуживания, а не учитывают комплексную диагностику фактического состояния отдельных единиц оборудования.

Таким образом, проведенный анализ показал, что существующие подходы к обеспечению надежности и эффективности горно-транспортных комплексов охватывают широкий спектр задач, включая моделирование производственных процессов, мониторинг технического состояния оборудования, выявление отклонений и прогнозирование отказов. Вместе с тем ни один из рассмотренных подходов не обеспечивает углубленную и комплексную диагностику горно-транспортного комплекса в целом с учетом взаимосвязей между его отдельными элементами, индивидуальных условий эксплуатации и совокупности технико-экономических показателей. Это обусловливает необходимость разработки методологии, обеспечивающей комплексную оценку состояния оборудования с учетом взаимосвязей между отдельными элементами технологической системы, которая позволит выявлять причины снижения эффективности и определять резервы повышения производительности.

Методы исследования

Основным методом исследования является метод имитационного моделирования, который позволяет учитывать индивидуальные горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации карьеров, а также воспроизводить последовательность производственных операций и взаимодействие элементов геотехнологического комплекса.

В процессе моделирования учитываются расход энергоресурсов экскаваторами и транспортными средствами, организация движения локомотивосоставов и автосамосвалов, продолжительность производственных циклов, простои оборудования, загруженность транспортных коммуникаций, текущие эксплуатационные затраты и т. п.

Для интерпретации результатов были использованы методы сравнительного и технико-экономического анализа. В качестве критериев оценки приняты производительность комплекса, удельные текущие затраты, коэффициенты использования оборудования, расход энергоресурсов, показатели загрузки транспортной инфраструктуры и целый ряд других. Это позволяет выявлять ограничивающие звенья технологической цепи и определять резервы повышения эффективности функционирования геотехнологического комплекса.

Результаты

Авторами разработана методология диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров. В принятом подходе диагностика состояния функционирующих геотехнологических комплексов подразделяется на два уровня. Первый уровень диагностики — укрупненная диагностика, которая включает первоначальную экономическую оценку фактического состояния действующего технологического комплекса, по результатам которой устанавливается, существует ли потенциал повышения эффективности работы горно-транспортной системы.

На втором уровне — детальная диагностика — на основе применения динамического подхода осуществляется исследование потенциальных возможностей рассматриваемой системы.

Первичная диагностика технического состояния геотехнологического комплекса представляет собой последовательный процесс выявления факторов, определяющих эффективность ее функционирования, сбора фактических данных и их сопоставления с нормативными и накопленными производственными показателями.

На первом этапе первичной диагностики устанавливаются и систематизируются все основные факторы, влияющие на работу горно-транспортной системы, такие как: горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации карьера, режим работы основного технологического оборудования, типы оборудования и степень их изношенности, организация взаимодействия горного и транспортного оборудования и передвижения транспортных средств, структура транспортных коммуникаций, качество дорожного покрытия. После этого осуществляется сбор фактических технико-экономических показателей функционирования диагностируемого горно-транспортного комплекса карьера. Данные, полученные в результате выполнения указанных действий, сравниваются с данными, содержащимися в базе знаний, содержащей как нормативные данные, так и фактические данные по различным карьерам Казахстана, которые учитывают конкретные условия эксплуатации производственных мощностей геотехнологических комплексов.

По результатам сравнительного анализа устанавливается первичный «диагноз» рассматриваемого объекта, который позволяет ответить на вопрос о диагностируемом объекте: эффективно ли работает геотехнологический комплекс и существует ли резерв повышения его эффективности.

На основе результатов первичной диагностики осуществляется детальная диагностика состояния технологических комплексов, в ходе которой определяются потенциальные возможности рассматриваемого объекта. Исследования проводятся на базе информационно-программного комплекса имитационного моделирования геотехнологической системы на основе применения динамического подхода с учетом индивидуальных особенностей каждого объекта. Принцип динамического подхода в данном случае заключается в том, что исходя из конкретных горно-геологических и горнотехнических условий функционирования рассматриваемого геотехнологического комплекса, осуществляется последовательное изменение одного из параметров (соотношение горного и транспортного оборудования, их техническое состояние и условия эксплуатации, организация движения транспортных средств и т. д.).

Первоначально осуществляется формирование исходных данных. На данном этапе осуществляется формирование исходных данных, предполагающее детальное изучение и углубленный анализ факторов, влияющих на функционирование геотехнологического комплекса карьера. Проводится сбор, систематизация и уточнение информации о горно-геологических и горнотехнических условиях

эксплуатации, техническом состоянии основного технологического оборудования, организации погрузочно-разгрузочных и транспортных процессов и характеристиках транспортных коммуникаций (карьерных дорог и схемы путевого развития). Особое внимание уделяется выявлению взаимосвязей между отдельными параметрами и процессами, определению их влияния на производительность комплекса и установлению возможных причин отклонений фактических показателей от нормативных значений. Такой подход позволяет сформировать максимально полную и достоверную информационную основу для последующих этапов диагностики.

Следующим этапом диагностики является процесс моделирования работы технологического комплекса, что позволяет оперативно и достоверно получать необходимую технико-экономическую информацию по каждому варианту предлагаемого комплекта оборудования и производить их сравнительный анализ. В качестве основной моделируемой единицы принята технологическая смена работы геотехнологического комплекса карьера. Переход от сменных моделируемых показателей к годовым с учетом остановки оборудования на ремонт, снижения производительности во время взрывов и других факторов производится из расчета, что 365 дней в году геотехнологический комплекс работает по схеме 9 + 4 + 1, т. е. из 14-ти 12-часовых смен недели комплекс работает 9 смен (4 смены в выходные дни и пять ночных смен) со 100%-й загрузкой, 4 (дневные смены в будние дни) — 65% и одну смену (в день взрыва) — 35%.

На основе полученных результатов моделирования формируется таблица технико-экономических показателей, которые принимаются в качестве основных критериев оценки текущего состояния геотехнологического комплекса карьера.

Производительность служит одним из основных критериев при диагностике состояния геотехнологических комплексов карьеров. Она определяется по следующей формуле:

$$\mathbf{П}_{год} = n_{см}\,\mathbf{П}_{см} N K,$$

где $\mathbf{П}_{год}$ — годовая производительность геотехнологического комплекса, млн. м^3;

$n_{см}$ — количество смен в сутки;

$\mathbf{П}_{см}$ — сменная производительность геотехнологического комплекса, тыс. м^3 (принимается равной объему руды (горной массы), выгруженной по всем пунктам разгрузки за смену);

N — количество дней в рассматриваемом периоде;

K — коэффициент перевода сменных показателей в показатели за период [8].

Далее с учетом технологических простоев устанавливаются фактические (в каждой конкретной ситуации) показатели производственной мощности геотехнологического комплекса и коэффициент ее реализации. Аналогичные показатели устанавливаются и относительно основных технологических звеньев цепи на этапах погрузки, транспортирования и разгрузки горной массы [9].

В данном случае подразумевается, что должна быть обеспечена одинаковая производительность отдельных звеньев геотехнологического комплекса. Именно тогда достигается максимальная согласованность работы технологического комплекса в целом.

При определении коэффициента использования производственной мощности предприятия используется классический метод. Однако исходными данными для расчетов служат сменные показатели, являющиеся результатом имитационного моделирования. При необходимости по специальной методике также возможны переходы к аналогичным показателям за любой рассматриваемый период.

Основным критерием оценки эффективности работы геотехнологического комплекса принимается показатель удельных текущих затрат на 1 м^3 горной массы. При оценке же работы основного технологического оборудования в качестве основного критерия принимаются коэффициенты использования оборудования. Однако, так как коэффициент использования экскаваторов зависит от времени их работы, существенное влияние на которое оказывает длина обменного тупика, которая в свою очередь зависит от протяженности погрузочного тупика, то в качестве дополнительного критерия при диагностике работы экскаваторного парка был принят коэффициент загруженности погрузочных участков. Рациональное значение данных коэффициентов устанавливается согласно методике нормирования работы горно-транспортного оборудования [8].

Другим важным и системным показателем при диагностике состояния экскаваторного парка является удельный объем горной массы, приходящийся на 1 м^3 ковша. Данный показатель с наибольшей степенью достоверности показывает степень загруженности горного оборудования, что не в полной мере отражается с помощью двух предыдущих коэффициентов.

Для примера в таблице приведены основные критерии диагностики по одному из звеньев технологической цепи – локомотивосоставам.

Таблица 1

Основные технико-экономические показатели диагностики технического состояния локомотивосоставов

Кесте 1

Локомотив құрамдарының техникалық жай-күйін диагностикалаудың негізгі техникалық-экономикалық көрсеткіштері

Table 1

Key technical and economic indicators for the diagnostics of the technical condition of locomotive-hauled trains

Наименование показателя
Коэффициент использования подвижного состава
Средневзвешенное расстояние транспортирования
Средневзвешенная высота подъема
Удельный расход электроэнергии локомотивосоставами
Коэффициент ожидания погрузки из-за занятости экскаваторов
Коэффициент технической готовности подвижного состава
Коэффициент внеплановых простоев оборудования
Диаграмма интервалов движения поездов

При диагностике состояния парков автомобильных и железнодорожных транспортных средств в качестве дополнительных критериев были рассмотрены удельный расход электроэнергии, топлива и шин, а также средневзвешенное расстояние транспортирования и средневзвешенная высота подъема.

В качестве критериев эффективности использования схемы путевого развития (СПР) при диагностике были приняты показатели удельной загрузки СПР по времени и по объемам перевезенной горной массы. Однако показатель удельной загрузки по объемам перевезенной горной массы при сравнении двух различных карьеров может быть однозначно справедлив только при одних и тех же физико-механических свойствах перевозимых пород. Анализ загруженности участков схем путевого развития карьеров по времени при заданной организации процессов взаимодействия горного и транспортного оборудования позволяет рассмотреть, если есть, существующий резерв загрузки схемы путевого развития, а также неоправданно завышенный потенциал излишних путей, которые могут быть разобраны без ущерба эффективности горно-транспортной системы в целом. Относительно показателей использования автотрассы в качестве основного критерия был принят удельный объем горной массы, приходящийся на 1 км автотрассы.

Характерным признаком высокой эффективности работы геотехнологического комплекса являются рациональное соотношение горного и транспортного оборудования и равномерность загрузки входящих в нее отдельных единиц оборудования в единицу времени работы. Поэтому при детальной диагностике технического состояния геотехнологический комплекс в целом рассматривается при рациональном экономически целесообразном соотношении основного технологического оборудования и по эффективности работы отдельных элементов системы (экскаваторы, локомотивосоставы, автосамосвалы, автотрассы, железнодорожные пути, конвейерные ленты). Существенным положительным фактором является то, что каждый экскаватор, локомотивосостав, автосамосвал, участок схемы путевого развития, автодороги или конвейерной ленты рассматриваются как индивидуально, так и по подсистемам. Возможности информационно-программного комплекса имитационного моделирования позволяют по каждому участку определять расход электроэнергии, число составов, прошедших по участку, время занятости участка составом и степень его загруженности во времени, объем горной массы, перевезенной по участку, количество и продолжительность простоев составов на участке, а также производить анализ интервалов движения поездов, анализ наиболее загруженных участков и оценку пропускной способности.

Установление экономически целесообразной производственной мощности геотехнологического комплекса позволяет значительно сократить капитальные вложения и текущие расходы, снизить себестоимость производства продукции, достичь высоких показателей по объему и качеству продукции при минимальных издержках производства, что и является одной из основных задач горнодобывающего предприятия.

Вследствие этого одним из основных этапов диагностики является анализ производственной мощности геотехнологического комплекса по звеньям технологической цепи и оценка степени ее фактической реализации в конкретных условиях функционирования системы. Фактические показатели использования производственной мощности сравниваются с максимально возможными показателями производственной мощности предприятия и между собой, формируемой в рамках каждого из оцениваемых вариантов. В ней отражены показатели фактической производственной мощности по руде, по горной массе и реально достижимой, технологически обусловленной производственной мощности всех звеньев технологической цепи. В результате сравнительного анализа выявляются экономически необоснованные диспропорции в системе по производственной мощности и у каждого технологического звена устанавливается, имеется ли неиспользованный потенциал.

Максимально возможная производственная мощность экскаваторно-железнодорожной или экскаваторно-автомобильной системы карьера устанавливается как минимальная максимально возможная мощность одного из звеньев рассматриваемой системы, которая и является «узким» местом в работе геотехнологического комплекса. Далее осуществляется детальная диагностика выявленной подсистемы, в качестве которой может выступать каждая из пяти основных элементов геотехнологического комплекса — горное оборудование, железнодорожный или автомобильный транспорт, автотрасса или схема путевого развития/конвейерная лента. Так в результате детальной диагностики пользователь имеет возможность получить следующую информацию по каждому локомотивосоставу: число рейсов за моделируемый период, время нахождения состава под погрузкой и на разгрузке, время движения и пробег локомотивосостава, объем вывезенной горной массы, количество и продолжительность простоев, коэффициент использования рабочего времени, расход электроэнергии (дизельного топлива). Получение столь же полной информации возможно по всем остальным элементам геотехнологического комплекса.

В результате проведения детальной диагностики устанавливается «диагноз» исследуемого технологического комплекса с учетом его характерных особенностей, осуществляется прогноз последствий и осложнений, а также выявление резервов существующих производственных мощностей.

Результаты диагностики и имитационного моделирования служат основой для принятия обоснованных управленческих решений, направленных на повышение эффективности функционирования геотехнологического комплекса [10]. На основе выявленных отклонений и производственных резервов определяются мероприятия по оптимизации качественного и количественного состава оборудования, совершенствованию организации технологических процессов, снижению эксплуатационных затрат и устранению «узких» мест отдельных звеньев технологической цепи. Сравнение альтернативных сценариев позволяет выбрать наиболее экономически целесообразные решения с учетом конкретных условий эксплуатации карьера.

Обсуждение результатов

Предложенная методология диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров основана на двухуровневом подходе, который включает укрупненную оценку эффективности функционирования геотехнологического комплекса и детальную диагностику, выявление «узких» мест и оценку потенциальных резервов повышения эффективности.

Использование системы взаимодополняющих технико-экономических критериев позволяет комплексно оценивать производительность, удельные затраты, коэффициенты использования оборудования и загруженность транспортных коммуникаций. Это обеспечивает выявление диспропорций между отдельными звеньями технологической цепи и определение элементов, ограничивающих производственную мощность комплекса.

К примеру, результаты диагностики показывают, что если удельный расход топлива превышает контрольные цифры на карьерах с аналогичными горно-геологическими и горнотехническими условиями (объем извлекаемой горной массы, средневзвешенные высота подъема и расстояние транспортирования), то подобный перерасход может быть связан либо с нерациональными условиями эксплуатации автотранспорта (дорожное покрытие не соответствует парку имеющихся транспортных средств — не удовлетворяет или превосходит по своему качеству, неоптимальный режим работы оборудования и т. д.), либо топливо просто сливается водителями.

Применение динамического подхода и имитационного моделирования позволяет исследовать различные варианты организации производственных процессов, оценивать влияние изменения параметров оборудования и условий эксплуатации на итоговые показатели работы системы. Это обеспечивает возможность выявления производственных резервов, определения экономически целесообразных направлений оптимизации работы геотехнологического комплекса в целом и отдельных звеньев технологической цепи, а также научного обоснования управленческих решений, направленных на повышение эффективности производства и рациональное использование имеющихся ресурсов.

Заключение

Таким образом, разработана методология диагностики технического состояния геотехнологических комплексов карьеров на основе имитационного моделирования. Предложенный подход обеспечивает оперативную и обоснованную оценку состояния комплексов с учетом наличия и характера проявления индивидуальных горно-геологических и горнотехнических условий эксплуатации, позволяя проводить как экспресс-анализ, так и детальное исследование отдельных звеньев технологической цепи, определения «узких» мест и оценки потенциальных возможностей производственной системы.

Практическая значимость методологии заключается в возможности использования результатов диагностики для обоснования управленческих решений, снижение удельных текущих затрат, оптимизации производственных мощностей и совершенствования процессов планирования и управления горным производством. Применение имитационного моделирования позволяет осуществлять оценку альтернативных вариантов функционирования комплекса и выбирать наиболее целесообразные направления повышения эффективности эксплуатации оборудования и транспортных коммуникаций.

Перспективы дальнейшего развития методологии связаны с совершенствованием методов прогнозирования состояния геотехнологических комплексов, обоснованием профилактических и «оздоровительных» мероприятий, а также расширением возможностей ее применения при оценке перспектив развития горнодобывающих предприятий.

Благодарность

Данная статья финансировалась Комитетом промышленности Министерства промышленности и строительства Республики Казахстан по ПЦФ BR23991563 «Создание инновационных ресурсосберегающих технологий добычи и комплексной переработки минерального и техногенного сырья».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Оценка эксплуатационной надежности карьерных комплексов «экскаватор — автосамосвал» // Journal of Mining Institute. – 2020. – Т. 241. – С. 10–21 (на английском языке)*
2. *Park S., Jung D., Choi Y. Новый комплексный ключевой показатель эффективности для оценки систем транспортировки на карьерах: применение стандартов GMG // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Т. 16. – Вып. 10. – Ст. 103589 (на английском языке)*
3. *Elbazi N., Tigami A., Laayati O., Maghraoui A. E., Chebak A., Mabrouki M. Мониторинг карьерных самосвалов на основе технологии «цифровых двойников» с интеграцией экспертной системы: пример исследования на экспериментальном карьере // 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM). – Невшехир, Турция, 2023. – С. 168–174 (на английском языке)*
4. *Plavšić J., Mišković I. Цифровой двойник на основе технологий виртуальной реальности для удаленного мониторинга горнодобывающего оборудования: архитектура и практический пример // Virtual Reality & Intelligent Hardwar. – 2024. – Т. 6. – Вып. 2. – С. 100–112 (на английском языке)*
5. *Nobahar P., Xu C., Dowd P., Faradonbeh R. S. Исследование систем «цифровых двойников» на горнодобывающих предприятиях: обзор // Green and Smart Mining Engineering. – 2024. – Т. 1. – Вып. 4. – С. 474–492 (на английском языке)*

6. *Moniri-Morad A., Sattarvand J. Сравнительное исследование методов оценки надежности систем: на примере карьерных самосвалов // Journal of Engineering and Applied Science. – 2023. – Т. 70. – Ст. 103 (на английском языке)*
7. *Botyan E., Pushkarev A. Совершенствование методики выбора моделей техники для формирования парка экскаваторов и транспортных средств при модернизации горно-транспортной системы с учетом арктической специфики // Transportation Research Procedia. –2021. – Т. 57. – Вып. 7. – С. 106–112 (на английском языке)*
8. *Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. Информационное обеспечение системы управления технологическими процессами на открытых карьерах // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2020. – Албена, Болгария, 2020. – С. 441–448 (на английском языке)*
9. *Бояндинова А. А., Адилханова Ж. А., Ткаченко О. Н. Методическое обеспечение корпоративного оперативного планирования работы экскаваторно-автомобильно-конвейерного комплекса на базе имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12–2. – С. 71–83 (на русском языке)*
10. *Бояндинова А. А., Адилханова Ж. А. Ключевые показатели проектных управленческих решений для устойчивого функционирования геотехнологических комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2–1. – С. 182–196 (на русском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Карьерлік экскаватор-самосвал кешендерінің пайдалану сенімділігін бағалау // Journal of Mining Institute. – 2020. – Т. 241. – Б. 10–21 (ағылшын тілінде)*
2. *Park S., Jung D., Choi Y. Ашық кеніштердегі тасымалдау жүйелерін бағалауға арналған жаңа кешенді негізгі өнімділік көрсеткіші: GMG стандарттарын қолдану // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Т. 16. – Шығ. 10. – 103589 (ағылшын тілінде)*
3. *Elbazi N., Tigami A., Laayati O., Maghraoui A. E., Chebak A., Mabrouki M. Сараптамалық жүйемен біріктірілген «цифрлық егіз» технологиясына негізделген карьерлік самосвалдарды мониторингтеу: тәжірибелік карьер мысалында // 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM). – Невшехир, Түркия, 2023. – Б. 168–174 (ағылшын тілінде)*
4. *Plavšić J., Mišković I. Тау-кен жабдықтарын қашықтан бақылауға арналған VR негізіндегі цифрлық егіз: архитектура және нақты мысал // Virtual Reality & Intelligent Hardwar. – 2024. – Т. 6. – Шығ. 2. – Б. 100–112 (ағылшын тілінде)*
5. *Nobahar P., Xu C., Dowd P., Faradonbeh R. S. Тау-кен өндірісіндегі цифрлық егіз жүйелерін зерттеу: шолу // Green and Smart Mining Engineering. – 2024. – Т. 1. – Шығ. 4. – Б. 474–492 (ағылшын тілінде)*
6. *Moniri-Morad A., Sattarvand J. Жүйе сенімділігін бағалау әдістерін салыстырмалы зерттеу: тау-кен өндірісіндегі самосвалдар мысалында // Journal of Engineering and Applied Science. – 2023. – Т. 70. – 103 (ағылшын тілінде)*
7. *Botyan E., Pushkarev A. Тау-кен көлік жүйесін жаңғырту барысында экскаваторлар мен көлік құралдары паркін қалыптастыру үшін техника үлгілерін таңдау әдістемесін, Арктиканың ерекшеліктерін ескере отырып, жетілдіру // Transportation Research Procedia. – 2021. – Т. 57. – Шығ. 7. – Б. 106–112 (ағылшын тілінде)*
8. *Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. Ашық карьерлердегі технологиялық үдерістерді басқару жүйесін ақпараттық қамтамасыз ету // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM 2020. – Албена, Болгария, 2020. – Б. 441–448 (ағылшын тілінде)*
9. *Бояндинова А. А., Адилханова Ж. А., Ткаченко О. Н. Имитациялық модельдеуге негізделген экскаватор-көлік-конвейер кешенінің жұмысының корпоративті оперативтік жоспарлауын әдістемелік қамтамасыз ету // Тау-кен ақпараттық-талдамалық бюллетень. – 2025. – № 12–2. – Б. 71–83 (орыс тілінде)*
10. *Бояндинова А. А., Адилханова Ж. А. Геотехнологиялық кешендердің тұрақты жұмыс істеуі үшін жобалық басқару шешімдерінің негізгі көрсеткіштері // Тау-кен ақпараттық-талдамалық бюллетень. – 2026. – № 2–1. – Б. 182–196 (орыс тілінде)*

REFERENCES

1. *Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes // Journal of Mining Institute. – 2020. – Vol. 241. – P. 10–21 (in English)*
2. *Park S., Jung D., Choi Y. A novel integrated key performance indicator for evaluating open-pit mine haulage systems: application of GMG standards // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Vol. 16. – Issue 10. – Article 103589 (in English)*

3. *Elbazi N., Tigami A., Laayati O., Maghraoui A. E., Chebak A., Mabrouki M. Digital Twin-Enabled Monitoring of Mining Haul Trucks with Expert System Integration: A Case Study in an Experimental Open-Pit Mine // 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM). – Nevsehir, Turkey, 2023. – P. 168–174 (in English)*
4. *Plavšić J., Mišković I. VR-based digital twin for remote monitoring of mining equipment: Architecture and a case study // Virtual Reality & Intelligent Hardware. – 2024. – Vol. 6. – Issue 2. – P. 100–112 (in English).*
5. *Nobahar P., Xu C., Dowd P., Faradonbeh R. S. Exploring digital twin systems in mining operations: A review // Green and Smart Mining Engineering. – 2024. – Vol. 1. – Issue 4. – P. 474–492 (in English)*
6. *Moniri-Morad A., Sattarvand J. A comparative study between the system reliability evaluation methods: case study of mining dump trucks // Journal of Engineering and Applied Science. – 2023. – Vol. 70. – Article 103 (in English)*
7. *Botyan E., Pushkarev A. Improving the methodology of choosing machinery models for the formation of an excavator and vehicle fleet during the modernization of a mining transport system, with account for the Arctic specifics // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 57. – Issue 7. – P. 106–112 (in English)*
8. *Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. An Information Support for Management System of Technological Processes at Open Pits // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM 2020. – Albena, Bulgaria, 2020. – P. 441–448 (in English)*
9. *Boyandinova A. A., Adilkhanova Zh. A., Tkachenko O. N. Metodicheskoe obespechenie korporativnogo operativnogo planirovanija raboty jekskavatorno-avtomobil'no-konvejernogo kompleksa na baze imitacionnogo modelirovanija [Methodical support for corporate operational planning of an excavator-truck-conveyor complex based on simulation modeling]. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' [Mining Informational and Analytical Bulletin]. – 2025. – No. 12–2. – P. 71–83 (in Russian)*
10. *Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. Kljuchevye pokazateli proektnyh upravlencheskih reshenij dlja ustojchivogo funkcionirovanija geotehnologicheskih kompleksov [Key performance indicators of project management decisions for sustainable operation of geotechnological complexes]. Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' [Mining Informational and Analytical Bulletin]. – 2026. – No. 2–1. – P. 182–196 (in Russian)*

Сведения об авторах:
Бояндинова А. А., д. т. н., доцент, ученый секретарь Филиала РГП «НЦ КПМС РК» «Институт горного дела им. Д. А. Кунаева» (г. Алматы, Казахстан), *A.Boyandinova@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0001-5197-4599
Адилханова Ж. А., к. т. н., гл. научный сотрудник Филиала РГП «НЦ КПМС РК» «Институт горного дела им. Д. А. Кунаева» (г. Алматы, Казахстан*), Zhanna_mark10@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0002-2637-4006

Авторлар туралы мәліметтер:
Бояндинова Ә. Ә., т. ғ. д., доцент, «ҚР ҰК МҚК» РМК «Д. А. Қонаев атындағы Тау-кен институты» филиалының ғылыми хатшысы (Алматы қ., Қазақстан)
Әділханова Ж. А., т. ғ. к., «ҚР ҰК МҚК» РМК «Д. А. Қонаев атындағы Тау-кен институты» филиалының бас ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Boyandinova A. A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Scientific Secretary of the «Institute of Mining named after D. A. Kunayev» Branch of the «NC CPMS RK» RSE (Almaty, Kazakhstan)
Adilkhanova Zh. A., Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher of the «Institute of Mining named after D. A. Kunayev» Branch of the «NC CPMS RK» RSE (Алматы қ., Қазақстан)

Код МРНТИ 52.13.19

*Zh. S. Kenzhetaev[1], M. K. Kylyshkanov[1], T. B. Yelemessov[1], R. G. Temirkhanova[2]
[1]Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan),
[2]Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

DESILICATION OF MACROPOROUS ANION-EXCHANGE RESINS USING HYDROFLUORIC ACID IN URANIUM HYDROMETALLURGY

Abstract. Macroporous anion exchange resins of the «Ambercept 920», «Purolite 500» and «APM» grades were used. The thermodynamic parameters of the ion exchange reaction were calculated using a modified Debye-Hückel model, considering the limita-tions of its applicability at high ionic strength. It has been established that ammonium bifluoride (NH_4HF_2) effectively desilicifies macroporous anion-exchange resins used in uranium hydrometallurgy. At a concentration of 30–50 g/dm³, a degree of desiliconisation of 96,3 ± 1.2% is achieved, with a reduction in strength of no more than 10–12%. The process follows pseudo-second-order kinetics (R^2 = 0,992). The formation of a stable SiF_6^{2-} complex (ΔG = −7,3…−13,0 kJ/mol) has been demonstrated. The results obtained confirm the high efficiency and technological feasibility of using NH_4HF_2 for the regeneration of ion-exchange resins.
Keywords: *anion-exchange resins, uranium hydrometallurgy, desiliconisation, mechanical strength, ammonium bifluoride, thermodynamic analysis.*

Уран гидрометаллургиясында макрокеуекті анионалмастырғыш шайырларды фторсутек қышқылының көмегімен кремнийден тазарту

Аңдатпа. «Ambercept 920», «Purolite 500» және «APM» маркалы макрокеуекті анион алмастыратын шайырлар қолданылды. Ион алмасу реакциясының термодинамикалық параметрлері жоғары иондық күшті қолдану шектеулерін ескере отырып модификацияланған Дебай-Хюкель моделі арқылы есептелді. Амоний бифториді (NH_4HF_2) уран гидрометаллургиясында қолданылатын макрокеуекті анион алмастыратын шайырларды тиімді десиликациялайтыны анықталды. 30–50 г/дм³ концентрацияда кремнийден тазарту дәрежесі 96,3 ± 1,2%-ға жетеді, ал беріктік 10–12%-дан артық төмендемейді. Процесс псевдоекінші реттік кинетикаға бағынады (R^2 = 0,992). Тұрақты SiF_6^{2-} кешенің ($\Delta G°$ = −7,3…−13,0 кДж/моль) түзілуі дәлелденді. Алынған нәтижелер NH_4HF_2-ні ион алмастыратын шайырларды регенерациялау үшін қолданудың жоғары тиімділігі мен технологиялық мүмкіндігін растайды.
Түйінді сөздер: *анион алмастыратын шайырлар, уран гидрометаллургиясы, кремнийден тазарту, механикалық беріктік, аммоний бифториді, термодинамикалық талдау.*

Обескремнивание макропористых анионообменных смол при помощи фтороводородной кислоты в гидрометаллургии урана

Аннотация. Использовались макропористые анионообменные смолы марок «Ambercept 920», «Purolite 500» и «APM». Термодинамические параметры реакции ионного обмена были рассчитаны с использованием модифицированной модели Дебая-Хюккеля с учетом ограничений ее применимости при высокой ионной силе. Установлено, что бифторид аммония (NH_4HF_2) эффективно удаляет кремний из макропористых анионообменных смол, используемых в гидрометаллургии урана. При концентрации 30–50 г/дм³ достигается степень десилицификации 96,3 ± 1,2%, при этом снижение прочности составляет не более 10–12%. Процесс протекает по кинетике псевдовторого порядка (R^2 = 0,992). Доказано образование стабильного комплекса SiF_6^{2-} (ΔG° = −7,3…−13,0 кДж/моль). Полученные результаты подтверждают высокую эффективность и технологическую осуществимость использования NH_4HF_2 для регенерации ионообменных смол.
Ключевые слова: *анионообменные смолы, гидрометаллургия урана, обескремнивание, механическая прочность, бифторид аммония, термодинамический анализ.*

Introduction

Ion-exchange technologies are widely used in uranium extraction, particularly in in-situ leaching (ISL). During operation, polystyrene-divinylbenzene anion exchangers become contaminated with silicon and silicates, reducing exchange capacity and impairing hydrodynamic characteristics. Silica precipitates or adsorbs on the granule surface, penetrates the macroporous resin and increases towards the granule centre [1]. As poisoning impurities accumulate, regeneration is required to restore sorption capacity.

The main silica-removal methods are coagulation (including heterocoagulation), flocculation, baromembrane treatment and sorption. Recent studies (2022–2025) identify coagulation, adsorption and membrane filtration as the principal approaches [2], although their technological implementation is complex. Therefore, adapting established treatment methods to the specific composition of productive uranium solutions is preferable to developing a new sorbent.

Literature data indicate that silicon can be removed using adsorbents and absorbents (aluminium oxide, aluminium and iron hydroxides, magnesium dioxide), complexing agents (potassium fluoride, hydrofluoric acid, ammonium molybdate), resins (Duolite A-102, Geon, Purolite) and coagulants (gelatin, gum arabic, guar gum) [3]. Sorbents and coagulants may cause uranium co-precipitation; fluorine-containing reagents are therefore promising because they form stable ***SiF6²⁻*** complexes [4].

The most effective methods for removing silicon from ion-exchange resins are alkaline desiliconisation and bifluoride treatment. Conventional alkaline treatment uses ***NaOH*** at pH 12,8–13,2 with protective additives [5]. Increasing ***NaOH*** from 20 to 60 g/dm³ raises desilication from 52% to 84%; the optimal 40–60 g/dm³ range reduces silicon to 1,6–3,5%. At 40 g/dm³, one treatment removes 79,7% of silicon, while a second treatment can achieve complete removal.

Repeated alkaline treatment partly restores exchange capacity but degrades the polymer matrix and lowers mechanical strength: by more than 5% after one treatment and by about 18% after a second. Protective salts can reduce this effect, but their type and concentration require additional study for modern resin grades.

Fluorine-containing additives for silica removal are less extensively studied. Reported reagents include ammonium bifluoride (***NH4HF2***), ammonium fluoride (***NH4F***), sodium tetrafluoroborate (***NaBF4***) and disodium fluorophosphate (***Na2PO3F***) [6]. Hydrofluoric acid and its salts are effective but their use is constrained by equipment corrosion and possible product contamination [7]. Studies [8, 9] describe ***HF*** formation from ammonium bifluoride and sulphuric acid and its subsequent reaction with silica, aluminosilicates and quartz:

$$NH_4HF_2 + H_2SO_4 \rightarrow NH_4SO_4 + HF. \quad (1)$$

$$6HF + SiO_2 \rightarrow SiF_4 + 2HF + 2H_2O. \quad (2)$$

$$CaAl_2SiO_8 + 16HF \rightarrow 2AlF_3 + 2SiF_4 + 8H_2O + CaF_2. \quad (3)$$

Hydrofluoric acid therefore destroys silica-bearing and aluminosilicate deposits, improving effective porosity and filtration characteristics; ***HF*** is largely consumed by reaction with quartz.

Given that, in aqueous solutions, silicon exists mainly in the form of weak orthosilicic acid

$$H_4SiO_4 \leftrightarrows H_3SiO_4^- + H^+ \quad (4)$$

and anion exchangers in the sulphate form interact in the technological cycle with the dissociated form of silicic acid and sorb silica in the form of a hydrosilicate ion:

$$R\text{-}N^+(CH_3)_3HSO_4^- + H_3SiO_4^- \rightarrow R\text{-}N^+(CH_3)_3HSiO_3^- + HSO_4^- + H_2O. \quad (5)$$

When bifluoride reacts with sorbed silica, a hexafluorosilicate ion is formed:

$$HSiO_3^- + 6HF \rightarrow SiF_6^{2-} + 3H_2O + H^+. \quad (6)$$

The fluorosilicate formed displaces the silicate from the ion exchange resin phase:

$$2(R\text{-}N^+HSiO_3^-) + 6HF_2^- \rightarrow (R\text{-}N^+)2SiF_6 + 2HSiO_3^- + 6HF. \quad (7)$$

A simplified overall ionic equation for the interaction process between anion ex-changers that have sorbed silica with bifluoride would take the following form:

$$R\text{-}N^+HSiO_3^- + 6\,HF_2^- \rightarrow R\text{-}N^+F^- + SiF_6^{2-} + 5HF + 3H_2O. \quad (8)$$

Although fluoride-containing reagents are known to dissolve silica, their use for regenerating macroporous anion-exchange resins under real uranium-hydrometallurgical conditions remains insufficiently studied. In particular, the effects of ***NH4HF2*** concentration on desilication, sorbent mechanical strength and process thermodynamics require evaluation.

Materials and Methods

A method for studying the desilication of ion exchangers with ammo-nium bifluoride

Ammonium bifluoride reacts with sulphuric acid to form hydrofluoric acid and ammonium sulphate. The resulting ***HF*** is highly reactive toward silica-containing compounds and can therefore remove silicon and fouling deposits from ion-exchange resins.

The effect of ***NH4HF2*** concentration was studied under static conditions using the setup in Figure 1: sorbent volume 0.2 dm³; L:S = 3:1; contact time 10–180 min; temperature (20 ± 2) °C. Experiments were performed in triplicate (n = 3); results are mean ± standard deviation, with 95% confidence intervals calculated using Student's t-distribution.

Kinetic data for 10–180 min were fitted to first- and second-order models and the Weber-Morris intradiffusion model.

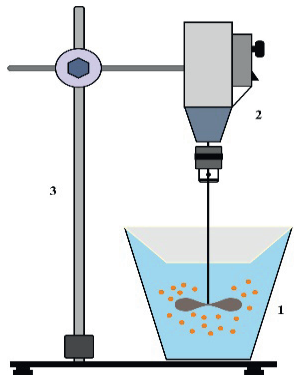


Figure 1. Laboratory setup for the removal of silicon from anion exchangers under agitation:
1 — laboratory beaker; 2 — stirrer; 3 — stand.

Сурет 1. Араластырғыш арқылы анион алмастырғыштардан кремнийді кетіруге арналған зертханалық қондырғы:
1 — зертханалық мензура; 2 — араластырғыш; 3 — штатив.

Рис. 1. Лабораторная установка по удалению кремния из анионитов в агитационном режиме:
1 — лабораторный стакан; 2 — мешалка; 3 — штатив.

Desilication tests used a sorbent from a NAC Kazatomprom JSC facility consisting of a mixture of «Ambercept 920», «Purolite 500» and «APM» anion-exchange resins.

Electron microscopy was used to compare silicon-saturated (~20–22 wt % ***SiO2***) and silicon-depleted sorbent samples.

Analytical-grade ammonium bifluoride (***NH4HF2***) was used; working solutions of 20–70 g/dm³ were prepared with distilled water.

NH4HF2 concentration was determined titrimetrically and silicon gravimetrically.

Mechanical strength was assessed by a drum abrasion test simulating operational loads and expressed as relative sorbent-volume loss after the standard test.

Sorbent morphology and elemental composition were studied by SEM-EDS using a JSM 6610 LV microscope (JEOL, Japan) with an INCA Energy 450 system (Oxford Instruments), comparing initial silicon-saturated and treated samples.

Results and Discussion

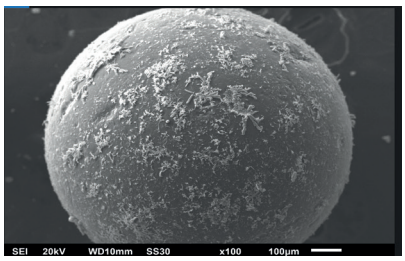
Figure 2 compares silicon-saturated sorbent with samples treated using ammonium bifluoride (SEM, JSM 6610 LV, JEOL).

Figure 2*(a)* shows a developed surface with fine inclusions and needle- and plate-like silicon-containing deposits, confirming saturation of the sorbent with silicon compounds.

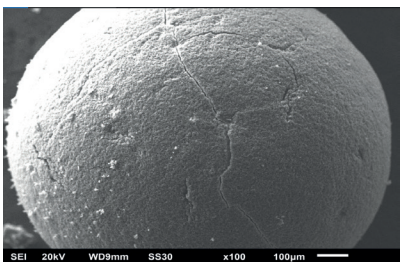
After ***NH4HF2*** treatment (Figure 2*(b)*), the surface becomes more uniform and contains fewer crystalline deposits, indicating silicon removal. Isolated microcracks are also visible, probably due to reagent action on the surface layer.

According to electron microscope images, the grains of the silicon-saturated sorbent are covered with «flakes» of various sizes and shapes (Figure 3).

Silicon-saturated particles are covered by unevenly distributed «scaly», needle- and plate-like formations that create a rough surface layer attributable to silicon-containing compounds.

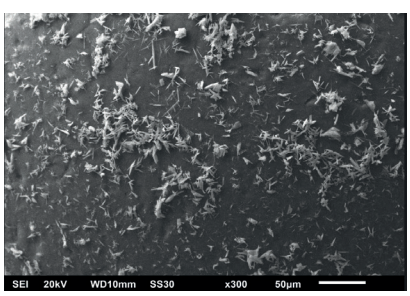


(a)

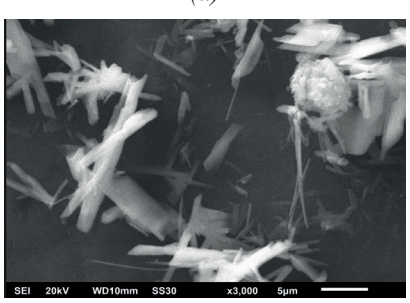


(b)

Figure 2. The microstructure of sorbent samples saturated with silicon *(a)* and after treatment with ammonium bifluoride *(b)*.
Сурет 2. Кремниймен қаныққан сорбент үлгілерінің микроқұрылымы *(а)* және аммоний бифторидімен өңдегеннен кейінгі микроқұрылымы *(b)*.
Рис. 2. Микроструктура образцов сорбентов, насыщенных кремнием *(а)* и после очистки бифторидом аммония *(б)*.



(a)



(b)

Figure 3. Microstructure of the «flakes» on the surface of the sorbent grains at different magnifications: *a – ×300; b – ×3000.*
Сурет 3. Сорбент түйіршіктерінің бетіндегі «қабыршақтардың» микроқұрылымы әртүрлі үлкейтулерде: *а – ×300; б – ×3000.*
Рис. 3. Микроструктура «чешуек» на поверхности зерен сорбента при различных увеличениях: *а – ×300; b – ×3000.*

At higher magnification (Figure 3*(b)*), the «flakes» appear as elongated plate- and needle-like crystals of heterogeneous size, sometimes grouped together. This confirms formation of a silicon-containing surface layer. Table 1 and Figures 4 and 5 present their chemical composition.

Table 1
Results of chemical analysis of the «flakes» on the grains of silicon-enriched sorbent, wt. %
Кесте 1
Кремниймен байытылған сорбенттің дәншелеріндегі «жалпақшалардың» химиялық талдау нәтижелері, салмақ бойынша %
Таблица 1
Результаты химического анализа «чешуек» на зернах насыщенного кремнием сорбента, вес. %

Spectrum	*Fe*	*O*	*Al*	*Si*	*S*	*U*	*W*	*Cl*
5	0,6	58,2	0,7	39,8	0,4	0,3		
6	0,3	35,8		46,3	1,7		7,0	0,3
7	0,4	56,1	0,5	38,5	0,5		4,1	

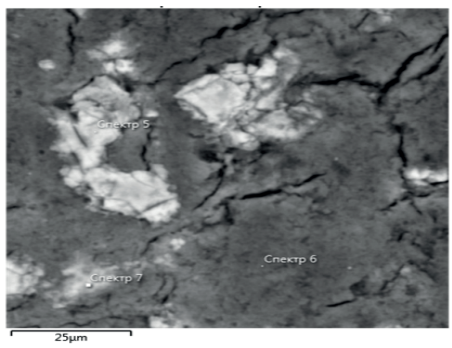


Figure 4. Electron micrograph of the surface of a silicon-saturated sorbent.
Сурет 4. Кремниймен қаныққан Сорбент бетінің электронды бейнесі.
Рис. 4. Электронное изображение поверхности сорбента, насыщенного кремнием.

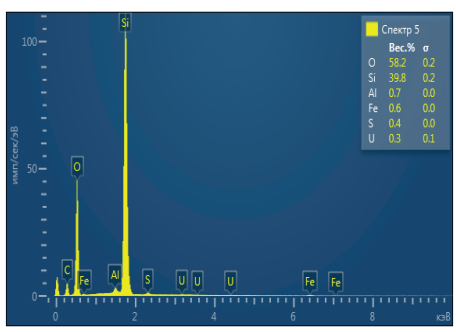


Figure 5. Spectral image of the chemical analysis results for a silicon-saturated sorbent.
Сурет 5. Кремниймен қаныққан сорбентті химиялық талдау нәтижелерінің спектрлік бейнесі.
Рис. 5. Спектральное изображение результатов химического анализа насыщенного кремнием сорбента.

Chemical analysis shows that the «flakes» contain mainly silicon, sulphur and iron. SEM-EDS confirms that the initial silicon-saturated ion exchanger is covered by complex deposits that block pores and impair mass transfer (Table 1). After ***NH4HF2*** treatment, the granule surface changes markedly; local microanalysis results are given in Table 2 and Figures 6 and 7.

Table 2

Results of chemical analysis of the sorbent surface during purification with ammonium bifluoride, % by weight

Кесте 2

Аммоний бифторидімен тазарту процесінде сорбент бетін химиялық талдау нәтижелері, салмақ бойынша %

Таблица 2

Результаты химического анализа поверхности сорбента в процессе очистки бифторидом аммония, вес. %

Spectrum	*W*	*Ca*	*F*	*Si*	*S*	*Cl*
3	1,4	20,5	62,7	11,0	3,6	0,8
4	2,6		61,6	14,4	9,4	2,1

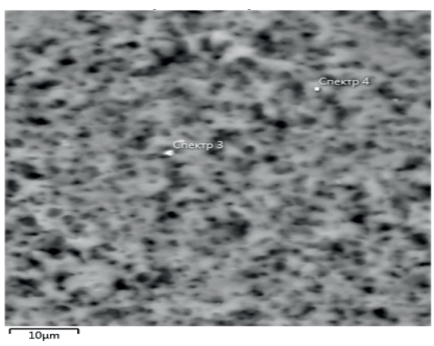


Figure 6. Electron micrograph of the sorbent surface during purification with ammonium bifluoride.
Сурет 6. Аммоний бифторидімен тазарту процесінде сорбент бетінің электронды бейнесі.
Рис. 6. Электронное изображение поверхности сорбента в процессе очистки бифторидом аммония.

After ***NH4HF2*** treatment, the granule surface becomes smoother and silicon decreases to 11–14% (Table 2). Fluorine

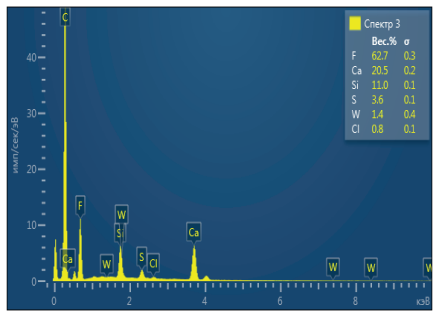


Figure 7. Spectral image of the chemical analysis results of the sorbent during the purification process using ammonium bifluoride.
Сурет 7. Аммоний бифторидімен тазарту процесінде сорбентті химиялық талдау нәтижелерінің спектрлік бейнесі.
Рис. 7. Спектральное изображение результатов химического анализа сорбента в процессе очистки бифторидом аммония.

in the EDS spectra (61–62%) confirms participation of $HF2^-$ in the reaction.

The results indicate chemical conversion of silicates into soluble fluorosilicate complexes rather than simple mechanical removal. Silicon depletion correlates with restoration of the pore structure. Table 3 summarises solution and resin composition after purification and the mechanical strength of the treated sorbent.

Table 3 and Figures 8–10 show that 20–70 g/dm³ ***NH4HF2*** provides high silicon removal. At 40–50 g/dm³, residual ***SiO2*** in the ionite is negligible. Increasing concentrations of $HF2^-$ and ***HF*** convert silicate groups into stable, soluble $SiF6^{2-}$, shifting equilibrium toward silicon desorption in accordance with reaction (8). The limiting stage is the surface chemical reaction between $HF2^-$ and silicate groups.

Kinetic fitting showed that the desilication process is best described by the pseudo-second-order model (R^2 = 0,992), consistent with the conclusion that the surface chemical reaction between $HF2^-$ and silicate groups controls the process.

An important advantage is preservation of resin integrity: 30–50 g/dm³ ***NH4HF2*** provides effective desilication while maintaining acceptable mechanical strength.

Table 3

Results of the desiliconisation process of the ion exchange resin using NH_4HF_2

Кесте 3

NH_4HF_2 көмегімен иониттің кремнийсіздену процесінің нәтижелері

Таблица 3

Результаты процесса обескремнивания ионита с NH_4HF_2

Sample №	Concentration of NH_4HF_2, g/dm³	SiO_2 in solution, g/dm³	SiO_2 in the resin, %	Degree of desiliconisation, %	Mechanical strength, %
1	20	3,26 ± 0,10	2,7 ± 0,08	77,96 ± 1,20	93,5 ± 1,5
2	30	5,60 ± 0,15	1,57 ± 0,05	87,18 ± 1,20	92,0 ± 1,3
3	40	7,53 ± 0,20	0,42 ± 0,03	96,57 ± 1,20	84,0 ± 1,8
4	50	8,51 ± 0,25	not found	100,0 ± 0,5	79,5 ± 2,0
5	60	8,28 ± 0,25	not found	100,0 ± 0,5	79,5 ± 2,0
6	70	8,51 ± 0,15	not found	100,0 ± 0,5	79,0 ± 1,8

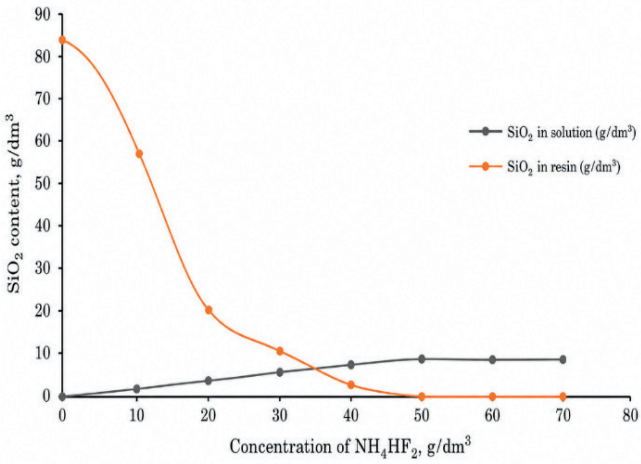


Figure 8. Effect of the mass concentration of NH_4HF_2 on the silicon content in the solution (mean ± standard deviation, n = 3).
Сурет 8. NH_4HF_2 массалық концентрациясының ерітіндідегі кремний құрамына әсері (орташа ± стандартты ауытқу, n = 3).
Рис. 8. Влияние массовой концентрации NH_4HF_2 на содержание кремния в растворе (среднее ± стандартное отклонение, n = 3).

Figure 9 shows how the sorbent's purification efficiency varies with the mass concentration of the bifluoride solution used.

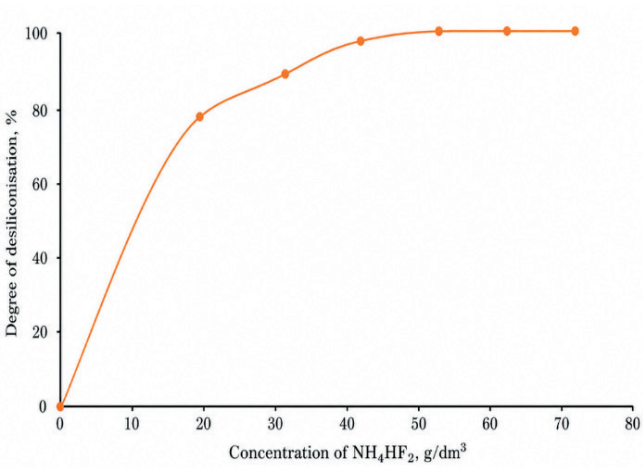


Figure 9. Relationship between the degree of desiliconisation of the anion exchange resin and the concentration of NH_4HF_2 (mean ± standard deviation, n = 3).
Сурет 9. Аниониттің кремнийсіздену дәрежесінің NH_4HF_2 концентрациясына тәуелділігі (орташа ± стандартты ауытқу, n = 3).
Рис. 9. Зависимость степени обескремнивания анионита от концентрации NH_4HF_2 (среднее ± стандартное отклонение, n = 3).

Figure 10 illustrates the effect of the mass concentration of the ammonium bifluoride solution on the mechanical strength of the regenerated sorbent.

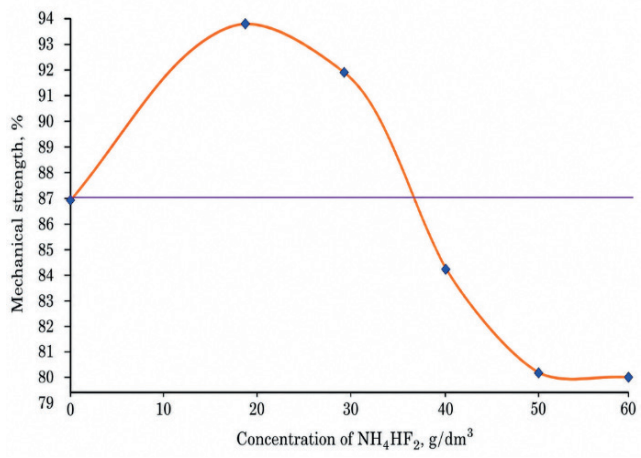


Figure 10. Effect of NH_4HF_2 concentration on the mechanical strength of the anion exchanger (mean ± standard deviation, n = 3).
Сурет 10. NH_4HF_2 концентрациясының аниониттің механикалық беріктігіне әсері (орташа ± стандартты ауытқу, n = 3).
Рис. 10. Влияние концентрации NH_4HF_2 на механическую прочность анионита (среднее ± стандартное отклонение, n = 3).

As shown in Figure 10, resin mechanical strength remains above 79% even at the highest reagent concentrations. At lower ***NH4HF2*** concentrations it increases slightly from 87% to 91–93%, probably because removal of surface deposits reduces structural defects.

Table 4 presents the performance criteria for bifluoride purification in comparison with alkaline desiliconisation.

Table 4
Quantitative criteria for purification using various reagents
Кесте 4
Әртүрлі реагенттермен тазалаудың сандық критерийлері
Таблица 4
Количественные критерии очистки различными реагентами

Parameters	Reagent	
	NH_4HF_2	NaOH
Degree of desiliconisation, %	96–100	80–84
Number of cycles	1	2–3
Loss of strength, %	10–12	15–-20
Reagent consumption, kg/m³	90–150	similarly
Mechanism	complex formation	alkaline hydrolysis

Bifluoride treatment achieves a high degree of desiliconisation in one stage, whereas alkaline treatment usually requires several cycles. At L:S = 3:1, ***NH4HF2*** consumption is 90–150 kg per 1 m³ of sorbent, comparable with alkaline desilica-

tion. Fewer regeneration cycles reduce total operating costs by 20–25%. In addition, bifluoride treatment is less destructive to the polymer matrix, extends sorbent service life and is thermodynamically favoured by formation of $SiF6^{2-}$.

Thus, bifluoride treatment is preferable where repeated regeneration would accelerate sorbent abrasion and degradation. Alkaline treatment remains applicable when reagent economy is prioritised, provided the number of cycles and protective additives are controlled.

To further evaluate the driving force of the process, thermodynamic parameters were calculated using the extended Debye-Hückel equation.

For ion-exchange equilibrium, the thermodynamic equilibrium constant K and standard Gibbs free energy $\Delta G°$ were determined for reaction (8); water activity was taken as 1:

$$K = \frac{a_{R-N^+F^-} \cdot a_{SiF_6^{2-}} \cdot a_{HF}^5}{a_{R-N^+HSiO_3^-} \cdot a_{HF_2^-}^6}.$$

Since the sorbent's ion-exchange groups are in the solid phase, their activities can be expressed in terms of the ratio of equivalent fractions in the sorbent:

$$\frac{a_{R-N^+F^-}}{a_{R-N^+HSiO_3^-}} \approx \frac{X_F}{X_{Si}},$$

where X_F is the equivalent fluorine content in the sorbent;

X_{Si} — equivalent silicon content in the sorbent.

The activity of the dissolved particles was calculated as:

$$a_i = \gamma_i C_i,$$

where a_i — the activity of the i-th component;

γ_i — activity coefficient of the i-th component;

C_i — the molar concentration of the i-th component.

For a solution of ammonium bifluoride with a mass concentration of 30 g/dm³, the molar concentration is:

$$C = \frac{30}{57} = 0{,}526 \text{ mol/dm}^3.$$

The ionic strength was calculated using the following equation:

$$I = \frac{1}{2}\sum C_i z_i^2,$$

where C — molar concentration, mol/dm³;

z — ion charge.

For NH_4^+ and HF_2^- ions, the ionic strength is:

$$I = \frac{1}{2}(0{,}526 + 0{,}526) = 0{,}526.$$

The activity coefficients were determined using the extended Debye-Hückel equation:

$$\log \gamma_i = \frac{-Az_i^2\sqrt{I}}{1+Ba_i\sqrt{I}},$$

where A — the Debye–Hückel constant, equal to 0,509 (298 K);

B — the Debye-Hückel constant, equal to 0,328 (298 K);

a_i — effective ionic radius, Å;

I — ionic force.

The activity coefficient for HF_2^- at $z = -1$ and a ≈ 4 Å will be:

$$\log \gamma = \frac{-0{,}509 \times 1 \times 0{,}725}{1+0{,}328 \times 4 \times 0{,}725} = -0{,}189$$

$$\gamma_{HF_2^-} = 0{,}65$$

The activity coefficient for SiF_6^{2-} at $z = -2$ and a ≈ 5 Å will be:

$$\log \gamma = \frac{-0{,}509 \times 4 \times 0{,}725}{1+0{,}328 \times 5 \times 0{,}725} = -0{,}676$$

$$\gamma_{SiF_6^{2-}} = 0{,}21$$

The effective radii adopted for $HF2^-$ (4 Å) and $SiF6^{2-}$ (5 Å) follow literature data for hydrated ions [10, 11] and permit estimation of activity coefficients at an ionic strength of about 0.5 mol/dm³.

Given a mass concentration of ammonium bifluoride of 30 g/dm³, a mass concentration of SiO_2 in the solution of 5,6 g/dm³, and a molar mass of SiF_6^{2-} of 144 g/mol, the molar concentration of SiF_6^{2-} will be

$$C_{SiF_6^{2-}} = \frac{5{,}6}{144} = 0{,}0389 \text{ mol/dm}^3,$$

and the activity:

$$a_{SiF_6^{2-}} = 0{,}21 \times 0{,}0389 = 0{,}00817.$$

Given that the molar concentration of HF_2^- is ≈ 0,526 mol/dm³ and the activity coefficient $\gamma = 0{,}65$, the activity of HF_2^- is:

$$a_{HF_2^-} = 0{,}65 \times 0{,}526 = 0{,}342,$$

Then $a^6_{HF_2^-} = (0{,}342)^6 = 0{,}0016$.

The equilibrium coefficient was calculated using the equation:

$$K \approx \frac{(X_F/X_{Si}) \times 0{,}00817}{0{,}0016}.$$

At a recovery rate of ≈ 87 %, the ratio

$$\frac{X_F}{X_{Si}} \approx \frac{0{,}87}{0{,}13} \approx 6{,}69.$$

Then $K = \frac{6{,}69 \times 0{,}00817}{0{,}0016} = 34{,}2.$

$\Delta G°$ was calculated using the equation:

$\Delta G° = -RT \ln K,$

where R — the gas constant, equal to 8,314 J/(mol*K);

T — process temperature 298 K;

$\ln K = 3{,}53$.

$\Delta G° = -8{,}314 \times 298 \times 3{,}53 = -8740$ J/mol = – 8,74 kJ/mol.

The results of calculations for the equilibrium constant and standard Gibbs energy of reaction (8) at different concentrations of ammonium bifluoride, using the extended Debye-Hückel equation, are presented in Table 5.

Table 5

Results of thermodynamic calculations for the desiliconisation of ion exchange resin using NH4HF2

Кесте 5

NH4HF2 қолдана отырып ион алмастыру шайырын десиликанизациялау бойынша термодинамикалық есептеулердің нәтижелері

Таблица 5

Результаты термодинамических расчетов процесса обескремнивания ионита с NH4HF2

Concentration NH_4HF_2, g/dm^3	Molar concentration, mol/dm^3	Ionic force	Activity coefficient for HF_2^-	Activity coefficient for SiF_6^{2-}	Equilibrium coefficient	Standard Gibbs energy, kJ/mol
20	0,351	0,351	0,69	0,28	18,4	- 7,3
30	0,526	0,526	0,65	0,21	34,2	- 8,7
40	0,702	0.702	0,61	0,17	62,5	- 10,3
50	0,877	0.877	0,58	0,14	95,8	-11,3
60	1,053	1,053	0,55	0,12	138,0	- 12,3
70	1,228	1,228	0,52	0,10	185,0	-13,0

With increasing ***NH4HF2*** concentration, K rises from 18,4 to 185 and $\Delta G°$ decreases from −7,3 to −13,0 kJ/mol (Table 5), demonstrating increasing thermodynamic favourability. Negative $\Delta G°$ values confirm stable formation of $SiF6^{2-}$ and a shift of equilibrium toward silicon removal.

The Debye-Hückel equation has limitations at elevated ionic strength. At $I > 0,5$, a possible error of 8–12% should be considered; nevertheless, the model is suitable for qualitative trends and ΔG° estimation. For greater accuracy, the Pitzer model may be used [12].

Thus, the values of K and $\Delta G°$ indicate a significant thermodynamic advantage, the stability of SiF_6^{2-} formation, and the high selectivity of the process.

Conclusion

Experiments confirmed that ammonium bifluoride effectively regenerates silicon-saturated anion exchangers.

The optimal ***NH4HF2*** concentration of 30–50 g/dm³ provides up to 100% silicon removal while preserving acceptable resin mechanical strength.

Using the extended Debye-Hückel equation at $I = 0,526$ mol/l gives $K \approx 34$ at 298 K. As ***NH4HF2*** increases from 20 to 70 g/dm³, $\Delta G°$ changes from −7.3 to −13.0 kJ/mol, confirming increasing stability of $SiF6^{2-}$ formation and high selectivity of bifluoride regeneration.

Thermodynamic and experimental data indicate the following regeneration mechanism:

- penetration of $HF2^-$ and ***HF*** into the macroporous resin and access to active sites;
- reaction with silicate groups fixed in the polymer matrix;
- formation of stable soluble $SiF6^{2-}$:

$$SiO_2 + 6HF \rightarrow SiF_6^{2-} + 2H_2O, \qquad (9)$$

which shifts equilibrium toward silicon removal;

- desorption of $SiF6^{2-}$ and restoration of ion-exchange capacity.

The method is technologically feasible and can reduce operating costs by extending resin service life in uranium-solution processing.

The results correspond to current hydrometallurgical trends (2022–2025) toward selective impurity removal with minimal damage to sorbents. Unlike alkaline hydrolysis, fluorine-containing reagents selectively convert silica into a soluble, thermodynamically stable form.

Acknowledgements

This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR28713471). «Development of methods for increasing the extraction of uranium from uranium-containing solutions by effectively reducing the content of silicon compounds».

REFERENCES

1. *Presence and impact of silica and organics in uranium in-situ recovery circuits / Sharafutdinov U. et al. // E3S Web of Conferences. – 2025. – Vol. 627. – Article 01011 (in English)*
2. *Treatment of burned soil leachates by ultrafiltration coupled with coagulation: Insights into membrane fouling / F. Sohail et al. // Water Research X. – 2025. – Vol. 28. – Article 100357 (in English)*
3. *Simultaneous Fe(OH)3 formation and silicon adsorption removal from reverse osmosis brine wastewater / J. Sun et al. // Chemical Engineering Research and Design. – 2022. – Vol. 188. – P. 964–971 (in English)*
4. *Insight into systematic formation of hexafluorosilicate during crystallization via self-assembly in a glass vessel / D. Kim et al. // RSC Advances. – 2022. – Vol. 12 (39). – P. 25118–25122 (in English)*

5. *Alternativnyy metod obeskremnivaniya ionoobmennykh materialov [Alternative Method for Desilication of Ion-Exchange Materials] E. K. Spirin et al. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy [News of Higher Educational Institutions]. – 2012. – Vol. 55. – No. 5. – P. 91–94 (in Russian)*
6. *Medyakina I. S., Pasechnik L. Kinetika vyshchelachivaniya kremnezema gidroftoridom ammoniya iz zhelezorudnykh khvostov obogashcheniya [Kinetics of Silica Leaching from Iron Ore Beneficiation Tailings with Ammonium Bifluoride] // Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii [Theoretical Foundations of Chemical Technology]. – 2024. – Vol. 58 (1) – P. 62–67 (in Russian)*
7. *Dyachenko A. Ammonium Fluorides in Mineral Processing // Fluoride / ed. E. W. Wambu, G. J. Lagat, A. Kiplagat. – London: IntechOpen, 2022. – P. 1–14 (in English)*
8. *Methods for intensification of borehole uranium mining at the fields with low filtration characteristics of ores / Zh. S. Kenzhetaev et al. // Mining of Mineral Deposits. – 2021. – Vol. 15 (3). – P. 95–101 (in English)*
9. *Innovative methods for intensifying borehole production of uranium in ores with low filtration characteristics / B. R. Rakishev et al. // News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2020. – Vol. 6. – No. 444. – P. 213–219 (in English)*
10. *Persson I. Structures of hydrated metal ions in solid state and aqueous solution // Liquids. – 2022. – Vol. 2 (3). – P. 210–242 (in English)*
11. *Hydrated anions: From clusters to bulk solution with quasi-chemical theory / D. T. Gomez et al. // Accounts of Chemical Research. – 2022. – Vol. 55 (16). – P. 2201–2212 (in English)*
12. *Pratskova S. E. Modelirovanie termodinamicheskikh svoystv sistemy metodom Pittsera [Modeling of the Thermodynamic Properties of the System Using the Pitzer Method] // Nauchnye vedomosti [Scientific Reports]. – 2017. – Vol. 40. – No. 18 (267). – P. 11–14 (in Russian)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Уранды орнында қалпына келтіру тізбектерінде кремний диоксиді мен органикалық заттардың болуы және олардың әсері / U. Sharafutdinov [және т. б.] // E3S Web of Conferences. – 2025. – Т. 627. – 01011 (ағылшын тілінде)*
2. *Күйген топырақ шаймаларын коагуляциямен бірге ультрафильтрация әдісімен өңдеу: мембраналардың ластануы туралы түсінік / F. Sohail [және т. б.] // Water Research X. – 2025. – Т. 28. – 100357 (ағылшын тілінде)*
3. *Бір мезгілде Fe(OH)3 түзілуі және кері осмос тұзды ерітіндісінің ағынды суларынан кремнийдің адсорбциясын жою / J. Sun [және т. б.] // Chemical Engineering Research and Design – 2022. – Т. 188. – Б. 964–971 (ағылшын тілінде)*
4. *Шыны ыдыста өздігінен құрастыру арқылы кристалдану кезінде гексафторосиликаттың жүйелі түзілуін түсіну / D. Kim [және т. б.] // RSC Advances – 2022. – Т. 12 (39). – Б. 25118–25122 (ағылшын тілінде)*
5. *Ион алмасу материалдарын кремнийлеудің балама әдісі / Е. К. Спирин [және т. б.] // Жоғары оқу орындарының жаңалықтары. – 2012. – Т. 55. – № 5. – Б. 91–94 (орыс тілінде)*
6. *Медякина И. С., Пасечник Л. Кремнеземді аммоний гидрофторидімен байытудың темір кені құйрықтарынан шаймалау кинетикасы // Химиялық технологияның теориялық негіздері. – 2024. – Т. 58 (1) – Б. 62–67 (орыс тілінде)*
7. *Dyachenko A. Пайдалы қазбаларды өңдеудегі аммоний фториді // Fluoride / ред. E. W. Wambu, G. J. Lagat, A. Kiplagat. – Лондон: IntechOpen, 2022. – Б. 1–14 (ағылшын тілінде)*
8. *Кендердің сүзу сипаттамалары төмен кен орындарында ұңғымалық уран өндіруді интенсификациялау әдістері / Zh. S. Kenzhetaev [және т. б.] // Mining of Mineral Deposits. – 2021. – Т. 15 (3). – Б. 95–101 (ағылшын тілінде)*
9. *Сүзу сипаттамалары төмен кендерде уранның ұңғымалық өндірісін күшейтудің инновациялық әдістері / B. R. Rakishev [және т. б.] // News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2020. – Т. 6. – № 444. – Б. 213–219 (ағылшын тілінде)*
10. *Persson I. Қатты күйдегі және сулы ерітіндідегі гидратталған металл иондарының құрылымдары // Liquids. – 2022. – Т. 2 (3). – Б. 210–242 (ағылшын тілінде)*
11. *Гидратталған аниондар: кластерлерден сусымалы ерітіндіге дейін квази-химиялық теория / D. T. Gomez [және т. б.] // Accounts of Chemical Research. – 2022. – Т. 55 (16). – Б. 2201–2212 (ағылшын тілінде)*
12. *Працкова С. Е. Питцер әдісімен жүйенің термодинамикалық қасиеттерін модельдеу // Ғылыми хабарлар. – 2017. – Т. 40. – № 18 (267). – Б. 11–14 (орыс тілінде)*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Присутствие и влияние кремнезема и органики в схемах извлечения урана на месте / U. Sharafutdinov [и др.] // E3S Web of Conferences. – 2025. – Т. 627. – Ст. 01011 (на английском языке)*

2. *Обработка выщелачивателей сгоревшего грунта методом ультрафильтрации в сочетании с коагуляцией: понимание проблемы загрязнения мембран / F. Sohail [и др.] // Water Research X. – 2025. – Т. 28. – Ст. 100357 (на английском языке)*
3. *Одновременное образование Fe(OH)3 и удаление кремния с помощью адсорбции из сточных вод, получаемых методом обратного осмоса / J. Sun [и др.] // Chemical Engineering Research and Design. – 2022. – Т. 188. – С. 964–971 (на английском языке)*
4. *Понимание систематического образования гексафторсиликата в процессе кристаллизации путем самосборки в стеклянном сосуде / D. Kim [и др.] // RSC Advances – 2022. – Т. 12 (39). – С. 25118–25122 (на английском языке)*
5. *Альтернативный метод обескремнивания ионообменных материалов / Е. К. Спирин [и др.] // Известия высших учебных заведений. – 2012. – Т. 55. – № 5. – С. 91–94 (на русском языке)*
6. *Медякина И. С., Пасечник Л. Кинетика выщелачивания кремнезема гидрофторидом аммония из железорудных хвостов обогащения // Теоретические основы химической технологии. – 2024. – Т. 58 (1) – С. 62–67 (на русском языке)*
7. *Dyachenko A. Фториды аммония при переработке полезных ископаемых // Fluoride / под ред. E. W. Wambu, G. J. Lagat, A. Kiplagat. – Лондон: IntechOpen, 2022. – С. 1–14 (на английском языке)*
8. *Способы интенсификации скважинной добычи урана на месторождениях с низкими фильтрационными характеристиками руд / Zh. S. Kenzhetaev [и др.] // Mining of Mineral Deposits. – 2021. – Т. 15 (3). – С. 95–101 (на английском языке)*
9. *Инновационные методы интенсификации скважинной добычи урана из руд с низкими фильтрационными характеристиками / B. R. Rakishev [и др.] // News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2020. – Т. 6. – № 444. – С. 213–219 (на английском языке)*
10. *Persson I. Структуры гидратированных ионов металлов в твердом состоянии и водном растворе // Liquids. – 2022. – Т. 2 (3). – С. 210–242 (на английском языке)*
11. *Гидратированные анионы: от кластеров к объемному раствору с использованием квазихимической теории / D. T. Gomez [и др.] // Accounts of Chemical Research. – 2022. – Т. 55 (16). – С. 2201–2212 (in English) (на английском языке)*
12. *Працкова С. Е. Моделирование термодинамических свойств системы методом Питцера // Научные ведомости. – 2017. – Т. 40. – № 18 (267). – С. 11–14 (на русском языке)*

Information about the authors:
Kenzhetaev Zh. S., Ph.D, Senior researcher, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan), *kzhiger@yahoo.com;* https://orcid.org/0000-0003-2009-6655
Kylyshkanov M. K., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan), *kylyshkanov@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0002-8304-7124
Yelemessov T. B., Senior researcher, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan), *baseke@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0008-4801-7203
Temirkhanova R. G., Ph.D, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), *r.temirkhanova@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0001-8219-0589

Авторлар туралы мәліметтер:
Кенжетаев Ж. С., Ph.D, аға ғылыми қызметкер, Қазақ-Британ техникалық университеті (Алматы қ., Қазақстан)
Кылышканов М. К., физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Қазақ-Британ техникалық университеті (Алматы қ., Қазақстан)
Елемесов Т. Б., аға ғылыми қызметкер, Қазақ-Британ техникалық университеті (Алматы қ., Қазақстан)
Темирханова Р.Г., Ph.D, Сәтбаев университеті (Алматы қ., Қазақстан)

Сведения об авторах:
Кенжетаев Ж. С., Ph.D, ст. научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (г. Алматы, Казахстан)
Кылышканов М. К., доктор физико-математических наук, профессор, Казахстанско-Британский технический университет (г. Алматы, Казахстан)
Елемесов Т. Б., ст. научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (г. Алматы, Казахстан)
Темирханова Р. Г., Ph.D, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Код МРНТИ 38.33.15

Л. Д. Исаева[1], Б. Б. Амралинова[1], К. С. Тогизов[1], *Ж. Б. Досымбекова[1, 2]

[1]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан),

[2]ТОО «Национальный научный центр сейсмологического наблюдения и исследования» (г. Алматы, Казахстан)

ПЕТРОПЛОТНОСТНАЯ АНОМАЛИЯ В СРЕДЕ ОТЛОЖЕНИЯ ШЕЕЛИТА НА МЕСТОРОЖДЕНИИ БАЯН

Аннотация. Ранее нами исследованы геологические факторы включения редкоземельных элементов (РЗЭ) в состав шеелита на редкометалльных месторождениях Казахстана и выделены геохимические и термодинамические факторы, влияющие на кристаллизацию шеелита с примесями РЗЭ. В данной статье рассматривается среда отложения шеелита с плотностными характеристиками, где оценивались петроплотностные аномалии в пределах месторождения Баян при отложении шеелита в скарновых и полевошпатовых рудах. Рассматривалась природа формирования петроплотностной аномалии за счет сравнения плотности метаморфических и гранитоидных пород с рудолокализующими породами (апоскарноидами). В результате установлено, что петроплотностная дифференциация рудовмещающих и рудолокализующих пород может рассматриваться как петрофизический признак среды локализации шеелитового оруденения и должна интерпретироваться в комплексе с геологическими, минералогическими и геохимическими данными.

Ключевые слова: *редкоземельные элементы, шеелит, геохимическая типизация, вольфрамовое оруденение, метасоматиты, гидротермальное минералообразование.*

Баян кен орнында шеелиттің жиналу ортасындағы петротығыздық аномалиясы

Аңдатпа. Бұған дейін біз Қазақстанның сирек металды кен орындарындағы шеелит құрамына сирекжер элементтерінің (СЖЭ) қосылуына әсер ететін геологиялық факторларды зерттеп, СЖЭ-лі шеелиттің кристалдануына ықпал ететін геохимиялық және термодинамикалық факторларды айқындадық. Мақалада шеелиттің шөгінді жиналу ортасы тығыздық сипаттамалары тұрғысынан қарастырылады. Баян кен орнында скарнды және далашпатты кендердегі шеелиттің қалыптасуымен байланысты петрофизикалық-тығыздық аномалиялары бағаланды. Петрофизикалық-тығыздық аномалиясының табиғаты метаморфтық және гранитоидты жыныстардың тығыздығын кенді локализациялайтын жыныстармен (апоскарноидтармен) салыстыру арқылы анықталды. Кенсыйыстырушы және кенді локализациялаушы жыныстардың петротығыздық дифференциациясы шеелитті минералдану локализациясының қосымша петрофизикалық белгісі ретінде анықталды және оны геологиялық, минералогиялық және геохимиялық деректермен интерпретациялау қажет.

Түйінді сөздер: *сирекжер элементтері, шеелит, геохимиялық типтеу, вольфрам кенденуі, метасоматиттер, гидротермалық минералтүзілу.*

Petrophysical density anomaly in the scheelite depositional environment of the Bayan deposit

Abstract. We previously investigated geological controls on Rare-earth elements (REE) incorporation into scheelite at rare-metal deposits in Kazakhstan and identified geochemical and thermodynamic factors governing crystallization of REE-bearing scheelite. This study evaluates the scheelite depositional environment using density characteristics, focusing on petrophysical density anomalies associated with scheelite in skarn and feldspar-rich ores of the Bayan deposit. The origin of these anomalies was assessed by comparing densities of metamorphic and granitoid rocks with those of ore-localizing rocks (aposkarnoids). The results show that petrodensity differentiation between ore-hosting and ore-localizing rocks may serve as a petrophysical indicator of scheelite mineralization and should be interpreted together with geological, mineralogical, and geochemical data.

Keywords: *rare earth elements, scheelite, geochemical classification, tungsten mineralization, metasomatites, hydrothermal mineral formation.*

Введение

Исследования по выявлению петрофизических аномалий для прогноза оруденений на месторождениях разной рудной формаций были проведены многими исследователями. Эти исследования показали, что изменения изученных петрофизических свойств вмещающих пород закономерно связаны с распространением и интенсивностью развития околорудных изменений пород и масштабами рудообразующего процесса [1, 2].

В этой связи актуальной задачей являются петрофизические особенности среды отложения шеелита с содержанием редких земель на месторождении Баян.

Комплексное изучение геологических факторов рудолокализации и физических свойств пород является одним из направлений развития методологии поисков и прогноза месторождений полезных ископаемых. Для казахстанской геологической научной школы традиционным является рассмотрение оруденения во взаимосвязи с геологическим строением, структурно-тектоническими условиями, вещественным составом и физическими свойствами геологической среды. Развитие такого подхода позволяет рассматривать петрофизические характеристики не изолированно, а как часть системы взаимосвязанных признаков формирования и локализации оруденения. В настоящей работе данный подход применен при оценке петроплотностных особенностей среды локализации шеелитового оруденения Баянского месторождения.

Руды Баянского месторождения систематически не изучались на редкие и рассеянные элементы-примеси. Это было оправдано тем, что при изучении вещественного состава различных типов руд месторождения Баян, не было обнаружено собственных минеральных форм РЗЭ. Тем не менее, в практическом плане большой интерес представляло выяснение уровней накопления РЗЭ в продуктах обогащения руд, прежде всего, в шеелитовом концентрате. Полученные результаты исследователями (ВИМС) показали, что содержание РЗЭ в шеелитовом концентрате почти в 2 раза больше, чем в чистом шеелите. Такое «обогащение» шеелитового концентрата объясняется присутствием минералов, близких к шеелиту по флотационным свойствам, которые также могут выступать концентраторами РЗЭ.

Цель исследования — установить особенности петроплотностной дифференциации рудовмещающих и рудолокализующих пород Баянского месторождения и оценить ее значение как одного из петрофизических признаков среды локализации шеелитового оруденения на основе комплексного анализа геологических, минералогических и петрофизических данных.

Фактические материалы

Баянское месторождение редких металлов (вольфрамовое) расположено между двумя гранитогнейсовыми куполами: Баянским и Зерендинским, ближе к ядерной части первого, среди метамофических пород. Оно приурочено

к северо-восточному крылу антиклинальной складки, осложненной в осевой части тектоническими нарушениями.

Месторождение классифицируется как ***стратиформное,*** принадлежащее к формации ***шеелит-сульфидно-скарноидного*** типа и сосредоточено в разрезе метаморфической толщи. Из осадочных образований на площади месторождения установлены только глины и суглинки. В пределах исследуемого участка выделяется зона выветрелых пород небольшой мощности, представленная на рис. 1.

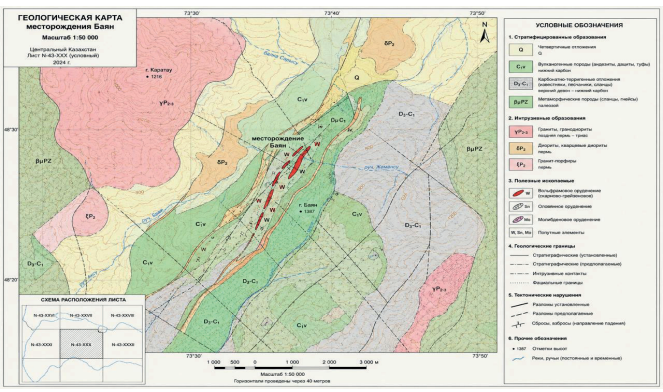


Рис. 1. Геологическая карта месторождения Баян, М:1: 50 000.
Сурет 1. Баян кен орнының геологиялық картасы, масштабы 1:50 000.
Figure 1. Geological map of the Bayan deposit, scale 1:50 000.

Рудное поле месторождения Баян подразделяется на несколько перспективных зон, в пределах которых развиты рудные тела (рис. 2).

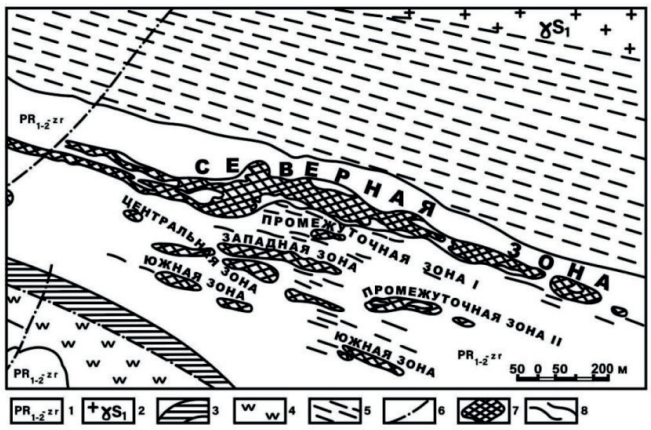
Основная стадия рудоотложения связывается с метасоматическим изменением скарноидов, проявившимся главным образом, в развитии в них парагенезисов кварц-эпидот-актинолитовой и кварц-эпидот-флогопитовой стадий, как результат действия на вмещающие породы флюидов, приведшего к образованию сложного комплекса.

На месторождении скарноиды группируются в 13 зон и являются основной ***рудоконтролирующей структурой***.

Помимо скарновых зон, на месторождении Баян развиты многочисленные штокверковые зоны кварца, сульфидов и шеелита. Эти зоны представляют собой сеть мелких трещин и разломов, заполненных указанными минералами. Штокверковые зоны часто сопровождают скарновые образования, формируя комплексные рудные тела.

На месторождении выделяются два естественных типа руд в зависимости от петрографического состава исходных пород: скарноидный и кварцполевошпатовый. Первый тип включает руды, обнаруженные в скарноидах, амфиболитах, амфиболевых сланцах и гнейсах, в то время как второй тип связан с рудами, найденными в гранодиоритах-гнейсах, гранито-гнейсах, гранитах и других кварц-полевошпатовых породах гнейсово-сланцевого комплекса.

По структурным и текстурным особенностям выделяются два типа руд: вкрапленные и прожилково-вкрапленные. Рудная вкрапленность обусловлена наличием зерен молибдошеелита и шеелита размером от долей миллиметра до нескольких миллиметров, редко достигающих 1 сантиметра.



1 – Зерендинская серия: гнейсы, гранито-гнейсы, амфиболиты; 2 – граниты зерендинского комплекса; 3 – гранатовые и пироксеновые скарны; 4 – кварциты; 5 – зоны интенсивной трещиноватости, брекчирования и милонитизации пород; 6 – тектонические нарушения; 7 – рудоносные зоны; 8 – рудные тела.

Рис. 2. Месторождение Баян по Х. Адамьяну.
Сурет 2. Х. Адамьян бойынша Баян кен орны.
Figure 2. Bayan deposit according to H. Adamyan.

Прожилковые и вкрапленно-прожилковые руды характерны для кварц-полевошпатового типа руд. В прожилках и гнездовидных скоплениях размеры выделений шеелита могут достигать 2–3 сантиметра.

Таким образом, основным рудным минералом является шеелит, представленный четырьмя генерациями, среди которых наибольшее значение имеют I и II генерации, первый распространен актинолит-эпидотовых рудах, содержит до 23 г/т редкие земли (цериевая подгруппа), второй отмечен в рудных прожилках и кварц-эпидот-флогопитовых метасоматитах, где содержание редких земель достигает до 600 г/т (преимущественно иттриевая подгруппа) [3].

Методы исследованиия

Основным научным методом исследования является анализ и синтез материалов по геологии, минералогии и петрофизике на теоретическом уровне; использование ИИ для построения схематических картографических материалов. В рамках исследования проведено сопоставление геологического положения основных типов руд, минералогических особенностей рудовмещающих и рудолокализующих образований и их плотностных характеристик. Петроплотностная дифференциация оценивалась путем сопоставления значений плотности рудовмещающих пород и связанных с ними рудолокализующих метасоматических образований. Комплексное рассмотрение геологических, минералогических и петрофизических данных позволило оценить плотностные различия в различных средах локализации шеелитового оруденения. Такой подход позволяет рассматривать петрофизические характеристики в системе взаимосвязанных геологических признаков рудолокализации и соответствует традициям комплексного изучения месторождений, развиваемым казахстанской геологической научной школой.

Результаты и обсуждение

По геологическим данным отмечено, что около 52% объема рудной массы на месторождении Баян относятся к скарноидным типам, в то время как кварц-полевошпатовые типы руд составляют около 48%. Обычно вкрапленные и прожилково-вкрапленные разновидности руд, занимающие примерно одинаковые объемы в рудных телах, соседствуют пространственно, и руды в общем, имеют прожилково-вкрапленную структуру [4, 5, 6].

В этой связи нас интересует **среда** *отложения шеелита и петроплотностная аномалия* на данном месторождении. Для решения поставленного вопроса была построена с помощью ИИ схематическая геологическая карта месторождения Баян с отражением зон промышленных руд в скарноидах.

По геологическим данным скарноиды имеют зональное строение и являются основным рудоконтролирующим фактором на данном месторождении. Зональность от периферий к центру по преобладанию тех или иных минералов имеет следующий вид: амфиболосодержащие породы (сланец, гнейс, амфиболит), эпидот-карбонаты, пироксен-эпидот-кальцит, гранат-пироксен-кальцит [7].

Поздние гидротермальные изменения на месторождении Баян наложены на эти скарноиды с образованием в них выше отмеченных апоскарноидных метасоматитов (эпидот-актинолит-кварцевые и эпидот-флогопит-кварцевые). Именно здесь наблюдаются кристаллизация вкрапленного шеелита (скарноидные руды) и образования кварц-пирит-шеелитовых прожилков (полевошпатовые руды) с редкоземельными элементами. Рудные залежи, имеющие промышленное значение, в виде пластов и линз локализованы внутри этих скарноидов.

Следовательно, на данном месторождении апоскарноидные метасоматиты являются благоприятной средой для локализации шеелита с примесями редкоземельных элементов.

Далее на картографический материал были добавлены петроплотностные характеристики пород, развитых в районе месторождения. В результате картогафический материал позволил сделать некоторые выводы по оценке петрофизической аномалии в среде отложения шеелита, как концентратора РЗЭ (рис. 3).

1) В ***скарноидах*** *развита рудная вкрапленность, формирующая скарновые руды. Размеры зерен шеелита I и II генераций варьируют от нескольких миллиметров до 1 см, реже достигая этой величины. Размерность зерен связана с термодинамическими условиями кристаллизации шеелита [8].*

Поэтому рассматриваем петрофизические особенности среды отложения шеелита этих двух генераций, где рудовмещающей породой являются скарноиды с плотностью 2,96 г/см³, а гидротермально измененные породы, апоскарноидные метасоматиты, являются рудолокализующими телами (развитыми среди скарноидов) с плотностью 3,01 г/см³ [9].

В таком случае между ними появляется относительно незначительная дифференциация по петроплотностной их характеристике в пределах 0.05 г/см³, а причиной является близкий их минералогический состав. Например, кварц-

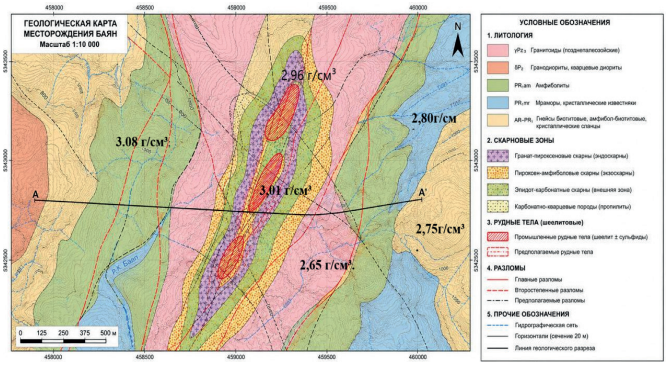


Рис. 3. Схематическая геологическая карта месторождения Баян с рудными телами и скарновыми зонами, М: 1: 10000.
Сурет 3. Баян кен орнының кен денелері мен скарнды аймақтары көрсетілген сызбалық геологиялық картасы, М: 1: 10000.
Figure 3. Schematic geological map of the Bayan deposit showing ore bodies and skarn zones, scale 1:10000.

эпидот-флогопитовые метасоматиты с шеелитом содержат все минералы, встречающиеся в скарноидах, а также кварц-эпидот-актинолитовых метасоматитах. Кроме того, они могут содержать такие реликтовые минералы исходных пород, как сульфиды, флюорит, кальцит, сфен, апатит. С другой стороны, это является диагностическими признаками апоскарноидных метасоматических образований.

2) Рудный ***штокверк*** *образуется за счет крупных тектонических разломов, которые ограничивают месторождение и играют большую роль в его формировании. В штокверках основная масса шеелита сконцентрирована в пирит, пирит-кварцевых жилах и прожилках, развитых среди гранито-гнейсов и гнейсов, слагающих кварц-полевошпатовые руды. В прожилках и гнездовидных скоплениях размеры выделений шеелита могут достигать 2–3 сантиметра, и в виде единичных зерен распределен ближе к зальбандам прожилков. Особенность шеелита из прожилков — широкое развитие тонкой вкрапленности халькопиритом [9].*

Штокверковая минерализация для месторождения Баян является одной из форм локализации шеелитового оруденения, и она тесно связана с постмагматическими гидротермальными процессами, которые перерабатывали ранее сформированные скарны и концентрировали шеелит в системе многочисленных пересекающих прожилков.

К ведущим минералам данной разновидности руд относятся полевые шпаты, суммарное содержание которых достигает 92%. При этом роль других минералов, таких, как эпидот, актинолит, гранат, пироксен, флогопит, шеелит, пирит резко подчинена. Средняя петроплотностная характеристика редкометалльных рудных штокверков многими исследователями обозначена в пределах 2,72 г/см³ [10, 11].

Гранито-гнейсы, где локализован рудный штокверк, состоит из кварца и полевых шпатов, где совокупное количество их в породе достигает до 92–96%. Петроплотностные характеристики таких пород для данного рудного района определены в пределах 2,65 г/см³.

Тогда при отложении шеелита в штокверках между рудовмещающей породой (гранито-гнейсами) и рудолокализующей структурой (штокверками) появляется незначительная петроплостностная дифференциация в пределах 0.07 г/см^3, причиной является близкое содержание полевых шпатов в их минералогическом составе (таблица 1).

Цифровые инструменты использованы для технической визуализации схематических картографических материалов.

Таблица 1

Петрофизическая модель района месторождения Баян

Кесте 1

Баян кен орны ауданының петрофизикалық моделі

Table 1

Petrophysical model of the Bayan deposit area

Группа	Система	Отдел	Индекс		Мощность, м	Характеристика пород	Плотность, г/см^3	магнитная восприимчивость, \ (10^{-6}) ед. СГС	Поляризуемость, %	Радиоактивность, мкр/час
	НЕОГЕНОВАЯ ЧЕТВЕРТИЧНАЯ		O_{III}		3-15	суглинки глины	**2.53**	**5**		**12**
КАЙНОЗОЙСКАЯ		МОЦЕН — ПЛИОЦЕН	N_2^3-Q_{II}		63	глины				
			N_{1-2}pv		25	глины				
			N_1trm		28	глины				
			N_1trs		20	глины пески				
ПРОТЕРОЗОЙ			PR_3^3sh		1300	сланцы разные известняки мраморизир.	**2.47–2.65** **2.68**	**6–31** **3**		
			PR_{1-2}zr		1500	**сланцы:** амфибол. биотитовые **амфиболит.** **гнейсы:** амфиболов. биотитовые **кварциты** гранито-гнейсы амфиболовые **граниты** лейкокр.	 **3.08** **2.81** **3.02** **2.87** **2.65** **2.68** **2.57** **2.54**	 **19** **27** **41** **29** **58** **10** **82** **40**	 **0.77** **0.36** **1.01** **3.06** **0.47**	**18–34** **10–30** **16–22**

Заключение

В целом, незначительная петроплотностная дифференциация (0,05–0,07 г/см³) между рудовмещающими породами и рудолокализующими средами, обусловленная сходством их минералогического состава, является одним из петрофизических факторов, характеризующих условия включения редкоземельных элементов в структуру шеелита на месторождении Баян. Вследствие этого, при формировании скарновых и полевошпатовых руд в среде отложения шеелита наблюдается незначительная петроплотностная аномалия, но относительно других пород, развитых в районе месторождения, данная закономерность не сохраняется.

Наибольшая аномалия по плотности наблюдается между рудолокализующей средой (метасоматитами) и гранитоидами, а также карбонатными породами, наименьшая петроплотностная аномалия наблюдается между метасоматитами и амфиболами, так как скарноиды были образованы за счет амфиболосодержащих пород.

Сама по себе петроплотностная аномалия указывает лишь на геологическую благоприятную структуру для концентрирования рудных элементов. Для подтверждения наличия руды ее интерпретируют совместно с другими геофизическими и геохимическими методами.

Таким образом, результаты исследования показывают эффективность комплексного использования геологических, минералогических, геохимических и петрофизических признаков при изучении среды локализации редкометаллного оруденения. Такой подход продолжает развитие методологических принципов комплексного исследования месторождений, характерных для казахстанской геологической научной школы, и может быть использован при совершенствовании подходов к прогнозированию редкометаллного оруденения.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках программно-целевого финансирования BR24992920 «Исследование научно-культурного наследия академика К. И. Сатпаева – путь к развитию научных школ Казахстана».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Выявление и использование петрофизических аномалий для прогноза оруденения на урановом месторождении Антей (Юго-Восточное Забайкалье) / В. А. Минаев [и др.] // Вестник московского университета. – 2016. – № 2. – С. 24–33 (на русском языке)*
2. *Петрофизическая модель Сырымбетского рудного поля / М. Ш. Омирсериков [и др.] // Вестник КБТУ. – 2018. – № 4 (47). – С. 101–109 (на русском языке)*
3. *Справочник. Месторождения редких металлов и редких земель Казахстана. – Алматы, 1998. – 136 с. (на русском языке)*
4. *Щерба Г. Н., Кудряшов А. В., Сенчило Н. П. Редкометалльное оруденение Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 221 с. (на русском языке)*
5. *Гуляев А. П. Рудовмещающие скарноиды Баянского месторождения (Казахстан). Петрология рудоносных метасоматитов. – Фрунзе: Илим – 1980. – С. 56–58 (на русском языке)*
6. *Щерба Г. Н., Губайдуллин Ф. Г. К происхождению шеелитового месторождения Баян // Геология рудных месторождений. – 1984. – № 5. – С. 20–27 (на русском языке)*
7. *Исследование редкометалльного месторождения Баян на основе ГИС-технологий и прогнозная оценка его дополнительных ресурсов для промышленных руд / M. Sh. Omirserikov [и др.] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2017. – № 6 (426). – С. 56–64 (на английском языке)*
8. *Адамьян Н. Х. Баянское месторождение вольфрама в Кокчетавской области КазССР: отчет № 41342. – 1989 (на русском языке)*
9. *Специфика включения редкоземельных элементов в рудные минералы редкометалльных месторождений Казахстан / Zh. Dossymbekova [и др.] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2024. – № 6 (467). – С. 99–113 (на английском языке)*
10. *Открытие щелочного комплекса с редкометалльной и редкоземельной минерализацией в районе Дагеле, Восточный Куньлунь / W. Li [и др.] // Geotectonica et Metallogenia. – 2021. – Т. 45. – №. 6 (на английском языке)*
11. *Омирсериков М. Ш., Рамадан Х. С. Геолого-геофизические и петрофизические признаки редкометалльных месторождений центрального Казахстана и их поисковые значение // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. – 2014. – № 1 (403). – С. 54–59 (на русском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Антей уран кен орнында (Оңтүстік-Шығыс Забайкалье) кенденуді болжау үшін петрофизикалық аномалияларды анықтау және пайдалану / В. А. Минаев [және т. б.] // Мәскеу университетінің хабаршысы. – 2016. – № 2. – Б. 24–33 (орыс тілінде)*
2. *Сырымбет кен өрісінің петрофизикалық моделі / М. Ш. Омирсериков [және т. б.] // ҚБТУ хабаршысы. – 2018. – № 4 (47). – Б. 101–109 (орыс тілінде)*
3. *Анықтамалық. Қазақстанның сирек металдар және сирек жер элементтері кен орындары. – Алматы, 1998. – 136 б. (орыс тілінде)*
4. *Щерба Г. Н., Кудряшов А. В., Сенчило Н. П. Қазақстанның сирек металды үйінділенуі (оруденениенің қалыптасуы). – Алма-Ата: Наука, 1988. – 221 б. (орыс тілінде)*
5. *Гуляев А. П. Баян кен орнының руда сыйыстырушы скарноидтары (Қазақстан) Рудалы метасоматиттер петрологиясы. – Фрунзе: Илим, 1980. – Б. 56–58 (орыс тілінде)*
6. *Щерба Г. Н., Губайдуллин Ф. Г. Баян шеелит кенорнының шығу тегі туралы // Кенді кенорындарының геологиясы. – 1984. – № 5. – Б. 20–27 (орыс тілінде)*
7. *Баян сирек металдар кен орнын ГАЖ технологиясы негізінде зерттеу және оның өнеркәсіптік кендерге арналған қосымша ресурстарын болжамды бағалау / M. Sh. Omirserikov [және т. б.] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2017. – № 6 (426). – Б. 56–64 (ағылшын тілінде)*

8. *Адамьян Н. Х. ҚазКСР Көкшетау облысындағы Баян вольфрам кен орны. – № 41342 есеп, 1989 (орыс тілінде)*
9. *Қазақстанның сирек металды кен орындарындағы кен минералдарына сирек жер элементтерінің ену ерекшеліктері / Zh. Dossymbekova [және т. б.] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2024. – № 6 (467). – Б. 99–113 (ағылшын тілінде)*
10. *Шығыс Куньлундағы Дагеле ауданында сирек металдар мен сирек жер элементтері минералданған сілтілі кешеннің ашылуы / W. Li [және т. б.] // Geotectonica et Metallogenia. – 2021. – Т. 45. – № 6 (ағылшын тілінде)*
11. *Омирсериков М. Ш., Рамадан Х. С. Орталық Қазақстандағы сирек металды кен орындарының геологиялық-геофизикалық және петрофизикалық белгілері және олардың іздеудегі маңызы // ҚР ҰҒА Хабарлары. Геология және техникалық ғылымдар сериясы. –2014. – № 1 (403). – Б. 54–59 (орыс тілінде)*

REFERENCES

1. *Vyjavlenie i ispol'zovanie petrofizicheskih anomalij dlja prognoza orudenenija na uranovom mestorozhdenii Antej (Jugo-Vostochnoe Zabajkal'e) [Identification and Application of Petrophysical Anomalies for Mineralization Prediction at the Antey Uranium Deposit (Southeastern Transbaikalia)] V. A. Minaev et al. Vestnik moskovskogo universiteta [Bulletin of Moscow University]. – 2016. – No. 2. – P. 24–33 (in Russian)*
2. *Petrofizicheskaja model' Syrymbetskogo rudnogo polja [Petrophysical Model of the Syrymbet Ore Field] M. Sh Omirserikov et al. Vestnik KBTU [KBTU Bulletin]. – 2018. – No. 4 (47). – P. 101–109 (in Russian)*
3. *Spravochnik. Mestorozhdenija redkih metallov i redkih zemel' Kazahstana [Reference Book. Deposits of Rare Metals and Rare Earth Elements of Kazakhstan]. – Almaty, 1998. – 136 p. (in Russian)*
4. *Shcherba G. N., Kudryashov A. V., Senchilo N. P. edkometall'noe orudenenie Kazahstana [Rare-Metal Ore Formation (Ore Genesis) of Kazakhstan]. – Alma-Ata: Nauka. – 1988. – 221 p. (in Russian)*
5. *Gulyaev A. P. Rudovmeshhajushhie skarnoidy Bajanskogo mestorozhdenija (Kazahstan). Petrologija rudonosnyh metasomatitov [Ore-Bearing Skarnoids of the Bayan Deposit (Kazakhstan). Petrology of Ore Metasomatites]. – Frunze: Ilim, – 1980. – P. 56–58 (in Russian)*
6. *Shcherba G. N., Gubaidullin F. G. K proishozhdeniju sheelitovogo mestorozhdenija Bajan [On the Origin of the Bayan Scheelite Deposit]. Geologija rudnyh mestorozhdenij [Geology of Ore Deposits]. – 1984. – No. 5. – P. 20–27 (in Russian)*
7. *Investigation of rare metal deposit called bayan on the basis of gis technology and forecast assessment of its additional resources for industrial ores / M. Sh. Omirserikov et al. // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2017. – No. 6 (426). – P. 56–64 (in English)*
8. *Adamyan N. Kh. Bajanskoe mestorozhdenie vol'frama v Kokchetavskoj oblasti KazSSR: otchet № 41342 [The Bayan Tungsten Deposit in the Kokshetau Region of the Kazakh SSR. – Report No. 41342], 1989 (in Russian)*
9. *Specific Features of the Incorporation of Rare Earth Elements into Ore Minerals of Rare-Metal Deposits of Kazakhstan / Zh. Dosymbekova et al. // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – Almaty. – 2024. – No. 6 (467). – P. 99–113 (in English)*
10. *Discovery of Rare and REE-Mineralized Alkaline Complex in the Dagele Area, East Kunlun / W. Li et al. // Geotectonica et Metallogenia. – 2021. – Vol. 45. – No. 6 (in English)*
11. *Omirserikov M. Sh., Ramadan Kh. S. Geologo-geofizicheskie i petrofizicheskie priznaki redkometall'nyh mestorozhdenij central'nogo Kazahstana i ih poiskovye znachenie [Geological, Geophysical, and Petrophysical Indicators of Rare-Metal Deposits in Central Kazakhstan and Their Exploration Significance]. Izvestija NAN RK. Serija geologii i tehnicheskih nauk [News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences]. – 2014. – No. 1 (403). – P. 54–59 (in Russian)*

Сведения об авторах:
Исаева Л. Д., доктор геолого-минералогических наук, ассоц. профессор, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), *l.issayeva@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0001-7184-6351
Амралинова Б. Б., Ph.D, ассоц. профессор, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), *b.amralinova@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0003-0716-5265
Тогизов К. С., Ph.D, ассоц. профессор, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), *k.togizov@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0002-4830-405X
Досымбекова Ж. Б., ст. преподаватель Satbayev University (г. Алматы, Казахстан); руководитель отдела, ТОО «Национальный научный центр сейсмологического наблюдения и исследования» (г. Алматы, Казахстан), *d_zhansaya@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0000-6683-4604

Авторлар туралы мәліметтер:
Исаева Л. Д., Сәтбаев университетінің геология-минералогия ғылымдарының докторы, қауымдастырылған профессоры (Алматы қ., Қазақстан)
Амралинова Б. Б., Сәтбаев университетінің Ph.D докторы, қауымдастық профессоры (Алматы қ., Қазақстан)
Тогизов К. С., Сәтбаев университетінің Ph.D докторы, қауымдастық профессоры (Алматы қ., Қазақстан)
Досымбекова Ж. Б., Сәтбаев университетінің аға оқытушысы (Алматы қ., Қазақстан); бөлім басшысы, «Сейсмологиялық байқаулар және зерттеу ұлттық ғылыми орталығы» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Issayeva L. D., Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, associate professor, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)
Amralinova B. B., Ph.D, associate professor, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)
Togizov K. S., Ph.D, associate professor, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)
Dossymbekova Zh. B., Senior Lecturer at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan); Head of Department, LLP «National Scientific Center for Seismological Observation and Research» (Almaty, Kazakhstan)

Код МРНТИ 89.57.45

Д. Ж. Рахимбаева, *Д. А. Шоганбекова, А. А. Алтаева
ТОО «Международная образовательная корпорация» (г. Алматы, Казахстан)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ В ИНТЕРЕСАХ ОСВОЕНИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Аннотация. В статье представлена методика геоинформационного мониторинга береговой линии Северного Каспия на основе данных дистанционного зондирования Земли, платформы Google Earth Engine и ГИС ArcGIS. Выполнен многолетний анализ спутниковых снимков Landsat за 1990–2025 гг., проведено сравнение спектральных индексов для выделения водной поверхности, установлено преимущество индекса MNDWI. Построены цифровые модели береговой линии, выполнена оценка пространственно-временной динамики и прогноз ее изменений до 2050 года. Полученные результаты могут использоваться при инженерно-геодезическом сопровождении нефтегазовых проектов, обновлении картографических материалов и управлении прибрежными территориями.
Ключевые слова: *Северный Каспий, береговая линия, дистанционное зондирование Земли, Google Earth Engine, геоинформационные системы, Landsat, геоинформационный мониторинг.*

Мұнай-газ кен орындарын игеру мүддесінде Солтүстік Каспийдің жағалау сызығын мониторингтеуде ГАЖ мен қашықтан зондтау технологияларын пайдалану

Аңдатпа. Мақалада Жерді қашықтан зондтау деректері, Google Earth Engine бұлттық платформасы және ArcGIS геоақпараттық жүйесі негізінде Солтүстік Каспийдің жағалау сызығын геоақпараттық мониторингтеу әдістемесі ұсынылған. 1990–2025 жылдар аралығындағы Landsat спутниктік суреттеріне көпжылдық талдау жүргізіліп, су бетін анықтауға арналған спектрлік индекстер салыстырылды және MNDWI индексінің артықшылығы анықталды. Жағалау сызығының цифрлық модельдері құрылып, оның кеңістіктік-уақыттық динамикасы бағаланып, 2050 жылға дейінгі өзгерістеріне болжам жасалды. Алынған нәтижелерді мұнай-газ жобаларын инженерлік-геодезиялық сүйемелдеуде, картографиялық материалдарды жаңартуда және жағалау аумақтарын басқаруда қолдануға болады.
Түйінді сөздер: *Солтүстік Каспий, жағалау сызығы, Жерді қашықтықтан зондтау, Google Earth Engine, геоақпараттық жүйелер, Landsat, геоақпараттық бақылау.*

Application of GIS and remote sensing for monitoring the north Caspian shoreline to support oil and gas field development

Abstract. The article presents a methodology for geoinformation monitoring of the Northern Caspian coastline based on Earth remote sensing data, the Google Earth Engine platform, and ArcGIS GIS technologies. A long-term analysis of Landsat satellite imagery for the period 1990–2025 was carried out, and a comparison of spectral indices for water surface extraction was performed, revealing the advantage of the MNDWI index. Digital shoreline models were developed, the spatiotemporal dynamics of shoreline changes were assessed, and its future changes were forecasted up to 2050. The obtained results can be used for engineering and geodetic support of oil and gas projects, updating cartographic materials, and managing coastal territories.
Keywords: *Northern Caspian, coastline, Earth remote sensing, Google Earth Engine, geographic information systems, Landsat, geoinformation monitoring.*

Введение

Освоение нефтегазовых месторождений Северного Каспия требует постоянного контроля состояния прибрежной зоны, поскольку изменения береговой линии оказывают непосредственное влияние на эксплуатацию инженерной инфраструктуры и безопасность производственных объектов [1–3]. Это обусловливает необходимость регулярного геодезического мониторинга.

Традиционные геодезические методы обеспечивают высокую точность измерений, однако их применение на обширных территориях связано со значительными затратами. Современные технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), геоинформационные системы (ГИС) и облачная платформа Google Earth Engine (GEE) позволяют автоматизировать обработку многолетних спутниковых данных, анализировать динамику береговой линии и получать оперативную информацию о пространственных изменениях.

Для Северного Каспия мониторинг береговой зоны особенно актуален в связи с многолетними колебаниями уровня моря, влияющими на нефтегазовые месторождения, транспортную инфраструктуру и гидротехнические сооружения. Интеграция данных ДЗЗ и ГИС обеспечивает эффективный инструмент для оценки изменений береговой линии и поддержки инженерных решений.

Целью настоящего исследования является разработка методики геоинформационного мониторинга береговой линии Северного Каспия с использованием технологий дистанционного зондирования Земли, геоинформационных систем и облачной платформы Google Earth Engine для информационного обеспечения геодезического сопровождения освоения нефтегазовых месторождений. В работе выполнен многолетний анализ спутниковых данных Landsat, проведена оценка эффективности различных спектральных индексов выделения водных объектов, построены цифровые модели изменений береговой линии и выполнено прогнозирование дальнейшей трансформации прибрежной зоны.

Объект и методы исследования

Каспийское море, в особенности его казахстанский сектор, расположенный приблизительно на 47° с. ш. и 51° в. д., представляет собой регион, характеризующийся значительными экологическими, экономическими и геополитическими вызовами. Основной причиной этих вызовов являются колебания уровня моря, обусловленные воздействием как природных, так и антропогенных факторов [4]. Дополнительное влияние на развитие региона оказывает интенсивное освоение нефтегазовых месторождений, что повышает требования к мониторингу прибрежной зоны и оценке пространственных изменений.

Объектом исследования является северо-восточное побережье Каспийского моря, охватывающее юго-восточ-

ную часть Прикаспийской низменности. Данная территория обладает значительными запасами биологических и минеральных ресурсов и имеет важное экономическое значение для Республики Казахстан благодаря размещению объектов нефтегазовой промышленности, транспортной инфраструктуры и портовых комплексов. Регион представляет особый интерес для изучения взаимосвязи природных процессов и хозяйственной деятельности человека.

Гидрологический режим Каспийского моря характеризуется значительными многолетними колебаниями уровня воды. В период регрессии уровень моря снижался до -27…-28 м относительно уровня Мирового океана, что сопровождалось сокращением площади акватории и освоением прибрежных территорий. В 1978–1991 гг. уровень моря повысился примерно на 2,5 м, вызвав затопление отдельных населенных пунктов и объектов инфраструктуры [5, 6]. Наиболее значительные изменения наблюдались в периоды 1930–1977 гг. (понижение уровня) и 1978–1995 гг. (быстрый подъем), оказавшие существенное влияние на хозяйственную деятельность и прибрежные экосистемы (рис. 1) [7, 8].

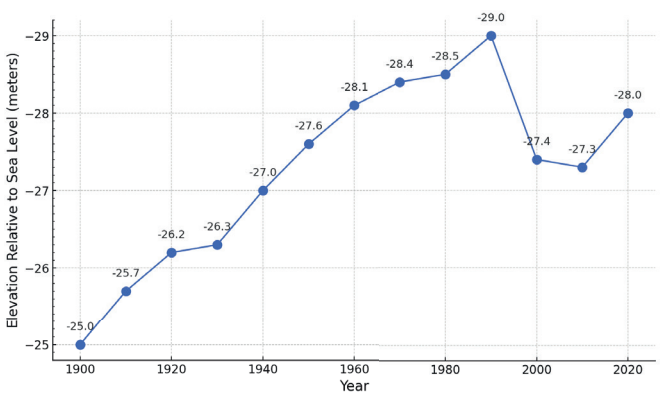


Рис. 1. Многолетние изменения среднегодового уровня Каспийского моря в XX — начале XXI века.
Сурет 1. XX ғасыр мен XXI ғасырдың басындағы Каспий теңізінің орташа жылдық деңгейінің көпжылдық өзгерістері.
Figure 1. Long-term changes in the annual mean water level of the Caspian Sea during the 20th and early 21st centuries.

Современные тенденции снижения уровня Каспийского моря создают риски для развития прибрежных территорий, инженерной инфраструктуры и освоения нефтегазовых месторождений. Для оценки пространственно-временной динамики береговой линии применяются методы геоинформационного мониторинга, основанные на использовании архивных и современных спутниковых данных.

Изменение уровня моря определяется совокупностью климатических, гидрологических и антропогенных факторов, включая колебания речного стока, строительство гидротехнических сооружений и разработку нефтегазовых месторождений. Комплексный анализ этих факторов необходим для разработки эффективных мер управления прибрежными территориями.

Обработка данных дистанционного зондирования выполнялась в программном комплексе ArcGIS Enterprise 10.6.1, обеспечивающем геоинформационный анализ, геометрическую коррекцию изображений, преобразование координат и работу с растровыми и векторными данными. Для анализа береговой линии использовались многоспектральные спутниковые изображения, позволяющие надежно выделять водные объекты по их спектральным характеристикам [9, 10].

Высокая точность пространственной привязки обеспечивалась современными алгоритмами преобразования координат, включая преобразование Хельмерта и библиотеку PROJ.4, что является необходимым условием достоверного анализа многолетних изменений береговой линии.

В качестве исходных данных использовались многоспектральные снимки Landsat 4 TM, Landsat 5 TM и Landsat 8 OLI/TIRS с пространственным разрешением 30 м за 1990–2025 гг. Для сопоставимости результатов преимущественно использовались августовские снимки с облачностью менее 5%. Пространственное разрешение 30 м позволяет оценивать средне- и крупномасштабную динамику береговой линии, но ограничивает выявление мелких береговых форм и локальных изменений (рис. 2).

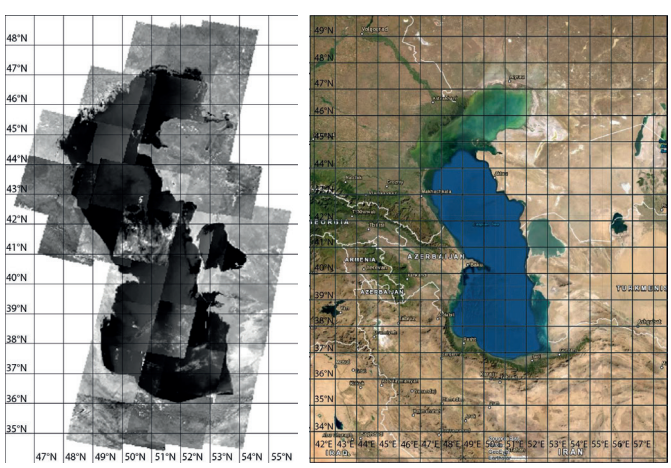


Рис. 2. Район исследования: *(а) мозаика спутниковых изображений Landsat исследуемой территории за 2008 год; (б) расположение Каспийского моря.*
Сурет 2. Зерттеу аймағы: *(а) 2008 жылғы зерттелетін аумақтың Landsat спутниктік суреттерінің мозаикасы; (б) Каспий теңізінің орналасуы.*
Figure 2. Study area: *(a) Landsat satellite image mosaic of the study area for 2008; (b) location of the Caspian Sea.*

Для выделения водных объектов использовался анализ спектральных сигнатур в сочетании с возможностями ArcGIS, что обеспечило высокую точность их идентификации и пространственного анализа. В исследовании применялись спутниковые изображения Landsat (USGS) уровня Level-1, прошедшие радиометрическую и геометрическую коррекцию и привязанные в системе координат WGS-84 (UTM).

Выявленная динамика береговой линии обусловлена совокупным воздействием климатических и геодина-

мических факторов. Климатические изменения влияют на водный баланс и уровень Каспийского моря, тогда как тектонические процессы связаны с вертикальными движениями земной поверхности [11, 12]. Данные ДЗЗ позволяют оценить динамику береговой линии, но не позволяют количественно разграничить вклад этих факторов.

Автоматизированная классификация выполнялась с применением алгоритма машинного обучения Random Forest, обученного на эталонных участках водной поверхности, суши, растительности и антропогенных объектов. После классификации выполнялась векторизация береговой линии и пространственный анализ ее многолетних изменений, включая оценку смещения береговой зоны и площадей осушения и затопления.

В качестве исходных данных использовались снимки Landsat 4 TM, Landsat 5 TM и Landsat 8 OLI/TIRS с пространственным разрешением 30 м за период 1990–2025 гг. Предварительная обработка включала маскирование облачности, радиометрическую и геометрическую коррекцию, а также приведение данных к единой системе координат.

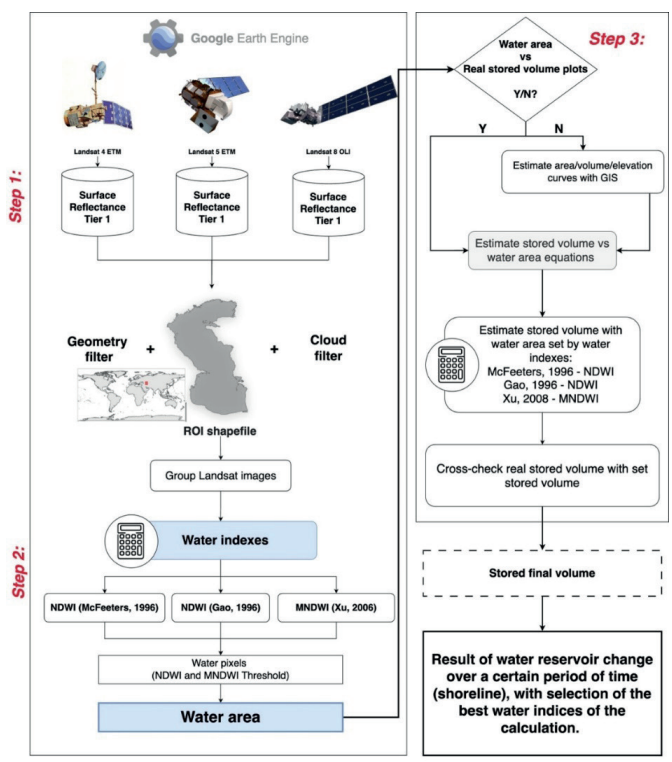


Рис. 3. Общая схема методики многовременного геоинформационного анализа изменений береговой линии.
Сурет 3. Жағалау сызығының өзгерістерін көпуақыттық геоақпараттық талдау әдістемесінің жалпы сызбасы.
Figure 3. General workflow of the multi-temporal geospatial analysis methodology for shoreline change detection.

Методика исследования включала три основных этапа (рис. 3):

- предварительную обработку многовременных спутниковых изображений и подготовку данных к анализу;

- расчет спектральных индексов и автоматизированную классификацию водной поверхности с использованием алгоритма Random Forest;

- построение цифровой береговой линии, выполнение пространственного анализа ее изменений и оценку динамики береговой зоны.

Для повышения точности выделения водной поверхности использовалась комбинированная система принятия решений, основанная на совместном анализе индексов MNDWI, NDWI, NDVI, EVI и LSWI (рис. 4).

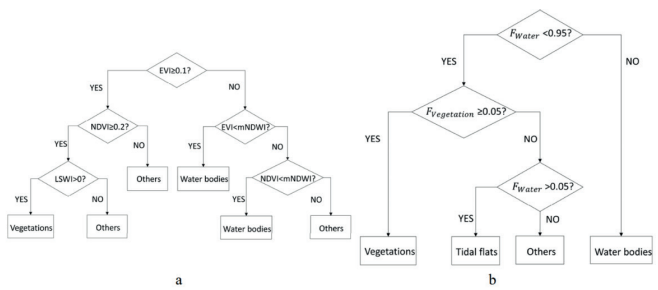


Рис. 4. Алгоритм принятия решений при классификации водной поверхности по спектральным индексам.
Сурет 4. Спектрлік индекстер бойынша су бетінің жіктелуін анықтау алгоритмі.
Figure 4. Decision-making algorithm for water surface classification based on spectral indices.

Такой подход позволил уменьшить ошибки классификации, возникающие при использовании одного спектрального индекса, особенно на участках с заболоченными территориями, прибрежной растительностью и мелководьем.

Полученные результаты классификации были интегрированы в геоинформационную систему, где выполнялись построение цифровых береговых линий, анализ их пространственного положения в различные годы наблюдений и оценка изменений площади акватории Северного Каспия.

Результаты

Для определения наиболее эффективного метода выделения береговой линии проведена сравнительная оценка спектральных индексов WRI, NDWI, MNDWI, NDVI и NDMI. Точность классификации определялась путем сопоставления бинарных масок водной поверхности, полученных по спутниковым изображениям Landsat, с эталонными масками, сформированными по данным Sentinel-2 высокого пространственного разрешения. Для количественной оценки использовался показатель общей точности (Accuracy), таблица 1.

$$Accuracy\ (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{/N_w - N_{wm}/}{N_{wm}}\right). \qquad (1)$$

Результаты оценки точности представлены в таблице 1.

Таблица 1

Точность выделения водной поверхности с использованием различных спектральных индексов

Кесте 1

Әртүрлі спектрлік индекстерді пайдалану арқылы су бетінің бөліну дәлдігі

Table 1

Accuracy of water surface extraction using different spectral indices

Index	Range	Overall accuracy
WRI	> 1.0	86.5%
NDWI	> 0.0	86.2%
	> 0.18	87.2%
MNDWI	> 0.0	86.2%
	> 0.18	88.2%
NDVI	– 0.45… – 0.25	87.2%
	< 0.0	86.2%
NDMI	> 0.0	85.2%
	> 0.14	86.0%

Анализ полученных результатов показал, что наибольшую точность обеспечивает индекс MNDWI при пороговом значении более 0,18, для которого общая точность классификации составила 88,2%. Для остальных индексов точность изменялась в пределах 85,2–87,2%, что подтверждает преимущество использования MNDWI при автоматизированном выделении береговой линии Северного Каспия.

Для визуальной оценки качества классификации полученные маски водной поверхности были сопоставлены с эталонными изображениями высокого пространственного разрешения (рис. 5).

Визуальный анализ подтвердил результаты количественной оценки. Индекс MNDWI наиболее точно определяет границы водной поверхности, минимизируя ошибки классификации на участках с прибрежной растительностью и мелководьем. В связи с этим дальнейший анализ динамики береговой линии выполнялся с использованием именно данного индекса.

На основе многолетних спутниковых наблюдений Landsat выполнено построение цифровых береговых линий Северного Каспия за период 1990–2025 гг. Для каждого года формировались композитные изображения, что обеспечило сопоставимость результатов и снизило влияние сезонных факторов (рис. 6).

Полученные картографические материалы свидетельствуют о постепенном смещении береговой линии, наиболее выраженном в северо-восточной части исследуемой территории. Пространственный анализ позволил выявить участки регрессии моря, определить направления смещения береговой линии и оценить масштабы изменения прибрежной зоны. Полученные данные могут использоваться при обновлении цифровых карт, инженерно-геодезических изысканиях и мониторинге объектов нефтегазовой инфраструктуры.

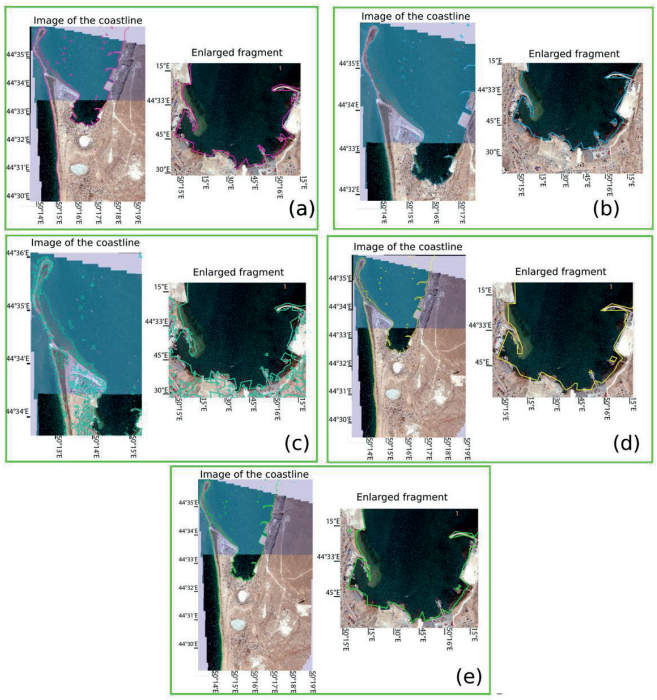


Рис. 5. Сравнение результатов выделения водной поверхности с использованием различных спектральных индексов: *а — NDVI; б — WRI; в — NDMI; г — MNDWI; д — NDWI.*

Сурет 5. Әртүрлі спектрлік индекстерді пайдалану арқылы су бетін бөлудің нәтижелерін салыстыру: *а — NDVI; б — WRI; в — NDMI; г — MNDWI; д — NDWI.*

Figure 5. Comparison of water surface extraction results using different spectral indices: *(a) — NDVI; (b) — WRI; (c) — NDMI; (d) — MNDWI; (e) — NDWI.*

На основании результатов классификации рассчитана динамика площади акватории Северного Каспия за исследуемый период (рис. 7).

Полученные результаты свидетельствуют об устойчивой тенденции сокращения площади акватории, сопровождающейся изменением конфигурации береговой линии. Наиболее интенсивные изменения наблюдаются в мелководной северной части моря, где процессы осушения приводят к образованию новых участков суши. Данные изменения необходимо учитывать при проектировании береговой инфраструктуры, актуализации топографических карт и выполнении инженерно-геодезических работ.

На основе многолетних спутниковых наблюдений и прогнозного моделирования выполнена оценка возможных изменений береговой линии Северного Каспия до 2050 года.

Результаты моделирования показывают, что при среднем сценарии изменения климата уровень Каспийского моря может снизиться на 6–10 м, что приведет к сокращению площади акватории примерно на 15%. При высоком сценарии прогнозируется снижение уровня моря на 10–14 м и сокращение площади водной поверхности до 24%. Полученные оценки характеризуются высокой достоверностью, что подтверждается значениями показателей RMSE и MAE.

Таблица 2

Проверка точности прогнозирования изменений уровня Каспийского моря при различных сценариях выбросов

Кесте 2

Әртүрлі шығарындылар сценарийлері жағдайындағы Каспий теңізі деңгейі өзгерістерін болжау дәлдігін тексеру

Table 2

Verification of Prediction Accuracy for Caspian Sea Level Changes Under Different Emission Scenarios

Сценарий выбросов	Прогнозируемое снижение уровня моря (м)	Сокращение площади поверхности (%)	RMSE (м)	MAE (м)
Средний	6–10	15	1.2	0.9
Высокий	10–14	24	1.5	1.1

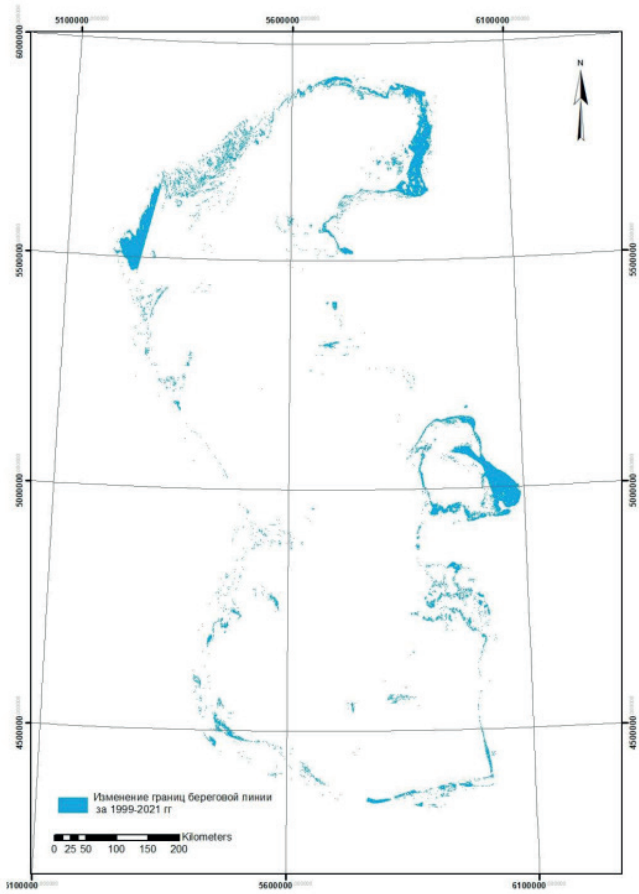


Рис. 6. Изменение положения береговой линии Северного Каспия за период 1990–2025 гг.
Сурет 6. 1990–2025 жылдар аралығындағы Солтүстік Каспий жағалау сызығының өзгеруі.
Figure 6. Changes in the shoreline position of the North Caspian Sea during the period 1990–2025.

Полученные прогнозные данные имеют практическое значение для геодезического сопровождения освоения нефтегазовых месторождений Северного Каспия. Они могут использоваться при выборе площадок строительства новых объектов, проектировании береговой инфраструктуры, обновлении геопространственных баз данных, оценке риска осушения прибрежных территорий и планировании инженерно-геодезических работ.

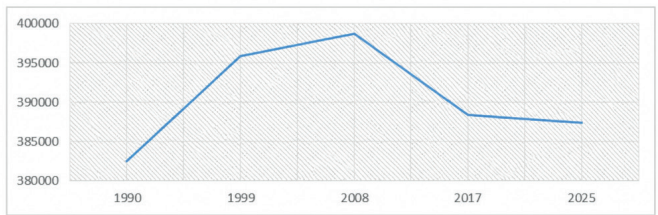


Рис. 7. Динамика изменения площади акватории Северного Каспия в 1990–2025 гг.
Сурет 7. 1990–2025 жылдар аралығындағы Солтүстік Каспий акваториясы ауданының өзгеру динамикасы.
Figure 7. Dynamics of changes in the water surface area of the North Caspian Sea during 1990–2025.

Заключение

В работе разработана и апробирована методика геоинформационного мониторинга береговой линии Северного Каспия, основанная на использовании технологий дистанционного зондирования Земли, Google Earth Engine и ArcGIS. Предложенный подход обеспечивает автоматизированную обработку многолетних спутниковых данных и анализ пространственно-временной динамики береговой линии.

Сравнительный анализ спектральных индексов показал, что MNDWI обеспечивает наибольшую точность выделения водной поверхности. Анализ спутниковых данных Landsat за 1990–2025 гг. выявил устойчивое смещение береговой линии и сокращение площади акватории, наиболее выраженные на мелководных участках Северного Каспия.

Прогнозное моделирование показало, что к 2050 году уровень Каспийского моря может снизиться на 6–14 м, что приведет к дальнейшей трансформации береговой зоны и окажет влияние на эксплуатацию прибрежной инфраструктуры.

Разработанная методика может быть использована при инженерно-геодезическом сопровождении нефтегазовых проектов, обновлении цифровых карт, ведении геоинформационных баз данных и оценке рисков изменения береговой линии. Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией данных Sentinel-1, Sentinel-2 и NISAR, а также применением методов искусственного интеллекта для автоматизированного мониторинга береговой зоны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Обзор воздействия глобального изменения климата, адаптации и устойчивых мер по смягчению последствий / K. Abbass [и др.] // Environmental Science and Pollution Research International. – 2022. – Т. 29. – С. 42539–42559 (на английском языке)*
2. *Влияние изменения климата и антропогенной деятельности на водные экосистемы – обзор / A. K. Priya [и др.] // Environmental Research. – 2023. – Т. 238. – Ст. 117233 (на английском языке)*
3. *Изменение климата и экосистемы: угрозы, возможности и решения / Y. Malhi [и др.] // Philosophical Transactions — Royal Society. Biological Sciences. – 2020. – Т. 375. – Ст. 20190104 (на английском языке)*
4. *Muluneh M. G. Влияние изменения климата на биоразнообразие и продовольственную безопасность: глобальный дополнительный анализ и обзорная статья // Agriculture & Food Security. – 2021. – Т. 10. – Ст. 41 (на английском языке)*
5. *Griggs G., Reguero B. G. Адаптация побережья к изменению климата и повышению уровня моря // Water. – 2021. – Т. 13. – № 16. – Ст. 2151 (на английском языке)*
6. *Предупреждение ученых об изменении климата и насекомых / J. A. Harvey [и др.] // Ecological Monographs. – 2023. – Т. 93. – № 1. – С. 1–37 (на английском языке)*
7. *Gibbs G. J., Dubayah R. Достижения в технологиях дистанционного зондирования и их значение для измерения и мониторинга запасов углерода в лесах и их изменений // Carbon Management. – 2011. – Т. 2. – № 2. – С. 231–244 (на английском языке)*
8. *Временные и пространственные изменения береговой линии с использованием изображений дистанционного зондирования для архипелага Чжоушань, Китай / S. Chen [и др.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2022. – Т. 107. – Ст. 102711 (на английском языке)*
9. *Обзор практического применения искусственного интеллекта для дистанционного зондирования в науках о Земле / B. Janga [и др.] // Remote Sensing. – 2023. – Т. 15. – № 16. – Ст. 4112 (на английском языке)*
10. *Papa F., Frappart F. Запасы поверхностных вод в реках и водно-болотных угодьях по данным спутниковых наблюдений: обзор текущих достижений и будущих возможностей гидрологических наук // Remote Sensing. – 2021. – Т. 13. – № 20. – Ст. 4162 (на английском языке)*
11. *Kaplin P., Selivanov A. O. Современная прибрежная эволюция Каспийского моря как естественная модель прибрежных реакций на возможное ускорение глобального повышения уровня моря // Marine Geology. – 1995. – Т. 124. – С. 161–175 (на английском языке)*
12. *Nouri J., Karbassi A., Mir-Kia S. Экологическое управление прибрежными районами Каспийского моря // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2007. – Т. 5. – С. 43–52 (на английском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Жаһандық климаттың өзгеруінің әсері, бейімделуі және тұрақты азайту шаралары: шолу / K. Abbass [және т. б.] // International Journal of Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Т. 29. – Б. 42539–42559 (ағылшын тілінде)*
2. *Климаттың өзгеруі мен антропогендік қызметтің су экожүйесіне әсері: шолу / A. K. Priya [және т. б.] // Environmental Research. – 2023. – Т. 238. – 117233 (ағылшын тілінде)*
3. *Климаттың өзгеруі және экожүйелер: қауіптер, мүмкіндіктер және шешімдер / Y. Malhi [және т. б.] // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2020. – Т. 375. – 20190104 (ағылшын тілінде)*
4. *Muluneh M. G. Климаттың өзгеруінің биоәртүрлілікке және азық-түлік қауіпсіздігіне әсері: жаһандық перспективалық шолу мақаласы // Agriculture & Food Security. – 2021. – Т. 10. – 41 (ағылшын тілінде)*
5. *Griggs G., Reguero B. G. Жағалаудың климаттың өзгеруіне және теңіз деңгейінің көтерілуіне бейімделуі // Water. – 2021. – Т. 13. – № 16. – 2151 (ағылшын тілінде)*
6. *Ғалымдардың климаттың өзгеруі және жәндіктер туралы ескертуі / J. A. Harvey [және т. б.] // Ecological Monographs. – 2023. – Т. 93. – № 1. – Б. 1–37 (ағылшын тілінде)*
7. *Gibbs G. J., Dubayah R. Қашықтықтан зондтау технологиясындағы жетістіктер және олардың орман көміртегі қорлары мен өзгерістерін өлшеу және бақылауға әсері // Carbon Management. – 2011. – Т. 2. – № 2. – Б. 231–244 (ағылшын тілінде)*
8. *Қытайдың Чжоушань архипелагы үшін қашықтықтан зондтау кескіндерін қолдана отырып, жағалау сызығының уақыттық және кеңістіктік өзгерістері / S. Chen [және т. б.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2022. – Т. 107. – 102711 (ағылшын тілінде)*
9. *Жер туралы ғылымдарда қашықтықтан зондтау үшін практикалық AI шолуы / B. Janga [және т. б.] // Remote Sensing. – 2023. – Т. 15. – № 16. – 4112 (ағылшын тілінде)*

10. *Papa F., Frappart F. Жерсеріктік бақылаулардан алынған өзендер мен сулы-батпақты жерлердегі жер үсті суларының қоры: гидрологиялық ғылымдардың ағымдағы жетістіктері мен болашақ мүмкіндіктеріне шолу // Remote Sensing. – 2021. – Т. 13. – № 20. – 4162 (ағылшын тілінде)*
11. *Kaplin P., Selivanov A. O. Каспий теңізінің жағалаулық эволюциясы жаһандық теңіз деңгейінің көтерілуінің ықтимал үдеуіне жағалаулық реакциялардың табиғи моделі ретінде // Marine Geology. – 1995. – Т. 124. – Б. 161–175 (ағылшын тілінде)*
12. *Nouri J., Karbassi A., Mir-Kia S. Каспий теңізінің жағалау аймақтарын экологиялық басқару // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2007. – Т. 5. – Б. 43–52 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. *A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures / K. Abbass et al. // Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Vol. 29. – P. 42539–42559 (in English)*
2. *Impact of Climate Change and Anthropogenic Activities on Aquatic Ecosystem – A Review / A. K. Priya et al. // Environmental Research. – 2023. – Vol. 238. – Article 117233 (in English)*
3. *Climate Change and Ecosystems: Threats, Opportunities and Solutions / Y. Malhiet al. // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2020. – Vol. 375. – Article 20190104 (in English)*
4. *Muluneh M. G. Impact of Climate Change on Biodiversity and Food Security: A Global Pe Additio-analrspective a Review Article // Agriculture & Food Security. – 2021. – Vol. 10. – Article 41 (in English)*
5. *Griggs G., Reguero B. G. Coastal Adaptation to Climate Change and Sea-Level Rise // Water. – 2021. – Vol. 13. – Article 2151 (in English)*
6. *Scientists' Warning on Climate Change and Insects / J. A. Harvey et al. // Ecological Monographs. – 2023. – Vol. 93. – No. 1. – P. 1–37 (in English)*
7. *Goetz S. J., Dubayah R. Advances in Remote Sensing Technology and Implications for Measuring and Monitoring Forest Carbon Stocks and Change // Carbon Management. – 2011. – Vol. 2. – P. 231–244 (in English)*
8. *Temporal and Spatial Variation of Coastline Using Remote Sensing Images for Zhoushan Archipelago, China / C. Chen et al. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2022. – Vol. 107. – Article 102711 (in English)*
9. *A Review of Practical AI for Remote Sensing in Earth Sciences / B. Janga et al. // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15. – No. 16. – Article 4112 (in English)*
10. *Papa F., Frappart F. Surface Water Storage in Rivers and Wetlands Derived from Satellite Observations: A Review of Current Advances and Future Opportunities for Hydrological Sciences // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13. – No. 20. – Article 4162 (in English)*
11. *Kaplin P., Selivanov A. O. Recent Coastal Evolution of the Caspian Sea as a Natural Model for Coastal Responses to the Possible Acceleration of Global Sea-Level Rise // Marine Geology. – 1995. – Vol. 124. – P. 161–175 (in English)*
12. *Nouri J., Karbassi A., Mirkia S. Environmental Management of Coastal Regions in the Caspian Sea // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2007. – Vol. 5. – P. 43–52 (in English)*

Сведения об авторах:
Рахимбаева Д. Ж., Ph.D доктор, ассоц. профессор, ТОО «Международная образовательная корпорация» (г. Алматы, Казахстан), *dinara_8509@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0001-8792-035X
Шоганбекова Д. А., Ph.D доктор, ассоц. профессор, ТОО «Международная образовательная корпорация» (г. Алматы, Казахстан), *inerbayeva@bk.ru;* https://orcid.org/0000-0002-6825-4774
Алтаева А. А., Ph.D доктор, ассоц. профессор, ТОО «Международная образовательная корпорация» (г. Алматы, Казахстан), *a.aselya_92@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0002-1675-6828

Авторлар туралы мәліметтер:
Рахимбаева Д. Ж., Ph.D докторы, қауымдастырылған профессор, «Халықаралық білім беру корпорациясы» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)
Шоганбекова Д. А., Ph.D докторы, қауымдастырылған профессор, «Халықаралық білім беру корпорациясы» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)
Алтаева А.А., Ph.D докторы, қауымдастырылған профессор, «Халықаралық білім беру корпорациясы» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Rakhimbayeva D. Zh., Ph.D doctor, associate professor, International Educational Corporation LLP (Almaty, Kazakhstan)
Shoganbekova D. A., Ph.D doctor, associate professor, International Educational Corporation LLP (Almaty, Kazakhstan)
Altaeva A. A., Ph.D doctor, associate professor, International Educational Corporation LLP (Almaty, Kazakhstan)

Код МРНТИ 52.13.25

С. С. Шерубаев[1], Р. К. Жанакова[2], Ж. Б. Тошов[4], *М. А. Сарыбаев[3]
[1]КарТУ им. А. Сагинова (г. Караганда, Казахстан),
[2]КазНИТУ им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан),
[3]КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан),
[4]ТГТУ им. И. Каримова (г. Ташкент, Узбекистан)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕЛИКОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ НАКЛОННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) междукамерных целиков (МКЦ) в зависимости от технологических параметров очистной выемки наклонных залежей Жезказганского месторождения с углами падения 20–35°. Оценка НДС выполнена методом граничных элементов (ПО EXAMINE 2D) в пространственной постановке и сближенных залежей при мощности МКЦ 4, 8 и 12 м и мощности междупластья 5 и 10 м. Установлено, что определяющее влияние на НДС МКЦ оказывает мощность залежи, тогда как угол ее падения существенного влияния не оказывает. Показано, что при мощности междупластья 5 м несущая способность породного перекрытия недостаточна, тогда как при 10 м и более обеспечивается более чем двукратный запас прочности.
Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, устойчивость, камерно-столбовая система, целики, наклонные залежи.*

Көлбеу қабаттарын өндіру кезіндегі кентіректердің кернеулі-деформацияланған күйінің өзгеру заңдылықтары

Аңдатпа. Мақалада Жезқазған кен орнының 20–35° құлау бұрышы бар көлбеу қабаттарын өндіру технологиялық параметрлеріне байланысты кентіректердің (МКЦ) кернеулі-деформацияланған күйінің (КДК) өзгеру заңдылықтарын зерттеу нәтижелері келтірілген. КДК бағалауы (EXAMINE 2D) бағдарламалық кешенімен (шекаралық элементтер әдісі, кеңістіктік қойылым) және жалғыз және жақындасқан қабаттар үшін, кентіректің биіктігі 4, 8 және 12 м, аралық қабат қалыңдығы 5 және 10 м болғанда орындалды. Кентіректердің КДК-на негізгі әсерді қабат қалыңдығы тигізетіні, ал құлау бұрышының елеулі әсері жоқ екені анықталды. Аралық қабат қалыңдығы 5 м болғанда жабын жыныстарының көтергіш қабілеті жеткіліксіз, ал 10 м және одан жоғары болғанда беріктік қоры екі есеге дейін артатыны көрсетілді.
Түйінді сөздер: *кернеулі-деформацияланған күй, орнықтылық, камералы-бағаналы өндіру жүйесі, кентіректер, көлбеу қабаттар.*

Patterns of stress-strain state variation in pillars during the mining of inclined ore bodies

Abstract. The paper presents the results of a study of stress-strain state (SSS) variation patterns in inter-chamber pillars during the mining of inclined ore bodies at the Zhezkazgan deposit at dip angles of 20–35°. The stress-strain state (SSS) was assessed using the boundary element method (EXAMINE 2D software) in a three-dimensional formulation for closely spaced ore bodies, with inter-chamber pillar thicknesses of 4, 8, and 12 m and interlayer thicknesses of 5 and 10 m. It was established that pillar SSS is governed primarily by the ore body thickness, while the dip angle has no significant effect. It is shown that at an interlayer thickness of 5 m the bearing capacity of the rock roof is insufficient, whereas at 10 m or more a safety factor of more than two is provided.
Keywords: *stress-strain state, stability, room-and-pillar mining system, pillars, inclined ore bodies.*

Введение

На рудниках ТОО «Корпорация Казахмыс» широко применяется панельно-столбовая система разработки с использованием самоходного оборудования. Высота отработки ограничена 12 м из условий безопасности осмотра кровли. Особую сложность представляет отработка залежей с углами падения от 20° до 35°. При таких углах параметры системы, рассчитанные для пологих залежей, требуют корректировки из-за изменения характера распределения напряжений и возрастания асимметрии нагружения граней целиков.

Целью работы является установление закономерностей изменения НДС целиков и определение их рациональных параметров, формы и расположения при подземной отработке наклонных (более 20°) и перекрывающихся залежей Жезказганского месторождения. В качестве оптимальной системы, согласно методике О. А. Байконурова, выбрана камерно-столбовая.

Материалы и методы исследования

Жезказганское месторождение относится к типу медистых песчаников с общей мощностью рудоносной толщи около 600 м (выделяется 10 рудных горизонтов и более 360 рудных тел). Непосредственная кровля и почва сложены красноцветными породами, алевролитами и аргиллитами. Физико-механические свойства руд и вмещающих пород, учтенные в расчетах, приведены в таблице 1.

Определение НДС междукамерных целиков (МКЦ) проводилось с заданными параметрами: объемный вес пород γ = 2,6 т/м³, коэффициент Пуассона μ = 0,22, модули упругости $E_п$ = 44 000 МПа (породы) и $E_р$ = 48 000 МПа (руда). Предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ = 120 МПа, на растяжение $\sigma_{раст}$ = 8,8 МПа.

Для моделирования использовался метод граничных элементов (МГЭ) в программном комплексе Examine2D для анализа напряженно-деформированного состояния массива горных пород и целиков.

Результаты исследования

Расчеты НДС для одиночной залежи (МКЦ 5 × 5 м) при углах падения 20–35° и мощности МКЦ 4, 8 и 12 м представлены на рис. 1. Установлено, что при увеличении высоты МКЦ с 4 до 12 м полные сжимающие напряжения закономерно снижаются со 127–135 МПа до 99–106 МПа, а показатель устойчивости растет. Максимальные растягивающие напряжения достигают 2,5 МПа. Изменение угла падения залежи в исследуемом диапазоне приводит к изменению напряжений лишь в пределах 5–8 МПа. При росте высоты целика ширина его упругого ядра сокращается с 30% до 10–15%.

Результаты моделирования соосно расположенных залежей на глубинах 500–600 м (рис. 2) показали, что при мощности междупластья 5 м растягивающие напряжения в породном перекрытии достигают 7,5 МПа. При увели-

Таблица 1

Физико-механические свойства руд и вмещающих пород Жезказганского месторождения

Кесте 1

Жезқазған кен орнының кендері мен сыйымды жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттері

Table 1

Physical and mechanical properties of ores and host rocks of the Zhezkazgan deposit

Порода	σ_c, МПа	σ_p, МПа	c, МПа	φ, град	E, ГПа	ν
Руда медная	140–230	10–18	25–30	35	32–45	0,20–0,22
Руда медно-цинковая	160–240	10–18	30–34	35	50–65	0,18–0,21
Песчаник серый безрудный	160–245	8–11	25–34	35	45–65	0,18–0,22
Песчаник красный	80–120	2–4	20–25	30	39–42	0,20–0,22
Алевролит красный	30–60	2–4	18–20	30	32–40	0,22–0,25

(σ_c — предел прочности при одноосном сжатии, σ_p — при растяжении, c — сцепление, φ — угол внутреннего трения, E — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона)

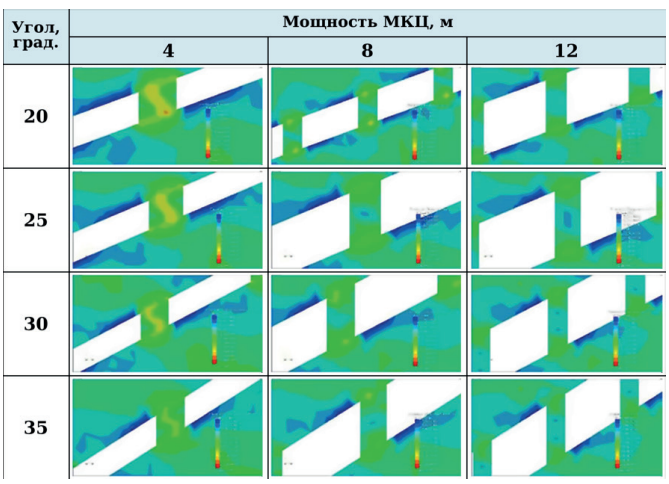


Рис. 1. Закономерности распределения первого главного напряжения в МКЦ в зависимости от мощности и угла падения залежи.
Сурет 1. Кен орнының қуаты мен түсу бұрышына байланысты МКЦ-дегі бірінші негізгі кернеудің таралу заңдылықтары.
Figure 1. Patterns of distribution of the first main voltage in the MCC depending on the power and angle of incidence of the deposit.

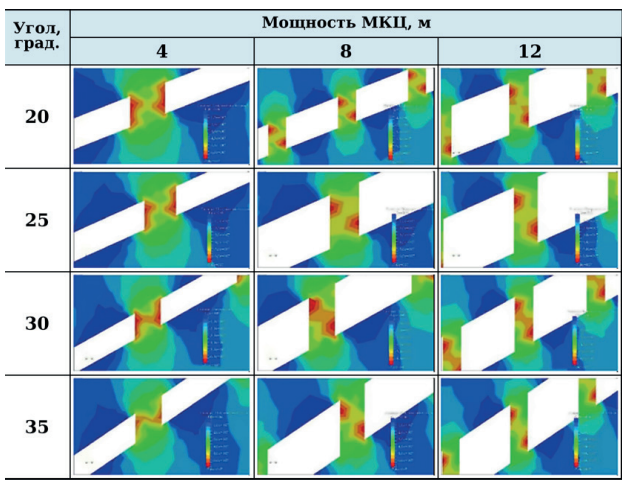


Рис. 2. Закономерности распределения третьего главного напряжения (максимального сжимающего напряжения) в МКЦ в зависимости от мощности и угла падения залежи.
Сурет 2. Кен орнының қуаты мен түсу бұрышына байланысты МКЦ-де үшінші негізгі кернеудің (максималды қысу кернеуінің) таралу заңдылықтары.
Figure 2. Patterns of distribution of the third main voltage (maximum compressive stress) in the MCC depending on the power and angle of incidence of the deposit.

чении мощности междупластья до 10 м максимальные растягивающие напряжения снижаются до 2,5–5,0 МПа.

Анализ деформаций массива зафиксировал значения, не превышающие $0{,}3 \cdot 10^{-3}$ на растяжение и $-1{,}4 \cdot 10^{-3}$ на сжатие; ожидаемая осадка составляет не более 0,2% высоты МКЦ. Моделирование изменения геометрии целиков показало, что выполаживание нижней части ножки МКЦ по направлению падения залежи снижает максимальные растягивающие напряжения до 2,5 МПа, а сжимающие напряжения в ядре целика на 5–10 МПа.

Обсуждение результатов

Полученные данные доказывают, что определяющим фактором НДС целиков является мощность залежи (высота МКЦ). Влияние угла падения в диапазоне 20–35° носит сугубо второстепенный характер и не требует принципиального изменения расчетных схем. Возникающие растягивающие напряжения (2,5 МПа) обеспечивают надежный запас прочности (2,0–2,5 раза). Однако выявленное сужение упругого ядра у высоких (до 12 м) столбчатых целиков свидетельствует об исчерпании их резерва несущей способности, что диктует необходимость строгого ограничения их высоты.

Сравнение вариантов междупластья выявило критический порог устойчивости. Значение напряжений 7,5 МПа при 5-метровом междупластье находится на нижней границе предела прочности пород на растяжение (5–10 МПа). Это означает, что перекрытие в таких условиях потенциально неустойчиво. Переход к 10-метровому междупластью снижает напряжения до безопасного уровня, обеспе-

чивая двукратный запас прочности. Таким образом, мощность целика-разделителя выступает самостоятельным лимитирующим параметром, недостаток которого нельзя компенсировать изменением размеров самих МКЦ.

Уровень зафиксированных деформаций однозначно указывает на то, что целики и вмещающие породы работают в упругом, обратимом режиме, что подтверждает корректность выбранных расчетных моделей. Эффективность выполаживания ножки МКЦ физически объясняется снятием локальной концентрации растягивающих усилий, которая возникает из-за асимметричного нагружения граней на наклонных залежах. Это инженерное решение позволяет повысить равномерность передачи нагрузки и общую несущую способность целиков без эксплуатационных потерь руды на увеличение их габаритов.

Заключение

Для одиночных залежей мощностью 4–12 м устойчивость целиков достаточна: растягивающие напряжения ≤ 2,5 МПа (запас 2,0–2,5), сжимающие 65–70 МПа. Из-за сужения упругого ядра до 10–15% при росте мощности требуется ограничение высоты столбчатых целиков. Для сближенных залежей лимитирующим фактором является мощность междупластья: при 5 м запас прочности исчерпан (напряжения до 7,5 МПа), при 10 м обеспечивается безопасность (2,5–5,0 МПа). Минимальная мощность породного перекрытия должна быть не менее 10 м.

Деформации массива не превышают $0{,}3 \cdot 10^{-3}$ на растяжение и $-1{,}4 \cdot 10^{-3}$ на сжатие, что подтверждает работу целиков в обратимом упругом режиме. Выполаживание ножки МКЦ по падению снижает максимальные напряжения в ядре на 5–10 МПа и устраняет локальную концентрацию растягивающих усилий без изменения базовых параметров системы разработки. Выявленные рациональные параметры целиков и междупластья, а также рекомендации по форме МКЦ целесообразно использовать при проектировании очистной выемки (например, на шахте Анненская), с перспективой дальнейших исследований для больших глубин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Kumar M., Avchar A., Sinha S. Гибридная эмпирико-численная методика оценки устойчивости и крепления целиков в глубоких подземных рудниках // International Journal of Mining and Geo-Engineering. – 2026. – Т. 60 (1). – С. 115–128 (на английском языке)*
2. *Zhang Q., Liu Z., Chen Y. Численное моделирование повреждения массива горных пород и изменения напряжений методом FLAC3D-IMASS при выемке неукрепленных остаточных целиков в глубокозалегающих месторождениях твёрдых пород // Geotechnics. – 2025. – Т. 5 (4). – С. 1–18 (на английском языке)*
3. *Постепенное разрушение целиков и управление креплением на основе данных мониторинга при камерно-целиковом способе разработки месторождений крепких пород: на примере рудника Unki / M. K. Shayanowako [и др.] // Rock Mechanics Letters. – 2025. – Т. 2 (4). – Ст. 100032 (на английском языке)*
4. *Новый подход к выбору рациональных крепей для подземных горных выработок / T. Almenov [и др.] // Civil Engineering Journal. – 2025. – Т. 11 (3). – Ст. 22 (на английском языке)*
5. *Каркасное моделирование для оптимизации параметров открытого карьера вольфрамового месторождения Бугуты / R. Zhanakova [и др.] // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2026. – № 4. – С. 28–36 (на английском языке)*
6. *Исследование методов извлечения целиков, основанных на ленточной закладке и вторичной выемке полезных ископаемых / Hao Jian [и др.] // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Т. 10. – Ст. 1051245 (на английском языке)*
7. *Обоснование параметров междукамерного целика при разработке наклонных залежей / Д. Т. Ивадилинова [и др.] // Горный журнал Казахстана. – 2024. – № 11. – С. 27–33 (на русском языке)*
8. *Моделирование геомеханических процессов при переходе от открытой к подземной разработке месторождений сложной морфологии / D. Bekbergenov [и др.] // Civil Engineering Journal. – 2025. – Т. 11. – № 7. – С. 2862–2888 (на английском языке)*
9. *Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В. Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений // Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 49–52 (на русском языке)*
10. *Сценарная экономическая оценка и локальное ранжирование вариантов разработки рудного тела в зонах обрушения Жезказганского месторождения / D. Bekbergenov [и др.] // Sci (MDPI). – 2026. – Т. 8. – № 9. – Ст. 242 (на английском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Kumar M., Avchar A., Sinha S. Терең жерасты кеніштеріндегі целиктердің орнықтылығы мен бекітпесін негіздеудің эмпирикалық-сандық гибридтік әдістемесі // International Journal of Mining and Geo-Engineering. – 2026. – Т. 60 (1). – Б. 115–128 (ағылшын тілінде)*
2. *Zhang Q., Liu Z., Chen Y. Терең жатқан қатты жынысты кен орындарындағы бекітпесіз қалдық целиктерді алу кезінде тау жыныстары массивінің бұзылуы мен кернеулердің өзгеруін FLAC3D-IMASS арқылы сандық модельдеу // Geotechnics. – 2025. – Т. 5 (4). – Б. 1–18 (ағылшын тілінде)*
3. *Қатты жынысты камералық-бағандық кен өндіру кезінде целиктердің біртіндеп бұзылуы және мониторинг нәтижелеріне негізделген бекітуді басқару: Unki кенішінің мысалында / M. K. Shayanowako [және т. б.] // Rock Mechanics Letters. – 2025. – Т. 2 (4). – 100032 (ағылшын тілінде)*
4. *Жерасты тау-кен қазбалары үшін ұтымды бекітпелерді таңдаудың жаңа тәсілі / T. Almenov [және т. б.] // Civil Engineering Journal. – 2025. – Т. 11 (3). – 22 (ағылшын тілінде)*

5. *Бұғыты вольфрам кен орнының ашық кеніш параметрлерін оңтайландыру үшін каркастық модельдеу / R. Zhanakova [және т. б.] // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2026. – № 4. – Б. 28–36 (ағылшын тілінде)*
6. *Таспалы толтырмалауға және пайдалы қазбаларды қайталама өндіру әдістеріне негізделген целиктерді алу әдістерін зерттеу / Hao Jian [және т. б.] // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Т. 10. – 1051245 (ағылшын тілінде)*
7. *Көлбеу кен денелерін игеру кезінде камерааралық целик параметрлерін негіздеу / Д. Т. Ивадилинова [және т. б.] // Қазақстанның тау-кен журналы. – 2024. – № 11. – Б. 27–33 (орыс тілінде)*
8. *Күрделі морфология жағдайында ашық тау-кен жұмыстарынан жерасты тау-кен жұмыстарына өту кезіндегі геомеханикалық процестерді модельдеу / D. Bekbergenov [және т. б.] // Civil Engineering Journal. – 2025. – Т. 11. – № 7. – Б. 2862–2888 (орыс тілінде)*
9. *Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В. Кен орындарын игеру жобаларын іске асыру кезінде табиғи-техногендік жүйелердің геодинамикалық жағдайын бағалау әдістемесі // Тау-кен журналы. – 2020. – № 1. – Б. 49–52 (орыс тілінде)*
10. *Жезқазған кен орнының опырылу аймақтарындағы кен денесін игеру нұсқаларын сценарийлік экономикалық бағалау және жергілікті ранжирлеу / D. Bekbergenov [және т. б.] // Sci (MDPI). – 2026. – Т. 8. – № 9. – 242 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. *A hybrid empirical-numerical framework for pillar stability and reinforcement in deep underground mines / M. Kumar et al. // International Journal of Mining and Geo-Engineering. – 2025. – Vol. 60 (1). – P. 115–128 (in English)*
2. *FLAC3D-IMASS numerical modelling of rock mass damage and stress evolution during unsupported remnant pillar extraction in deep hard-rock ore deposits / Q. Zhang et al. // Geotechnics. – 2025. – Vol. 5 (4). – P. 1–18 (in English)*
3. *Progressive pillar degradation and monitoring-driven reinforcement control in hard-rock room-and-pillar mining: Using Unki Mine as a case study / M. K. Shayanowako et al. // Rock Mechanics Letters. – 2025. – Vol. 2 (4). – Article 100032 (in English)*
4. *A novel approach to selecting rational supports for underground mining workings / T. Almenov et al. // Civil Engineering Journal. – Vol. 11 (3). – Article 22 (in English)*
5. *Wireframe modeling to optimize open-pit parameters of the Boguty tungsten deposit / R. Zhanakova et al. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2026. – No. 4. – P. 28–36 (in English)*
6. *A case study of pillar extraction methods based on strip backfilling and secondary mining methods / J. Hao et al. // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Vol. 10. – Article 1051245 (in English)*
7. *Obosnovanie parametrov mezhdukamernogo tselika pri razrabotke naklonnykh zalezhei [Justification of inter-chamber pillar parameters in the development of inclined deposits] D. T. Ivadilinova et al. Gornyi zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan]. – 2024. – No. 11. – P. 27–33 (in Russian)*
8. *Modeling of geomechanical processes from open-pit to underground mining with complex morphology / D. Bekbergenov et al. // Civil Engineering Journal. – 2025. – Vol. 11. – No. 7. – P. 2862–2888 (in Russian)*
9. *Sidorov D. V., Ponomarenko T. V. Metodologiya otsenki geodinamicheskogo sostoyaniya prirodno-tekhnogennykh sistem pri realizatsii proektov osvoeniya mestorozhdenii [Methodology for assessing the geodynamic state of natural-technogenic systems during the implementation of mineral deposit development projects]. Gornyi zhurnal [Mining Journal]. – 2020. – No. 1. – P. 49–52 (in Russian)*
10. *Scenario-based economic assessment and local ranking of orebody mining alternatives in caving zones of the Zhezkazgan deposit / D. Bekbergenov et al. // Sci (MDPI). – 2026. – Vol. 8. – No. 9. – Article 242 (in English)*

Сведения об авторах:
Шерубаев С. С., докторант, Карагандинский технический университет им. А. Сагинова (г. Караганда, Казахстан), *sherubaev.sanzhar@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0003-9176-3096
Жанакова Р. К., КазНИТУ им. К. И. Сатпаева, доктор Ph.D (г. Алматы, Казахстан), *zhanakova_raisa@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0003-0845-8449
Тошов Ж. Б., д. т. н., профессор, ТГТУ им. И. Каримова (г. Ташкент, Узбекистан), *javokhir.toshov@yandex.ru;* https://orcid.org/0000-0003-4278-1557
Сарыбаев М. А., к. т. н., КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан), *sarybaev.m@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0003-4488-5659

Авторлар туралы мәліметтер:
Шерубаев С. С., докторант, Ә. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті (Қарағанды қ., Қазақстан)
Жанакова Р. Қ., Қ. И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Ph.D докторы (Алматы қ., Қазақстан)
Тошов Ж. Б., т. ғ. д., профессор, И. Каримов атындағы Ташкент мемлекеттік техникалық университеті (Ташкент қ., Өзбекстан)
Сарыбаев М. А., т. ғ. к., аль-Фараби атындағы ҚазҰУ (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Sherubayev S. S., doctoral student, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)
Zhanakova R. K., Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev Ph.D, Associate Professor (Almaty, Kazakhstan)
Toshov J. B., c. t. s., professor, TSTU named after Islam Karimov (Tashkent, Uzbekistan)
Sarybayev M. A., c. t. s., KazNU named after al-Farabi (Almaty, Kazakhstan)

Код МРНТИ 52.13.23

Р. А. Мусин, Д. Р. Ахматнуров, *А. Н. Есендосова, Н. М. Замалиев
НАО Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНКЕРНОГО КРЕПЛЕНИЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК КАРАГАНДИНСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

Аннотация. В статье представлены результаты многолетних комплексных исследований устойчивости горных выработок Карагандинского угольного бассейна на глубинах более 500 м. На основе анализа литолого-стратиграфического строения, структурных особенностей и физико-механических свойств пород обоснованы оптимальные параметры анкерного крепления в условиях сложного напряженно-деформированного состояния массива. Выполнены аналитические расчеты, численное моделирование методом конечных элементов и натурные инструментальные наблюдения. Установлены количественные зависимости между глубиной разработки, свойствами пород и параметрами анкерных систем. Разработанные рекомендации обеспечивают прогнозирование устойчивости выработок, повышение надежности крепи и увеличение срока безремонтной эксплуатации на 25–40% и могут быть использованы при проектировании и эксплуатации шахт в аналогичных условиях.

Ключевые слова: *анкерное крепление, Карагандинский угольный бассейн, геомеханика, устойчивость кровли, напряженно-деформированное состояние, физико-механические свойства, моделирование, глубинные выработки, эксплуатационная безопасность, инженерное прогнозирование.*

Қарағанды көмір бассейнінің дайындық қазбаларын анкерлік бекіту параметрлерінің геомеханикалық негіздемесі

Аңдатпа. Мақалада 500 м-ден асатын тереңдіктерде Қарағанды көмір бассейніндегі тау-кен қазбаларының тұрақтылығы бойынша көпжылдық кешенді зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Жыныстардың литологиялық-стратиграфиялық құрылысы, құрылымдық ерекшеліктері және физика-механикалық қасиеттерін талдау негізінде тау жыныстары массивінің күрделі кернеулі-деформацияланған жағдайларында анкерлік бекітудің оңтайлы параметрлері негізделді. Аналитикалық есептеулер, соңғы элементтер әдісімен сандық модельдеу және натуралық аспаптық бақылаулар жүргізілді. Қазу тереңдігі, жыныстардың қасиеттері және анкерлік жүйелердің параметрлері арасындағы сандық тәуелділіктер анықталды. Ұсынылған ұсынымдар қазбалардың тұрақтылығын болжауға, бекітудің сенімділігін арттыруға және жөндеусіз пайдалану мерзімін 25–40% ұлғайтуға мүмкіндік береді және ұқсас жағдайлардағы шахталарды жобалау мен пайдалануда қолданылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: *анкерлік бекіту, Қарағанды көмір бассейні, геомеханика, шатыр тұрақтылығы, кернеулі-деформацияланған күй, физика-механикалық қасиеттер, модельдеу, терең қазбалар, пайдалану қауіпсіздігі, инженерлік болжау.*

Geomechanical substantiation of rock-bolt support parameters in the Karaganda coal basin

Abstract. The article presents the results of long-term comprehensive studies on the stability of mine workings in the Karaganda Coal Basin at depths exceeding 500 m. Based on an analysis of lithological-stratigraphic structure, structural features, and physico-mechanical properties of rocks, optimal parameters of rock bolting under complex stress-strain conditions of the rock mass are substantiated. Analytical calculations, finite element numerical modeling, and in situ instrumental observations were performed. Quantitative relationships between mining depth, rock properties, and parameters of bolting systems were established. The developed recommendations enable reliable prediction of roadway stability, improvement of support reliability, and an increase in maintenance-free service life by 25–40% and can be applied in the design and operation of mines under similar conditions.

Keywords: *rock-bolt support, Karaganda coal basin, geomechanics, roof stability, stress-strain state, physical and mechanical properties, numerical modeling, deep mine workings, operational safety, engineering prediction.*

Введение

Рост глубины разработки угольных пластов Карагандинского угольного бассейна сопровождается усложнением горно-геологических условий и усилением горного давления, что обусловливает необходимость совершенствования систем крепления выработок [1–3]. Повышенные концентрации напряжений вблизи контура приводят к снижению устойчивости кровли и боков выработок, ускоренному разрушению рамной крепи и росту эксплуатационных затрат. Наиболее неблагоприятные условия характерны для глубин свыше 600 м, где вмещающие породы представлены чередованием песчаников, алевролитов и аргиллитов с выраженной анизотропией прочностных свойств [4, 5].

Высокая экономическая значимость угольной отрасли, обеспечивающей свыше половины энергобаланса, требует повышения надежности горных выработок транспортного, вентиляционного и дренажного назначения. Современные анкерные системы крепления обеспечивают перераспределение нагрузок в массиве за счет вовлечения устойчивых слоев кровли, что способствует выравниванию напряженного состояния и снижению риска обрушений [6–8]. Глубинное распределение основных угольных пластов Карагандинского бассейна, приведенное на рис. 1, показывает, что значительная часть подготовительных выработок эксплуатируется в интервалах, где влияние горного давления становится определяющим фактором выбора типа и параметров крепления.

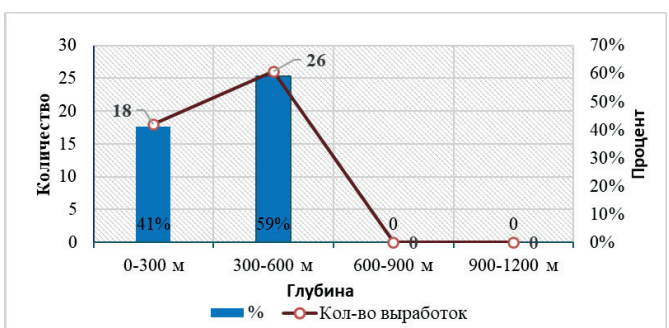


Рис. 1. Характеристика пластов Карагандинского угольного бассейна по глубине залегания.
Сурет 1. Қарағанды көмір бассейнінің қабаттарының тереңдік бойынша сипаттамасы.
Figure 1. Characteristics of the coal seams of the Karaganda coal basin by depth.

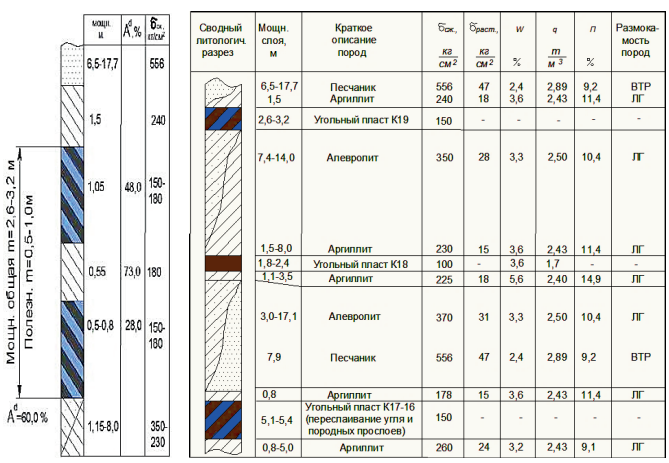
Ключевым этапом является анализ физико-механических свойств пород угленосной толщи, определяющих деформируемость массива и эффективность анкерного крепления. По данным лабораторных исследований, предел прочности пород кровли при одноосном сжатии

составляет 20–90 МПа, модуль упругости — 3–16 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,18–0,30; указанные параметры использованы при построении геомеханических моделей напряженно-деформированного состояния массива [9, 10].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки инженерно обоснованных методик расчета параметров анкерного крепления, обеспечивающих адаптацию конструкций к конкретным горно-геологическим условиям, снижение деформаций и повышение безопасности горных работ в Карагандинском угольном бассейне.

Методы и материалы

Для обоснования параметров анкерного крепления применена комплексная методика, включающая лабораторные испытания пород, анализ эксплуатационных данных и математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива. Исследования выполнены на участках действующих шахт Карагандинского угольного бассейна (им. Костенко и «Шахтинская»). Методическая основа работы предусматривала системную оценку инженерно-геологических условий, включая мощность пластов, свойства пород кровли и боков, а также анализ деформационных процессов при различных типах крепления [1–3]. Структурное строение пласта k18 и обобщенные физико-механические свойства пород угленосной толщи, использованные при расчетах, представлены на рис. 2.



Сводный литологич. разрез	Мощн. слоя, м	Краткое описание пород	$\sigma_{сж.}$, кг/см²	$\sigma_{раст.}$, кг/см²	W, %	q, т/м³	n, %	Размокаемость пород
	6,5-17,7	Песчаник	556	47	2,4	2,89	9,2	ВТР
	1,5	Аргиллит	240	18	3,6	2,43	11,4	ЛГ
	2,6-3,2	Угольный пласт К19	150	-	-	-	-	-
	7,4-14,0	Алевролит	350	28	3,3	2,50	10,4	ЛГ
	1,5-8,0	Аргиллит	230	15	3,6	2,43	11,4	ЛГ
	1,8-2,4	Угольный пласт К18	100	-	3,6	1,7	-	-
	1,1-3,5	Аргиллит	225	18	5,6	2,40	14,9	ЛГ
	3,0-17,1	Алевролит	370	31	3,3	2,50	10,4	ЛГ
	7,9	Песчаник	556	47	2,4	2,89	9,2	ВТР
	0,8	Аргиллит	178	15	3,6	2,43	11,4	ЛГ
	5,1-5,4	Угольный пласт К17-16 (переслаивание угля и породных прослоев)	150	-	-	-	-	-
	0,8-5,0	Аргиллит	260	24	3,2	2,43	9,1	ЛГ

а *б*

Рис. 2. Структурная колонка пласта k18 *(а)* **и физико-механические свойства пород угленосной толщи** *(б)*.
Сурет 2. k18 қабатының құрылымдық бағанасы *(а)* **және көмірлі қалыңдық жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттері** *(б)*.
Figure 2. Structural column of seam k18 *(a)* **and physico-mechanical properties of the coal-bearing rocks** *(b)*.

Прочностные характеристики пород определялись по результатам испытаний на одноосное сжатие, растяжение и срез. Установлено, что прочность алевролитов и аргиллитов составляет 15–60 МПа, песчаников — до 90 МПа. Влияние водонасыщения оценивалось по сопоставлению прочностных характеристик пород в естественно-влажном и водонасыщенном состояниях, а также с учетом ранее опубликованных данных по осадочным породам Карагандинского бассейна; для слабосцементированных аргиллитов и алевролитов снижение прочности может достигать 30%, что подчеркивает необходимость учета гидрогеологических факторов. Анализ зависимости осадки основания от среднего давления показал различную деформируемость массива при изменении условий нагружения. Дополнительно выполнена статистическая обработка эксплуатационных данных за длительный период наблюдений, позволившая выявить взаимосвязь между типом крепления, длиной анкеров и скоростью смещений кровли [4, 5]. Обобщенные эксплуатационные показатели основных видов крепления приведены на рис. 3.

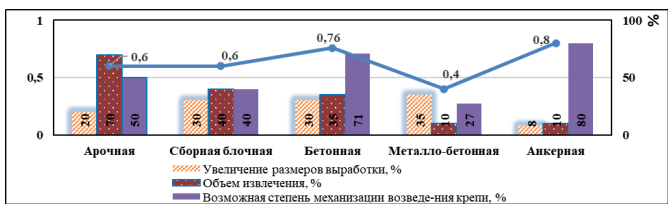
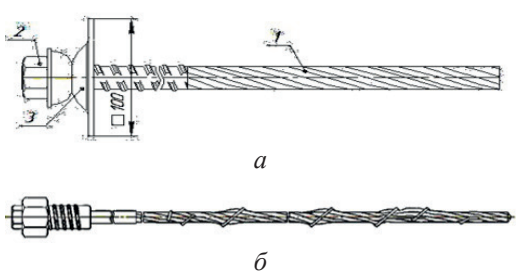


Рис. 3. Эксплуатационные показатели видов крепления горных выработок.
Сурет 3. Тау-кен қазбаларының бекіту түрлерінің пайдалану көрсеткіштері.
Figure 3. Operational indicators of types of mine support.

На следующем этапе разработаны экспериментальные конструкции анкеров с механической, смолоинъекционной и комбинированной фиксацией. Основное внимание уделено канатным анкерам АК01 и КАГ-20, обеспечивающим повышение несущей способности системы за счет увеличения длины и более равномерного распределения усилий по стержню [6–8]. Общий вид рассматриваемых конструкций канатных анкеров представлен на рис. 4.



а

б

Рис. 4. Общий вид канатных анкеров: *а — канатный анкер АК01 (-08, -14) для химических и минеральных скрепляющих составов; б — канатный анкер КАГ-20. 1 — стержень анкера сварной, 2 — гайка, 3 — шайба опорная.*
Сурет 4. Арқанды анкерлердің жалпы көрінісі: *а — химиялық және минералдық бекіткіш құрамдарға арналған АК01 (-08, -14) арқанды анкер; б — КАГ-20 арқанды анкер; 1 — анкердің дәнекерленген өзегі, 2 — гайка, 3 – тірек шайба.*
Figure 4. General view of cable (rope) anchors: *(a) — Cable anchor AK01 (-08, -14) for chemical and mineral bonding compounds; (b) — Cable anchor KAG-20; 1 — welded anchor rod, 2 — nut, 3 — bearing washer.*

Численные расчеты выполнены с применением аналитических и графоаналитических методов с учетом глубины, мощности пластов, прочности и трещиноватости пород; параметры свода равновесия определялись из уравнений статического равновесия [9]. Расчетная схема, использованная для определения высоты свода естественного равновесия над выработкой, приведена на рис. 5.

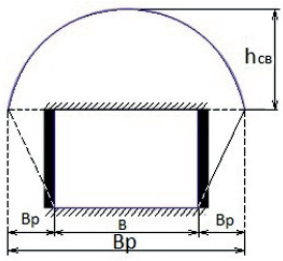


Рис. 5. Расчетная схема для определения высоты свода естественного равновесия.
Сурет 5. Табиғи тепе-теңдік күмбезінің биіктігін анықтауға арналған есептік сызба.
Figure 5. Design diagram for determining the height of the natural equilibrium arch.

На основе установленных зависимостей смещений кровли от глубины разработки, прочности пород, длины анкеров и шага их установки, а также зависимостей коэффициента устойчивости и плотности анкерования от параметров крепления определены оптимальные параметры анкерного крепления: длина 1,6–2,4 м и шаг 0,8–1,2 м, обеспечивающие устойчивость кровли на глубинах до 800 м. Полученные данные использованы для калибровки моделей и проверки на натурных объектах. Методика учитывает прочностные и геометрические особенности массива, повышая надежность и воспроизводимость расчетов.

Результаты исследований

В результате аналитических, лабораторных и натурных исследований, выполненных на участках подготовительных выработок шахт им. Костенко и «Шахтинская», получены количественные зависимости для обоснования рациональных параметров анкерного крепления. Натурный этап включал инструментальные наблюдения за смещениями кровли и боков выработок, оценку состояния элементов крепи, фиксацию зон трещиноватости и сопоставление полученных данных с расчетными параметрами. Структурная схема методики автоматизированного расчета параметров анкерного крепления представлена на рис. 6. Анализ напряженно-деформированного состояния массива показал, что увеличение длины анкеров приводит к перераспределению зон растяжения и сжатия в кровле и снижению максимальных смещений в выработке [1–4]. Установлено, что для кровли, сложенной аргиллитами и алевролитами с прочностью менее 25 МПа, при увеличении глубины разработки с 500 до 700 м смещения возрастают более чем на 40%, что обосновывает необходимость применения комбинированных схем крепления и увеличения длины анкеров.

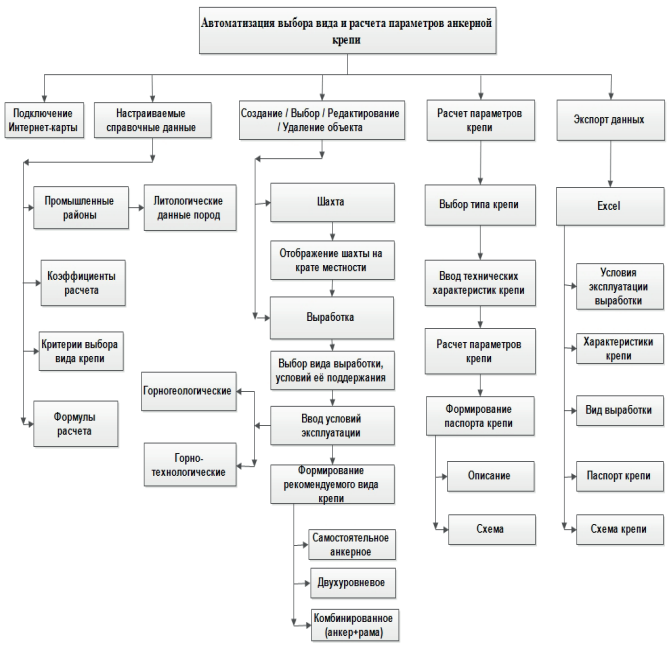


Рис. 6. Структурная схема методики автоматизированного расчета параметров анкерного крепления.
Сурет 6. Анкерлік бекітудің параметрлерін автоматтандырылған есептеу әдістемесінің құрылымдық сызбасы.
Figure 6. Structural diagram of the methodology for automated calculation of anchor support parameters.

Результаты моделирования показали, что увеличение длины анкеров с 1,2 до 2,4 м снижает смещения кровли на 25–30%, а уменьшение шага установки до 0,8 м обеспечивает более равномерное распределение напряжений в массиве. При этом зона пластических деформаций сокращается на 1,5–2,0 м от контура выработки, что повышает коэффициент устойчивости более чем на 0,2. Установлена зависимость смещений кровли от прочности пород и длины анкеров: при увеличении прочности с 20 до 80 МПа смещения уменьшаются до 12–15 мм. Для оценки эксплуатационной целесообразности проведено сопоставление коэффициента устойчивости с суммарными затратами на крепление и ремонт выработки (рис. 7). Данная зависимость показывает, что анкерное крепление обеспечивает более благоприятное соотношение устойчивости и приведенных затрат по сравнению с металлоарочной крепью. Экономический эффект формируется не только за счет роста коэффициента устойчивости, но и за счет снижения материалоемкости, уменьшения объемов ремонтных работ, сокращения простоев и увеличения срока службы выработок; средняя экономия по совокупности эксплуатационных факторов составляет 12–18% на погонный метр.

Обобщенные результаты исследований представлены в виде зависимости плотности установки анкеров от глубины выработки (рис. 8). Полученные кривые показывают, что при комбинированных схемах крепления оптимальная плотность установки анкеров первого уровня составляет 1,1–1,3 анк/м² при глубинах 600–700 м. Для анкеров глубокого заложения расчетная плотность изменяется в зависи-

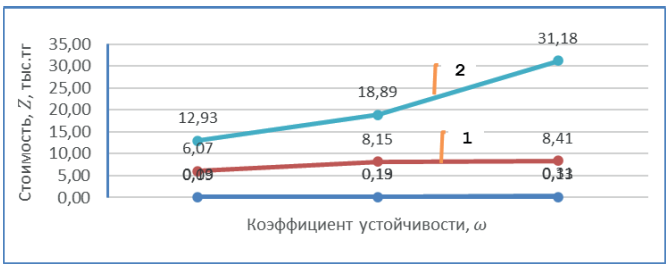


Рис. 7. Зависимость изменения коэффициента устойчивости от суммы затрат на крепление и ремонт.
1 — анкерное крепление, 2 — металлоарочная крепь.
Сурет 7. Бекіту мен жөндеуге жұмсалған шығындар сомасына байланысты тұрақтылық коэффициентінің өзгеру тәуелділігі.
1 — анкерлік бекіту, 2 — металл доғалы бекітпе.
Figure 7. Dependence of the stability coefficient variation on the total cost of support and repair.
1 — anchor support, 2 — steel arch support.

мости от глубины и требуемого уровня устойчивости, что позволяет дифференцировать параметры крепи для участков с различной степенью нарушенности массива.

Дополнительно рассмотрена зависимость относительной экономической эффективности ***E*** от длины анкера ***L*** и шага установки ***s***. При увеличении длины анкеров от 1,2 до 2,4 м показатель ***E*** снижается: при шаге установки 0,8 м — с 3,7 до 2,9, при шаге 1,0 м — с 2,9 до 2,2, при шаге 1,2 м — с 2,2 до 1,5. Это указывает на необходимость выбора рационального компромисса между повышением устойчивости, стоимостью крепления и трудоемкостью монтажа. Следовательно, увеличение длины анкеров целесообразно прежде всего в зонах повышенного горного давления, слабой кровли и интенсивной трещиноватости, тогда как на относительно устойчивых участках рациональным является уменьшение плотности и длины анкеров в пределах допустимого уровня безопасности.

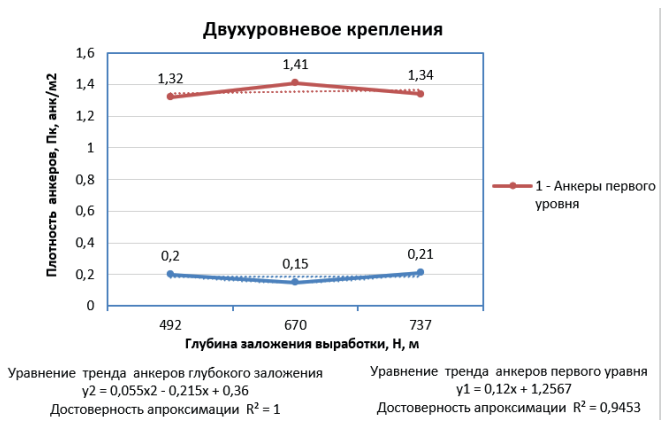


Рис. 8. Зависимость плотности установки анкеров первого уровня и глубокого заложения от глубины выработки.
Сурет 8. Бірінші деңгейлі және терең орнатылатын анкерлердің орналастыру тығыздығының қазба тереңдігіне тәуелділігі.
Figure 8. Dependence of the installation density of first-level and deep-seated anchors on the excavation depth.

В аппроксимирующих зависимостях, приведенных на рис. 8, переменная ***x*** соответствует глубине расположения выработки ***H***, м. Синей кривой обозначена плотность установки анкеров глубокого заложения, а второй кривой — плотность установки анкеров первого уровня. Такое разделение позволяет учитывать различную роль коротких и глубоких анкеров в формировании устойчивой зоны вокруг выработки.

Установлено, что анкерное крепление длиной 2,0–2,4 м и шагом 0,8–1,0 м обеспечивает устойчивость кровли до 800 м.

Обсуждение результатов

Сопоставление расчетных и натурных данных подтвердило применимость предложенной методики в условиях Карагандинского угольного бассейна. Лабораторные испытания, промышленно-эксплуатационные наблюдения и результаты моделирования показали, что эффективность анкерного крепления определяется не отдельным параметром, а сочетанием длины анкера, шага установки, прочности пород, глубины разработки и степени трещиноватости массива. Наибольший эффект достигается на глубинах 600–800 м, где традиционные металлоарочные крепи работают в условиях повышенной деформационной нагрузки, тогда как анкерные системы обеспечивают перераспределение напряжений и формирование самонесущей зоны в кровле [5–7].

Полученные в настоящей работе результаты согласуются с ранее выполненными исследованиями [8–9] и уточняют их применительно к условиям Карагандинского угольного бассейна. Расчетно-натурное сопоставление показало, что увеличение длины анкеров до 2,4 м снижает конвергенцию выработок в среднем на 25–30% и приводит к сокращению зон пластических деформаций при плотности установки 1,0–1,2 анк/м². Мониторинг на шахтах им. Костенко и «Шахтинская» подтвердил снижение скоростей смещений кровли до 3–4 мм/сут на участках с рационально подобранными параметрами крепления. При этом экономическая оценка по совокупности материальных, ремонтных и эксплуатационных затрат показывает снижение расходов на 12–18% на погонный метр выработки. В целом методика обеспечивает рациональное сочетание безопасности, надежности и экономической эффективности эксплуатации глубоких выработок [10].

Заключение

Анализ геомеханических условий Карагандинского угольного бассейна показал, что потеря устойчивости кровли подготовительных выработок обусловлена сочетанием повышенного горного давления, литологической неоднородности и трещиноватости пород. При глубинах свыше 600 м рамные крепи не всегда обеспечивают длительную устойчивость без дополнительных мероприятий, что требует применения анкерных и комбинированных систем. Разработанная методика расчета параметров анкерного крепления учитывает прочностные свойства пород, глубину залегания, трещиноватость массива и геометрию выработки. Установлены рациональные параметры: длина анкеров 2,0–2,4 м и шаг 0,8–1,0 м при комбинированной

схеме крепления для участков со сложными горно-геологическими условиями.

Численное моделирование показало снижение смещений кровли на 25–30% и сокращение зоны пластических деформаций на 1,5–2 м при увеличении коэффициента устойчивости на 0,2–0,3 по сравнению с металлоарочными крепями. Натурные наблюдения и сопоставление с эксплуатационными данными по шахтам им. Костенко и «Шахтинская» подтвердили расчеты: скорость смещений кровли на участках с рационально подобранными параметрами крепления снижалась до 3–4 мм/сут, а срок безремонтной эксплуатации выработок увеличивался в 1,5–1,7 раза. Экономическая оценка показала снижение материало- и трудоемкости на 12–18%, что делает анкерную крепь рациональным решением для глубоких пластов Карагандинского бассейна и применимым при проектировании и реконструкции подготовительных выработок.

Благодарность

Данное исследование выполнено при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по реализации научной и научно-технической программы ИРН BR28712407.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Анализ устойчивости кровли горных выработок при применении анкерного крепления в Карагандинском бассейне / К. М. Муратбаев [и др.] // Уголь. – 2023. – № 10. – С. 45–52 (на русском языке)*
2. *Оценка перераспределения напряжений при проведении горных выработок в угленосных толщах / R. A. Mussin [и др.] // Energies. – 2024. – Т. 17. – № 8. – С. 4212–4220 (на английском языке)*
3. *Korzeniowski W., Skrzypkowski K., Szwed P. Мониторинг устойчивости горных выработок в угольных шахтах Польши с применением многоуровневых анкерных систем // Archives of Mining Sciences. – 2021. – Т. 66. – № 3. – С. 589–602 (на английском языке)*
4. *Zhang C., Pan Y., Wang J. Численное моделирование механизма анкерного крепления кровли в угольных выработках // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2021. – Т. 141. – С. 104719–104724 (на английском языке)*
5. *Замалиев Н. М., Ахматнуров Д. Р., Мусин Р. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния пород кровли в зоне влияния очистных работ // Комплексное использование минерального сырья. – 2024. – № 2. – С. 67–75 (на русском языке)*
6. *Skrzypkowski K., Zagórski K., Korzeniowski W. Геотехническая оценка анкерного крепления в слоистом горном массиве // Journal of Mining Science. – 2020. – Т. 56. – № 2. – С. 289–297 (на английском языке)*
7. *Ахматнуров Д. Р., Замалиев Н. М., Ганюков Н. Ю. Определение параметров комбинированного анкерного крепления в условиях неоднородного массива пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12. – С. 54–62 (на русском языке)*
8. *Korzeniowski W., Skrzypkowski K., Zamaliev N. Оптимизация параметров анкерного крепления кровли для глубоких угольных шахт // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2023. – Т. 133. – С. 104938–104942 (на английском языке)*
9. *Qin S., Li X., Zhang Y. Экспериментальное исследование несущей способности анкеров, закрепленных смолой, в кровле угольных шахт // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Т. 138. – С. 106277–106282 (на английском языке)*
10. *Новая система анкерного крепления горных пород с использованием стальных частиц / X. Feng [и др.] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2022. – Т. 32. – С. 1045–1058 (на английском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Қарағанды көмір бассейнінде анкерлік бекітуді қолдану кезінде тау-кен қазбалары төбесінің тұрақтылығын талдау / К. М. Муратбаев [және т. б.] // Уголь. – 2023. – № 10. – Б. 45–52 (орыс тілінде)*
2. *Көмірлі қабаттарда тау-кен қазбаларын жүргізу кезінде кернеулердің қайта бөлінуін бағалау / R. A. Mussin [және т. б.] // Energies. – 2024. – Т. 17. – № 8. – Б. 4212–4220 (ағылшын тілінде)*
3. *Korzeniowski W., Skrzypkowski K., Szwed P. Көпдеңгейлі анкерлік жүйелерді қолдану арқылы Польша көмір шахталарындағы тау-кен қазбаларының тұрақтылығын мониторингтеу // Archives of Mining Sciences. – 2021. – Т. 66. – № 3. – Б. 589–602 (ағылшын тілінде)*
4. *Zhang C., Pan Y., Wang J. Көмір қазбаларында төбені анкерлік бекіту механизмін сандық модельдеу // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2021. – Т. 141. – Б. 104719–104724 (ағылшын тілінде)*
5. *Замалиев Н. М., Ахматнуров Д. Р., Мусин Р. А. Тазалау жұмыстарының әсер ету аймағындағы төбе жыныстарының кернеулі-деформацияланған күйін модельдеу // Минералдық шикізатты кешенді пайдалану. – 2024. – № 2. – Б. 67–75 (орыс тілінде)*
6. *Skrzypkowski K., Zagórski K., Korzeniowski W. Қабатталған тау жыныстары массивіндегі анкерлік бекітудің геотехникалық бағалануы // Journal of Mining Science. – 2020. – Т. 56. – № 2. – Б. 289–297 (ағылшын тілінде)*
7. *Ахматнуров Д. Р., Замалиев Н. М., Ганюков Н. Ю. Біртекті емес тау жыныстары массиві жағдайында біріктірілген анкерлік бекітудің параметрлерін анықтау // Тау-кен ақпараттық-талдамалық бюллетені. – 2023. – № 12. – Б. 54–62 (орыс тілінде)*

8. *Korzeniowski W., Skrzypkowski K., Zamaliev N. Терең деңгейлі көмір шахталары үшін төбені анкерлік бекітудің параметрлерін оңтайландыру // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2023. – Т. 133. – Б. 104938–104942 (ағылшын тілінде)*
9. *Qin S., Li X., Zhang Y. Көмір шахталары төбесінде шайырмен бекітілген анкелердің көтергіштік қабілетін эксперименттік зерттеу // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Т. 138. – Б. 106277–106282 (ағылшын тілінде)*
10. *Болат бөлшектерін пайдалануға негізделген тау жыныстарын анкерлік бекітудің жаңа жүйесі / X. Feng [және т. б.] // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Т. 32. Б. 1045–1058 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. *Analiz ustoichivosti krovli gornykh vyrabotok pri primenenii ankernogo krepleniya v Karagandinskom basseine [Analysis of roof stability of mine workings using rock bolting in the Karaganda Coal Basin] K. M. Muratbayev et al. Ugol' [Coal]. – 2023. – No. 10. – P. 45–52 (in Russian)*
2. *Evaluation of stress redistribution during roadway excavation in coal-bearing strata / R. A. Mussin et al. // Energies. – 2024. – Vol. 17. – No. 8. – P. 4212–4220 (in English)*
3. *Korzeniowski W., Skrzypkowski K., Szwed P. Monitoring roadway stability in Polish coal mines using multi-level anchoring systems // Archives of Mining Sciences. – 2021. – Vol. 66. – No. 3. – P. 589–602 (in English)*
4. *Zhang C., Pan Y., Wang J. Numerical simulation of roof bolting mechanisms in coal roadways // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2021. – Vol. 141. – P. 104719–104724 (in English)*
5. *Zamaliyev N. M., Akhmatnurov D. R., Mussin R. A. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya porod krovli v zone vliyaniya ochistnykh rabot [Modeling the stress-strain state of roof rocks in the zone influenced by longwall mining]. Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya [Complex Use of Mineral Resources]. –2024. – No. 2. – P. 67–75 (in Russian)*
6. *Skrzypkowski K., Zagórski K., Korzeniowski W. Geotechnical assessment of rock bolting in stratified rock mass // Journal of Mining Science. – 2020. – Vol. 56. – No. 2. – P. 289–297 (in English)*
7. *Akhmatnurov D. R., Zamaliyev N. M., Ganyukov N. Y. Opredelenie parametrov kombinirovannogo ankernogo krepleniya v usloviyakh neodnorodnogo massiva porod [Determination of parameters of combined rock bolting systems in heterogeneous rock mass conditions]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' [Mining Informational and Analytical Bulletin]. – 2023. – No. 12. – P. 54–62 (in Russian)*
8. *Korzeniowski W., Skrzypkowski K., Zamaliev N. Optimization of roof bolt parameters for deep-level coal mines // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2023. – Vol. 133. – P. 104938–104942 (in English)*
9. *Qin S., Li X., Zhang Y. Experimental study on bearing behavior of resin-anchored bolts in coal mine roofs // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 138. – P. 106277–106282 (in English)*
10. *A novel rock bolting system exploiting steel particles / X. Feng et al. // International Journal of Mining Science and Technology. – 2022. – Vol. 32. – P. 1045–1058 (in English)*

Сведения об авторах:
Мусин Р. А., Ph.D, ассоц. профессор, кафедра «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан), *R.A.Mussin@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0002-1206-6889
Ахматнуров Д. Р., Ph.D, заведующий лабораторией, НАО Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан), *d.akhmatnurov@gmail.com;* https://orcid.org/0000-0001-9485-3669
Есендосова А. Н., Ph.D, ст. преподаватель, кафедра «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан), *ainelesendosova@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0001-7415-3630
Замалиев Н. М., Ph.D, ассоц. профессор, кафедра «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан), *nailzamaliev@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0003-0628-2654

Авторлар туралы мәліметтер:
Мусин Р. А., Ph.D, «Пайдалы қазбалар кен орындарын өндіру» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)
Ахматнуров Д. Р., Ph.D, зертхана меңгерушісі, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)
Есендосова А. Н., Ph.D, «Пайдалы қазбалар кен орындарын өндіру» кафедрасының аға оқытушысы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)
Замалиев Н. М., Ph.D, «Пайдалы қазбалар кен орындарын өндіру» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Mussin R. A., Ph.D, Associate Professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)
Akhmatnurov D. R., Ph.D, Head of Laboratory, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)
Yessendossova A. N., Ph.D, Senior Lecturer at the Department of Mining, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)
Zamaliyev N. M., Ph.D, Associate Professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)

Код МРНТИ 52.13.04

N. Kerimbayeva[1], G. M. Zhunis[1], *D. T. Ivadilinova[1], A. R. Abdiev[2]
[1]Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan),
[2]Scientific and Technical Center named after prof. Sh. A. Mambetov «Geoquantum»,
Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov (Bishkek, Kyrgyzstan)

CURRENT STATE OF RESEARCH ON THE GEOMECHANICAL CONDITIONS OF ROCK MASSES DURING THE DEEPENING OF OPEN-PIT MINING OPERATIONS

Abstract. The paper assesses the geomechanical conditions affecting the stability of pit slopes and benches in a deep open pit mine using an iron ore deposit in the Kostanay Region of the Republic of Kazakhstan as a case study. Engineering-geological investigations included deep borehole drilling, geophysical surveys, laboratory testing of the physical and mechanical properties of rocks, and in situ investigation of rock mass fracturing. Based on the obtained data, engineering-geological units and design rock mass strength parameters were determined, and the probability of different bench failure mechanisms was evaluated. The results indicate that the least stable conditions occur on the eastern wall of the pit due to the unfavorable orientation of the major joint system relative to the slope.
Keywords: *pit slope stability, deep open-pit mine, rock mass fracturing, physical and mechanical properties of rocks, structural weakening coefficient, limit equilibrium method, finite element method, Sokolov-Sarbai deposit.*

Ашық тау-кен жұмыстарын тереңдету кезінде тау жыныстары массивтерінің геомеханикалық жағдайларын зерттеудің қазіргі күйі

Аңдатпа. Мақала Қазақстан Республикасының Қостанай облысындағы темір кен орны мысалында терең карьердің борттары мен кемерлерінің орнықтылығының геомеханикалық жағдайларын бағалауға арналған. Зерттеуде инженерлік-геологиялық ізденістердің нәтижелері, оның ішінде терең ұңғымаларды бұрғылау, геофизикалық зерттеулер, тау жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттерін зертханалық анықтау және жартас массивінің жарықшақтылығын зерттеу қарастырылған. Статистикалық өңдеу нәтижесінде алты инженерлік-геологиялық элемент бөлініп, массивтің есептік беріктік сипаттамалары анықталды және карьердің сегіз учаскесі бойынша кемер деформацияларының пайда болу ықтималдығы бағаланды. Зерттеу нәтижелері карьердің шығыс бортында жарықшақтардың құлау бұрышы жобалық еңіс бұрышымен сәйкес келуіне байланысты орнықтылықтың ең қолайсыз жағдайлары қалыптасатынын көрсетті.
Түйінді сөздер: *карьер борттарының орнықтылығы, терең карьер, массивтің жарықшақтылығы, тау жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттері, құрылымдық әлсіреу коэффициенті, шектік тепе-теңдік әдісі, соңғы элементтер әдісі, Сарыбай кен орны.*

Современное состояние исследования геомеханических условий массивов пород при углублении открытых горных работ

Аннотация. Статья посвящена оценке геомеханических условий устойчивости бортов и уступов глубокого карьера на примере железорудного месторождения, расположенного в Костанайской области Республики Казахстан. Представлены результаты инженерно-геологических исследований, включающих бурение глубоких скважин, геофизические исследования, лабораторное определение физико-механических свойств пород и изучение трещиноватости массива. На основе статистической обработки выделены шесть инженерно-геологических элементов, определены расчетные прочностные характеристики массива и выполнена оценка вероятности развития деформаций уступов на восьми участках карьера. Установлено, что наиболее неблагоприятные условия устойчивости характерны для восточного борта карьера вследствие совпадения угла падения основной системы трещин с проектным углом откоса.
Ключевые слова: *устойчивость бортов карьера, глубокий карьер, трещиноватость массива, физико-механические свойства пород, коэффициент структурного ослабления, метод предельного равновесия, метод конечных элементов.*

Introduction

The development of the modern global mining industry is characterized by a steady trend toward increasing the depth of open-pit mining. The depth of a number of operating open-pit mines worldwide (Bingham Canyon, Chuquicamata, Escondida, Grasberg, etc.) has already exceeded 500–1200 m from the earth's surface, making the justification of the maximum parameters of slopes and benches one of the most pressing issues in modern open-pit mining geomechanics.

The subject of this study is the Sarbay iron ore deposit, located in the northwestern part of the Kostanay region of the Republic of Kazakhstan. Open-pit mining has been conducted since 1960; The current quarry bottom elevation is minus 390 meters, and design documentation calls for a depth of minus 500 meters. The deposit has a two-tiered structure: a platform cover 150–230 meters thick, composed of loose Mesozoic-Cenozoic sediments, rests on a folded Paleozoic basement broken by a system of large faults (including a meridional reverse-slip fault with a vertical displacement amplitude of 1,100–1,350 meters).

The stability of the Sarbai quarry walls is affected by the presence of weakness surfaces (fracturing, layering, and schistosity), waterlogging of the massif, and the reduced strength properties of rocks in certain areas. The main destabilizing factor is the intense fracturing of certain sections of the near-wall massif. To further design stable slope parameters for the transition to deeper horizons, it was necessary to obtain up-to-date data on the geomechanical state of the rock mass at elevations from 0 to minus 660 m.

The objective of this study is to substantiate the stability of the Sarbai quarry slopes during its deepening based on a comprehensive geomechanical assessment, including an analysis of initial mining and geological data, the results of laboratory and in-situ studies, and an assessment of the likelihood of various bench deformation mechanisms [1–3].

To achieve this goal, the following tasks were completed: identifying the factors influencing the stability of the quarry slopes as the mining depth increases; conducting laboratory and in-situ studies of the rock mass with subsequent statistical processing of the obtained data; studying the structural and tectonic structure and fracturing of the rock mass at the edge; determining the estimated strength characteristics of rocks in the rock mass, taking into account the structural weakening coefficient; and assessing the likelihood of various types of bench deformation in characteristic sections of the quarry.

Materials and methods

Engineering and geological surveys

To study the geological and structural structure of the quarry walls, the engineering-geological and hydrogeological conditions of the massif, and the fracturing of the rock margins within the absolute elevation range of -200 to -500 meters, five deep vertical wells were drilled, totaling 2,195 linear meters, oriented along five profiles across the strike of the quarry walls. The geophysical survey included gamma-gamma density logging (GGK-P), resistivity logging (RL), gamma ray logging (GL), magnetic susceptibility logging, caliper logging, inclinometry, and flow logging. The logging data was used to identify intervals of fractured and unstable rocks, lithologically dissect the section, and determine zones of water absorption and influx.



Figure 1. Layout of geological boreholes at the Sarbai quarry. Determination of the physical and mechanical properties of rocks.
Сурет 1. Сарбай карьеріндегі геологиялық ұңғымалардың орналасуы. Тау жыныстарының физикалық және механикалық қасиеттерін анықтау.
Рис. 1. Схема расположения геологических скважин на Сарбайском карьере. Определение физико-механических свойств пород.

Samples of all identified lithological variations were collected from the borehole core. The following parameters were determined in the laboratory using standard methods: density (bulk density) γ, uniaxial compressive strength σc, tensile strength σp, elastic modulus E, Poisson's ratio μ, specimen cohesion C, internal friction angle φ, and longitudinal and transverse elastic wave propagation velocity V. Tensile test specimens were made with geometric dimensions of 1.0 x 1.0 cm and 1.5 x 1.5 cm (4.5 x 4.5 cm for weak and fractured rocks). The end surfaces were polished to ensure parallel contacts during load testing.

The density of regularly shaped specimens was determined by weighing and then calculated as the ratio of the specimen mass to the product of its cross-sectional area and height. The elastic modulus and Poisson's ratio were calculated using the propagation velocities of longitudinal ***(Vp)*** and transverse ***(Vs)*** ultrasonic waves, determined from the acoustic delay time ***(Δt)*** at a constant specimen length of $L = 100$ ***mm***. Cohesion and the angle of internal friction were determined by constructing a strength certificate based on the results of uniaxial compression and tension tests. For strong and medium-strength rocks at the studied deposit, a logarithmic relationship was established between the ultimate uniaxial compressive strength and the cohesion of rocks in the specimen [4].

Samples of all identified lithological variations were collected from the borehole core. Under laboratory conditions, standard methods were used to determine the density (bulk density) γ, uniaxial compressive strength σc, tensile strength σp, elastic modulus E, Poisson's ratio μ, specimen cohesion C, internal friction angle φ, and longitudinal and transverse elastic wave propagation velocity V. Tensile test specimens were manufactured with geometric dimensions of 1.0 x 1.0 cm and 1.5 x 1.5 cm (4.5 x 4.5 cm for soft and fractured rocks). The end surfaces were polished to ensure parallel contacts during load testing.

The density of regularly shaped specimens was determined by weighing and then calculating the ratio of the specimen mass to the product of the cross-sectional area and the height. The elastic modulus and Poisson's ratio were calculated using ultrasonic measurements of longitudinal ***(Vp)*** and shear ***(Vs)*** wave propagation velocities after an acoustic delay time of Δt at a constant specimen length of $L = 100$ ***mm***. Cohesion and the angle of internal friction were determined by constructing a strength certificate based on the results of uniaxial compression and tension tests. A logarithmic relationship between compressive strength and cohesion in the specimen was established for strong and medium-strength rocks of the Sarbayskoye deposit.

To assess the risk of deformations occurring on a bench scale, a classification of rock mass stability loss types adopted in international practice was used: block shear along the undercutting plane (*Planar Sliding*), wedge shear along the intersection of two fracture systems (*Wedge*), and rock block toppling toward the mined-out space, which occurs through direct toppling or flexural toppling. For eight representative quarry sections covering all the walls, the probability of each of these deformation mechanisms was determined based on data on the occurrence of fracture systems and the orientation of the bench slopes.

The calculated strength characteristics of the rock mass (adhesion Cm and internal friction angle) were determined taking into account the structural weakening coefficient λ using G. L. Fisenko's formula, which relates λ to the ratio of the side height H to the average size of the structural block l and the coefficient a, which depends on the rock strength in the sample and the nature of the fracturing. The specific adhesion in the rock mass was calculated as the weighted sum of the adhesion in the sample and along the weakening surfaces, taking into account λ.

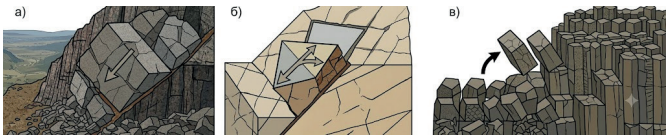


Figure 2. Main types of rock stability loss: *a) shear of a prismatic block; b) shear of a wedge-shaped block; c) collapse of a ledge with overturning of blocks.*

Сурет 2. Тау жыныстарының тұрақтылығының жоғалуының негізгі түрлері:
а) призмалық блоктың ығысуы; ә) сына тәрізді блоктың ығысуы; б) блоктардың аударылуымен қиғаштың құлауы.

Рис. 2. Основные виды потери устойчивости скальных пород: *а) сдвиг призматического блока; б) сдвиг клиновидного блока; в) разрушение уступа с опрокидыванием блоков.*

The stability factor (SF) for kinematically identified blocks was calculated using the limit equilibrium method using the lateral pressure method: a computational compartment, bounded below by the sliding surface (plane or line of intersection of fracture systems) and above by the slope surface, was divided by vertical lines into elementary columns less than one meter wide. For each column, the normal (N) and shear (E) components of the rock weight were determined using the force triangle, and the shear coefficient of the rock was calculated as the ratio of the sum of the holding forces (taking into account the angle of internal friction, cohesion, and lateral pressure coefficient) to the sum of the shear forces over the entire sliding surface. The calculations took into account the heterogeneity of the rock across layers with different physical and mechanical properties and the water content of the rock mass along the depression line.

Physical and mechanical properties of rocks by section depth

Analysis of laboratory test results revealed significant variability in the physical and mechanical properties of rocks, even within a single lithological type [5–8]. This is explained by differences in the intensity of fracturing, the degree of foliation, brecciation, and metasomatic alteration of the rocks. An additional factor contributing to variability in compressive strength is the heterogeneous mineralogical composition of the secondary minerals filling the fractures (for example, calcite is characterized by $\sigma \approx 16$ MPa, while pyrite has $\sigma \approx 128$ MPa).

Based on the statistical processing of core test data to a depth of minus 660 m, six engineering-geological elements were identified at the deposit: limestone (σcompression from 60 to 70 MPa, average 65 MPa), tuffs (from 30 to 230 MPa, average 113 MPa), tuffites (from 40 to 80 MPa, average 64.78 MPa), metasomatites (from 50 to 60 MPa, average 56.67 MPa), diorites (from 110 to 210 MPa, average 153.7 MPa) and ore (single intersection at a depth of 523.73–525.10 m, density 3.61 t/m³, σcompression = 160 MPa). The generalized physical and mechanical properties of rocks based on the survey results are presented in Table 1.

A pattern of growth in the strength characteristics of rocks with depth was established, as well as a practically directly proportional relationship between the adhesion in the sample and the uniaxial compressive strength, which is consistent with previously obtained results of foreign researchers for similar geological conditions.

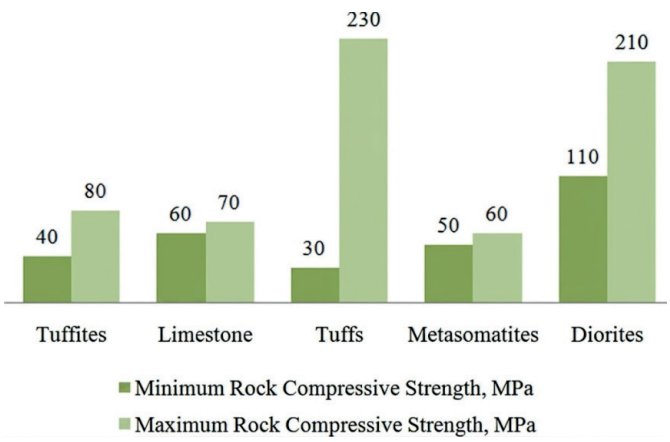


Figure 3. Minimum and maximum values of rock compressive strength based on the results of geotechnical surveys.

Сурет 3. Инженерлік-геологиялық зерттеулер нәтижелері бойынша тау жыныстарының сығылу беріктігінің минималды және максималды мәндері.

Рис. 3. Минимальные и максимальные значения прочности пород на сжатие по результатам инженерно-геологических изысканий.

Table 1

Generalized physical and mechanical properties of rocks and ores of the Sarbay quarry

Кесте 1

Сарбай карьерінің тау жыныстары мен кендерінің жалпыланған физикалық және механикалық қасиеттері

Таблица 1

Обобщенные физико-механические свойства скальных пород и руд Сарбайского карьера

Rock	γ, t/m³	$\sigma сж$, MPa	$\sigma р$, MPa	E·10⁻⁴, MPa	μ	C_0, MPa	φ, degrees
Limestone	2,82	65,0	8,00	5,94	0,22	18,0	35
Tuffs	2,75	113,0	8,15	6,06	0,21	30,0	37
Metasomatites	2,90	56,67	5,83	5,51	0,21	15,6	35
Tuffites	2,84	64,78	7,17	5,39	0,22	18,5	36
Diorite	2,84	153,7	11,5	7,79	0,21	43,5	35
Ore	3,61	160,0	13,5	5,90	0,21	20,6	38

Rock mass fracturing and structural survey results

According to drilling data, the average specific fracturing of the rock mass was 4.48 cracks/m, with a consistent trend of decreasing fracturing (increasing blockiness of the rock mass) with depth: from 21.33 cracks/m in the 0 to -100 m interval to 0.70 cracks/m in the -600 to -660 m interval. The proportion of unstable rock, according to well logging data, averages 7.4% of the total borehole length (maximum 10.7% for well #2, minimum 5.5% for well #4), increasing to 9.8% in the upper part of the section (down to a depth of 300 m). Most of the open cracks (more than 60%) are oriented subvertically with dip angles of 60–90°; the cavities of the closed cracks are filled mainly with calcite-chlorite material.

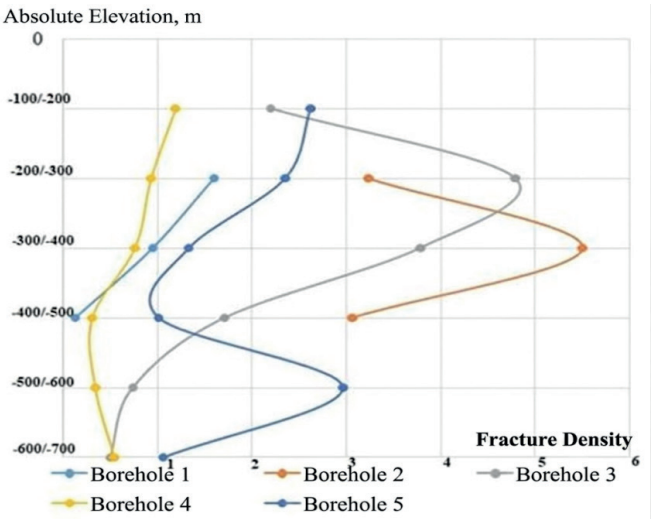


Figure 4. Change in rock mass fracturing with depth according to wells No 1–5.
Сурет 4. № 1–5 ұңғымалар бойынша тау жыныстарының массасының сынуының тереңдікке байланысты өзгеруі.
Рис. 4. Изменение трещиноватости массива горных пород с глубиной по данным скважин №№ 1–5.

Based on the results of the first series of measurements (processing of slope photographs, 2016), six systems of tectonic shear fractures were identified in four sections of the southern and eastern slopes; the fracture porosity coefficient varied from 0.21% (section III, eastern slope) to 0.60% (section I, southern slope), and the blockiness index ranged from 0.495 to 0.652 m, corresponding to moderately and highly fractured rocks. Based on the results of the second series of field measurements (2018, nine measuring stations), five fracture systems were identified; when comparing the two series, complete coincidence of the occurrence parameters was established only for the fracture systems associated with the natural layering of the massif (system 1/I).

Comparing the orientation of the identified fracture systems with the slope strikes allowed us to identify potentially hazardous (conformably dipping) weakness surfaces for each quarry wall: for the northern and northeastern walls — fracture system II-1; for the eastern and southeastern walls — system V; for the southern wall — system III; and for the southwestern and western walls — system I (with the probability of collapse prisms also forming along systems I', II-2, and III).

Conclusions

The engineering and geological conditions of the Sarbay quarry are characterized as complex, due to the significant thickness of loose rocks (up to 140 m), the presence of pronounced weakness surfaces (layering, fracturing, schistosity) [9–10], the tendency of the rocks to weather, and the high degree of water cut in both the loose and hard rocks of the massif. Based on the statistical processing of laboratory core test data from five deep boreholes at the deposit, six engineering and geological elements (limestone, tuffs, tuffites, metasomatites, diorites, and ore) were identified, for each of which generalized physical and mechanical properties were established. A trend of increasing rock strength with depth and a directly proportional relationship between specimen cohesion and uniaxial compressive strength were identified.

It was found that the average specific jointing of the rock mass decreases with depth from 21.33 joints/m (0 to -100 m) to 0.70 joints/m (-600 to -660 m). Based on the results of two series of structural measurements (2016 and 2018), six and five tectonic joint systems were identified, respectively. Of these, only those systems associated with the natural layering of the massif have completely consistent occurrence parameters. Potentially hazardous (congruently dipping) crack systems representing probable weakness surfaces have been identified for each quarry wall: System II-1 for the northern and northeastern walls, System V for the eastern and southeastern walls, System III for the southern wall, and System I (together with I', II-2, and III) for the southwestern and western walls.

An assessment of the probability of various deformation types (Planar Sliding, Wedge, Flexural Toppling, Direct Toppling) across eight characteristic sections revealed the greatest risk for the southern and southwestern/western walls of the quarry (probability up to 100%). However, a comparison with calculated safety factors shows that kinematically possible deformation does not always occur, confirming the need for a comprehensive consideration of the strength characteristics of the weakness surfaces, not just their geometric orientation. The most unfavorable conditions for ensuring stability when deepening the quarry to a depth of minus 500 m are predicted to be on the eastern wall due to the coincidence of the dip angle of the main layered fracture system (50–70°) with the design slope angle. This requires that this factor be taken into account when justifying the wall design at deep levels. The obtained calculated massif characteristics and the results of quarry zoning by types of potential deformations serve as the basis for further mathematical modeling of the stress-strain state of the edge massif.

REFERENCES

1. *Microseismic monitoring-based stability analysis of high rock slopes in deep open-pit mines / C. Zhao et al. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2026. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2026.02.028 (in English)*
2. *Bar N., Dixon R. Unveiling unknowns: Practical application of InSAR for slope performance monitoring and risk management across multiple surface mines // Engineering Geology. – 2021. – Vol. 293. – Article 106326 (in English)*
3. *Mechanism of Fracto- and Triboluminescence of Quartz / Yurov V.M., Portnov V.S., Rabatuly M. et al. // Advances in Science, Technology & Innovation. – Cham: Springer, 2025. – P. 1037–1048 (in English)*
4. *Brady B. H. G., Brown E. T. Rock Mechanics for Underground Mining. – 3rd ed. – Dordrecht: Springer, 2006. – 628 p. (in English)*
5. *Izuchenie struktury massiva i utochnenie fiziko-mekhanicheskikh svoistv gornykh porod v usloviyakh rudnika Ushkatyn-III [Study of the structure of the massif and refinement of the physical and mechanical properties of rocks in the conditions of the Ushkatyn-III mine] B. Muratuly et al. Gornyi Zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan]. – 2023. – No. 1. – P. 32–39 (in Russian)*
6. *Justification and Development of an Innovative Container Technology for Hoisting Rock Mass from Deep Open Pits / B. Khussan et al. // Mining of Mineral Deposits. – 2022. – Vol. 16. – No. 4. – P. 87–95 (in English)*
7. *Analysis of Research on Blasting Operations in the Preparation of Water-Filled Overburden Blocks in Open-Pit Mining / B. Khussan et al. // Mining Journal of Kazakhstan. – 2025. – No. 11. – P. 26–31 (in English)*
8. *Zeitinova Sh. B., Imashev A. Zh., Suimbayeva A. A. Numerical Modeling of the Stress–Strain State of a Rock Mass Near Vertical Mine Workings During Combined Deposit Development // Civil Engineering. – 2024. – Vol. 10. – No. 9. – P. 2939–2954 (in English)*
9. *Laubscher D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 1990. – Vol. 90. – No. 10. – P. 257–273 (in English)*
10. *Bieniawski Z. T. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. – New York: John Wiley & Sons, 1989. – 251 p. (in English)*

ПАЙДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Микросейсмикалық мониторинг негізінде терең ашық шахталардағы биік тау жыныстарының беткейлерінің тұрақтылығын талдау / C. Zhao [және т. б.] // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2026. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2026.02.028 (ағылшын тілінде)*
2. *Bar N., Dixon R. Белгісіздікті ашу: бірнеше ашық шахталардағы беткейлердің денсаулығын бақылау және тәуекелдерді басқару үшін InSAR практикалық қолданылуы // Engineering Geology. – 2021. – Т.293. – 106326 (ағылшын тілінде)*
3. *Кварцтың фракто- және триболюминесценция механизмі / Yurov V. M., Portnov V. S., Rabatuly M. [және т. б.] // Advances in Science, Technology & Innovation. – Шам: Springer, 2025. – Б. 1037–1048 (ағылшын тілінде)*
4. *Brady B. H. G., Brown E. T. Жерасты кен өндіруге арналған тау жыныстары механикасы. – 3-басылым. – Дордрехт: Springer, 2006. – 628 б. (ағылшын тілінде)*
5. *Үшқатын-III кенішіндегі тау жыныстарының массив құрылымын зерттеу және олардың физикалық-механикалық қасиеттерін анықтау / Б. Мұратұлы [және т. б.] // Қазақстанның тау-кен журналы. – 2023. – № 1. – Б. 32 (орыс тілінде)*
6. *Терең карьерлерден тау жыныстары массасын көтеруге арналған инновациялық контейнерлік технологияны негіздеу және әзірлеу / B. Khussan [және т. б.] // Mining of Mineral Deposits. – 2022. – Т. 16. – № 4. – Б. 87–95 (ағылшын тілінде)*
7. *Ашық карьерлік тау-кен жұмыстарында суарылатын үстіңгі қабат блоктарын дайындау кезіндегі жару жұмыстарын зерттеуді талдау / B. Khussan [және т. б.] // Mining Journal of Kazakhstan. – 2025. – № 11. – Б. 26–31 (ағылшын тілінде)*
8. *Zeitinova Sh. B., Imashev A. Zh., Suimbayeva A. A. Біріктірілген тау-кен жұмыстары кезінде тік өңдеулер маңындағы тау жыныстары массивінің кернеу-деформация күйін сандық модельдеу // Civil Engineering Journal. – 2024. – Т. 10. – № 9. – Б. 2939–2954 (ағылшын тілінде)*
9. *Laubscher D. H. Кеніш жобалауындағы тау жыныстары массасын бағалауға арналған геомеханикалық жіктеу жүйесі // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 1990. – Т. 90 (10). – Б. 257–273 (ағылшын тілінде)*
10. *Bieniawski Z. T. Инженерлік мақсаттарға арналған тау жыныстарының жіктелуі: тау-кен, құрылыс және мұнай инженериясындағы инженерлер мен геологтарға арналған толық нұсқаулық. – Нью-Йорк: John Wiley & Sons, 1989. – 251 б. (ағылшын тілінде)*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Анализ устойчивости высоких скальных склонов в глубоких карьерах на основе микросейсмического мониторинга / C. Zhao [и др.] // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2026. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2026.02.028 (на английском языке)*
2. *Bar N., Dixon R. Раскрытие неизвестного: практическое применение InSAR для мониторинга состояния склонов и управления рисками на нескольких открытых горных выработках // Engineering Geology. – 2021. – Т. 293. – Ст. 106326 (на английском языке)*
3. *Механизм фракто- и триболюминесценции кварца / Yurov V. M., Portnov V. S., Rabatuly M. [и др.] // Advances in Science, Technology & Innovation. – Шам: Springer, 2025. – С. 1037–1048 (на английском языке)*
4. *Brady B. H. G., Brown E. T. Механика горных пород при подземной разработке. – 3-е изд. – Дордрехт: Springer, 2006. – 628 с. (на английском языке)*
5. *Изучение структуры массива и уточнение физико-механических свойств горных пород в условиях рудника Ушкатын-III / Б. Мұратұлы [и др.] // Горный журнал Казахстана. – 2023. – № 1. – С. 32 (на русском языке)*
6. *Обоснование и разработка инновационной контейнерной технологии подъема горной массы из глубоких карьеров / B. Khussan [и др.] // Mining of Mineral Deposits. – 2022. – Т. 16. – № 4. – С. 87–95 (на английском языке)*
7. *Анализ исследований по ведению взрывных работ при подготовке обводненных вскрышных блоков на открытых горных работах / B. Khussan [и др.] // Горный журнал Казахстана. – 2025. – № 11. – С. 26–31 (на английском языке)*
8. *Zeitinova Sh. B., Imashev A. Zh., Suimbayeva A. A. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород вблизи вертикальных выработок при комбинированной разработке месторождений // Civil Engineering Journal. – 2024. – Т. 10. – № 9. – С. 2939–2954 (на английском языке)*
9. *Laubscher D. H. Система геомеханической классификации для оценки массива горных пород при проектировании шахт // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 1990. – Т. 90 (10). – С. 257–273 (на английском языке)*
10. *Bieniawski Z. T. Классификация горных пород в инженерных целях: полное руководство для инженеров и геологов в горном, гражданском и нефтегазовом строительстве. – Нью-Йорк: John Wiley & Sons, 1989. – 251 с. (на английском языке)*

Information about the authors:
Kerimbayeva N. B., Ph.D student of the Department of Working out of mineral deposits, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan), *Nazerke_kerimbayeva@bk.ru;* https://orcid.org/0009-0004-2669-4773
Zhunis G. M., Associate Professor of the Department of Working out of Mineral deposits, PhD, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan), *gul_zat_89_09@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0002-5833-8851
Ivadilinova D. T., Associate Professor of the Department of Working out of mineral deposits, Ph.D, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan), *dinulb@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0002-9731-0587
Abdiev A. R., professor, director of the Scientific and Technical Center named after. prof. Sh. A. Mambetov «Geoquantum», Doctor of Technical Sciences, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov (Bishkek, Kyrgyzstan), *arstanbek.abdiev@kstu.kg;* https://orcid.org/0000-0003-3409-5717

Авторлар туралы мәліметтер:
Керімбаева Н. Б., Ph.D докторанты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университетінің «Пайдалы қазбалар кенорыдарын өндіру» кафедрасы (Қарағанды қ., Қазақстан)
Жүніс Г. М., Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университетінің «Пайдалы қазбалар кенорыдарын өндіру» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Ph.D (Қарағанды қ., Қазақстан)
Ивадилинова Д. Т., «Пайдалы қазбалар кенорыдарын өндіру» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Ph.D, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті (Қарағанды қ., Қазақстан)
Абдиев А. Р., профессор, Ш. А. Мәмбетов атындағы «Геоквант» ғылыми-техникалық орталығының директоры, техника ғылымдарының докторы, И. Раззаков атындағы Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті (Бішкек қ., Қырғызстан)

Сведения об авторах:
Керимбаева Н. Б., докторант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Карагандинский Технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан)
Жүніс Г. М., ассоц. профессор кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, Ph.D (г. Караганда, Казахстан)
Ивадилинова Д. Т., ассоц. профессор кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Ph.D, Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан)
Абдиев А. Р., профессор, директор Научно-технического центра им. проф. Ш. А. Мамбетова «Геоквантум», д. т. н., Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова (г. Бишкек, Кыргызстан)

Код МРНТИ 53.31.17

***Р. Т. Төлеуқадыр[1], А. Қ. Смағұлов[1], Ж. О. Садық[1], О. В. Заякин[2]**

[1]Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан),

[2]Институт металлургии им. академика Н. А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург, Российская Федерация)

ПРЯМОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ ХРОМОМ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ МЕТОДОМ МЕТАЛЛОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования возможности прямого легирования стали хромом в индукционной печи без применения феррохрома и вакуумных технологий. Целью работы являлась оценка возможности восстановления хрома из хромового концентрата непосредственно в металлическом расплаве с использованием комплексного восстановителя ФАСК. Исследованы три варианта металлической основы шихты: стальной лом, восстановленный железный порошок и их смесь. Среднее извлечение хрома составило 60–82%, а содержание хрома в металле — 12,49–22,12%. Научная новизна работы состоит в апробации прямого легирования хромом с применением ФАСК в атмосферных условиях и оценке влияния металлической основы шихты на тепловой режим и извлечение хрома.

Ключевые слова: *хром, сталь, металлотермия, индукционная печь, легирование, шлак.*

Металлотермиялық тотықсыздандыру әдісімен индукциялық пеште болатты хроммен тікелей легірлеу

Аңдатпа. Мақалада феррохромды және вакуумдық технологияларды қолданбай, индукциялық пеште болатты хроммен тікелей легірлеу мүмкіндігін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Жұмыстың мақсаты ФАСК кешенді тотықсыздандырғышын пайдалана отырып, хром концентратынан хромды тікелей металл балқымасында тотықсыздандыру мүмкіндігін бағалау болды. Шихтаның металл негізінің үш нұсқасы зерттелді: болат сынығы, тотықсыздандырылған темір ұнтағы және олардың қоспасы. Хромның орташа алыну дәрежесі 60–82%, ал металдағы хром мөлшері 12,49–22,12% болды. Жұмыстың ғылыми жаңалығы атмосфералық жағдайда ФАСК қолдану арқылы хроммен тікелей легірлеуді сынақтан өткізуден және шихтаның металл негізінің жылулық режим мен хромның алынуына әсерін бағалаудан тұрады.

Түйінді сөздер: *хром, болат, металлотермия, индукциялық пеш, легірлеу, қож.*

Direct alloying of steel with chromium in an induction furnace by metallothermic reduction

Abstract. This paper investigates the feasibility of direct chromium alloying of steel in an induction furnace without using ferrochrome or vacuum technology. The aim was to evaluate the reduction of chromium from chromium concentrate directly in a metallic melt using the FeAlSiCa complex reductant. Three metallic charge bases were investigated: steel scrap, hydrogen-reduced iron powder, and their mixture. Mean chromium recovery ranged from 60 to 82%, while the chromium content of the metal was 12.49–22.12%. The novelty of the work lies in testing direct chromium alloying with FeAlSiCa under atmospheric conditions and evaluating the influence of the metallic charge base on the thermal regime and chromium recovery.

Keywords: *chromium, steel, metallothermy, induction furnace, alloying, slag.*

Введение

Методы выплавки легированных сталей можно классифицировать по основному технологическому агрегату, используемому в процессе плавки, включая конвертеры, мартеновские, электродуговые и индукционные печи, а также комбинированные маршруты с применением агрегатов внепечной обработки [1, 2]. Несмотря на разнообразие подходов, легирующие элементы, как правило, вводятся в металлической форме, преимущественно в виде ферросплавов (ферросилиций, ферромарганец, феррохром и др.) [3]. Их широкое применение обусловлено технологичностью и стабильным усвоением, однако сопровождается рядом недостатков, таких как наличие нежелательных примесей и высокая стоимость высококачественных, в частности низкоуглеродистых, марок [3].

Для коррозионностойких сталей ключевым легирующим элементом является хром: при его содержании свыше ~12% формируется устойчивая пассивная оксидная пленка, обеспечивающая высокую коррозионную стойкость. Наиболее распространенной технологией является получение таких сталей с использованием феррохрома (ФХ), вводимого в шихту электродуговой печи, с последующим рафинированием стали (прежде всего обезуглероживанием) во внепечных агрегатах, например в аргоно-кислородных конвертерах (AOD) [4]. Данный маршрут включает двукратное расплавление сырья и дополнительные операции по удалению углерода, что приводит к повышенным энерго- и ресурсозатратам [5]. Производство ФХ является чрезвычайно энергоемким (3–4.7 МВт·ч/т), сопровождается потерями хрома до 30% и образованием экологически опасных хромсодержащих шлаков [6].

В связи с этим разрабатываются альтернативные методы легирования стали хромом, направленные на исключение отдельной стадии получения ФХ. Одним из перспективных подходов является технология прямого легирования, при которой хром вводится в расплав стали в неметаллической форме (например, в виде оксидов) и восстанавливается *in situ*. Показано, что использование хромсодержащего сырья совместно с углеродным восстановителем обеспечивает степень перехода хрома в металл на уровне 90% и выше при корректировке состава шлака и условий плавки [7, 8]. Вакуумно-углеродный и силикотермический варианты процесса позволяют достигать извлечения хрома до 95–97% при одновременном снижении содержания кислорода и неметаллических включений в стали [9, 10].

Особый интерес представляет реализация прямого легирования в индукционных печах, которые широко применяются для выплавки легированных и нержавеющих сталей, особенно в литейных производствах. Индукционная плавка характеризуется низким уровнем окисления металла, однако не обеспечивает активного рафинирования расплава, что требует использования тщательно подобранной шихты [11]. В связи с этим актуальной задачей является разработка эффективного способа прямого легирования хромом именно в условиях индукционной плавки.

В настоящем исследовании в качестве восстановителя выбран ФАСК, компоненты которого (***Si***, ***Al*** и ***Ca***) термодинамически способны восстанавливать оксиды хрома; соответствующие реакции могут сопровождаться выделением тепла. Рабочая гипотеза состояла в том, что применение ФАСК позволит осуществить прямое легирование в атмосферных условиях, без использования вакуума. Возможность получения хромсодержащего металла требуемого состава, а также потенциального исключения отдельной энергоемкой стадии производства феррохрома оценивали по результатам лабораторных плавок.

Материалы и методы

Шихта состояла из двух частей. Первая включала стальной лом и восстановленную железную губку, полученную путем восстановления прокатной окалины водородом. Вторая — хромовый концентрат, восстановитель ферроалюмосиликокальций (ФАСК) и флюс — известь. Выбор состава второй части шихты основывался на ранее выполненных исследованиях по получению низкоуглеродистой (НУ) ФХ в индукционной печи [12]. Химический состав всех исходных материалов приведен в таблице 1.

В дальнейших плавках железная губка, хромовый концентрат, ФАСК и известь использовались с размером частиц < 120 мкм, тогда как стальной лом применяли в виде обрезков прутка диаметром около 1 см и высотой 0,5–1,5 см. На основе ранее проведенных исследований [12] был рассчитан состав исходной шихты, исходя из предположения полного перехода металлической части шихты в состав стали, а также стехиометрического расчета количества восстановителя по суммарному содержанию кислорода в оксидных компонентах хромового концентрата.

Исследовали три варианта шихты, различавшиеся только видом металлической основы: стальной лом (1), восстановленный железный порошок (2) и их смесь в массовом соотношении 1:1 (3). Для всех вариантов соотношение компонентов сохраняли постоянным: металлическая основа – 35,4%, хромовый концентрат — 12,5%, ФАСК — 26,7% и известь — 25,4%. Доля хромового концентрата была задана исходя из целевого получения хромсодержащего металла, а количество ФАСК рассчитано по кислородному балансу оксидных компонентов концентрата с учетом результатов работы [12], чтобы обеспечить восстановление хрома и ограничить избыточный переход кремния в металл. Количество извести выбрано по расчетному составу шлака для достижения основности около 1,0 и связывания продуктов восстановления в оксидную фазу. Постоянство соотношения концентрата, восстановителя и флюса позволяло оценивать влияние вида металлической основы на нагрев и извлечение хрома. Для каждого варианта шихты в одинаковых условиях провели по три параллельные плавки. Если не указано иное, далее приведены средние арифметические результаты по трем плавкам.

Плавки проводили в индукционной печи мощностью 16 кВА в атмосферных условиях с постепенным увеличением силы тока до 600 А и выдержкой 6 мин. В качестве основного использовали керамический тигель (99,9% Al_2O_3), установленный в графитовый тигель, нагреваемый индукционным способом. Охлаждение продукта плавки осуществляли на воздухе в тигле, после чего тигель разрушали для извлечения металла и шлака.

Полученные металлические образцы исследовали методом растровой электронной микроскопии с использованием микроскопа Zeptools ZEM20, оснащенного ЭДС-детектором Oxford Instruments. Содержание элементов ***S***, ***P***, ***N***, ***C***, а также состав шлаков определяли стандартными методами аналитической химии, включая кислотное разложение, гравиметрические и титриметрические методики.

Результаты

Температуру в тигле фиксировали термопарой в ходе каждой плавки. На рис. 1 представлены средние температурные профили по трем плавкам каждого варианта.

Из рис. 1 следует, что шихта на основе лома характеризуется более интенсивным нагревом по сравнению с восстановленным порошком и их смесью во всем диапазоне силы тока до ~460 А. В этом интервале разница температур между шихтами составляет порядка 200–250 °С, что указывает на более эффективный теплообмен и электромагнитное взаимодействие в системе с металлической основой.

При увеличении силы тока до 450 А и выше температурный разрыв между вариантами шихты существенно

Таблица 1

Химический состав исходных материалов, %

Кесте 1

Бастапқы материалдардың химиялық құрамы, %

Table 1

Chemical composition of the starting materials, %

	Fe	***Cr***	***Si***	***Al***	***Ca***	***C***	***S***	***P***	***Mn***	***Ti***	***V***
Лом	ост.	0,13	0,21	-	-	0,19	0,05	0,04	0,60	-	-
Железная губка	ост.	0,09	0,10	-	-	0,07	0,03	0,02	0,15	-	-
ФАСК	ост.	-	68,35	12,45	10,12	0,69	0,018	0,040	-	0,94	0,29
	Fe_2O_3	Cr_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	***CaO***	***MgO***	***S***	***P***	Потери при прокаливании		
Хромовый концентрат	12,59	ост.	5,03	7,44	0,69	18,0	0,021	0,004	3,96		
Известь	-	-	≤ 1,8	-	≥ 92,00	-	≤ 0,03	≤ 0,02	≤ 6		

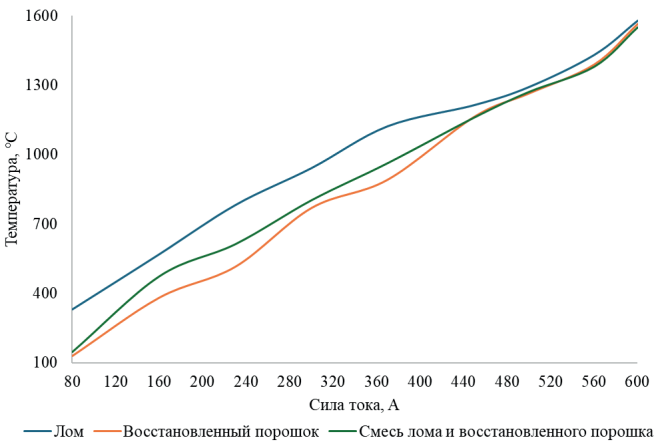


Рис. 1. Температурный профиль процесса нагрева в индукционной печи в зависимости от основы шихты и силы тока.
Сурет 1. Шихта түрі мен ток күшіне байланысты индукциялық пеште қыздыру үрдісінің температуралық профилі.
Figure 1. Temperature profile of the heating process in an induction furnace depending on the charge base and current strength.

сокращается и не превышает 50–100 °С. Данное поведение связано с развитием экзотермических реакций окисления компонентов в составе ФАСК, сопровождающихся кратковременными температурными всплесками. В обоих вариантах шихты в этом диапазоне фиксируются температурные колебания с локальным повышением температуры от ~1200 °С до 1400–1500 °С, что свидетельствует о протекании интенсивных восстановительных процессов.

При достижении максимальной силы тока 600 А и изотермической выдержке в течение 6 мин постоянная температура составляет 1550–1580 °С, практически одинаковая для всех вариантов шихты.

После цикла нагрева и выдержки, тигель извлекали из рабочей зоны печи и остужали на воздухе. На рис. 2 представлен внешний вид типичного продукта плавки при извлечении его из тигля.

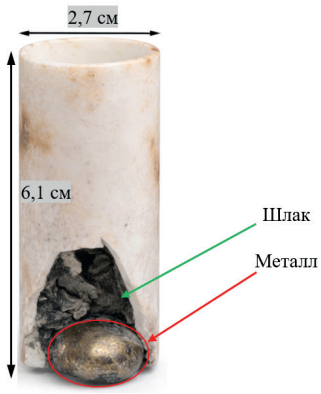


Рис. 2. Типичный внешний вид продукта плавки.
Сурет 2. Балқытылу өнімінің әдеттегі түрі.
Figure 2. Typical appearance of the smelting product.

Из рис. 2 можно заметить образование металла и наличие камневидного твердого шлака. При извлечении металла можно было заметить практически отсутствие значимых корольков в объеме шлака (не более 1–2% от общей массы металла).

После каждой плавки металл извлекали, взвешивали и определяли его химический состав. В таблице 2 приведены средние значения по трем параллельным плавкам для каждого варианта шихты.

С учетом состава и массы исходной шихты, а также массы и химического состава полученного металла для каждой плавки определяли сквозное извлечение хрома в сталь. Средние значения для вариантов на основе стального лома, восстановленного железного порошка и их смеси составили соответственно 60, 82 и 64%.

Обсуждение

Восстановительные реакции при температуре 1200 °С можно описать следующим образом:

$$Cr_2O_3 + 3Si = 2Cr + 3SiO_2 \ (\Delta G \approx -294 \text{ кДж/моль}). \quad (1)$$

$$Cr_2O_3 + 2Al = 2Cr + Al_2O_3 \ (\Delta G \approx -524 \text{ кДж/моль}). \quad (2)$$

$$Cr_2O_3 + 3Ca = 2Cr + 3CaO \ (\Delta G \approx -604 \text{ кДж/моль}). \quad (3)$$

Таблица 2

Химический состав металла из разных вариантов шихты, %

Кесте 2

Әртүрлі шихта түрлерінен алынған метал құрамы, %

Table 2

Chemical composition of metal from different charge options, %

Основа шихты	*Fe*	*Cr*	*Si*	*Ti*	*V*	*C*	*S*	*P*
Лом	ост.	12,49	0,59	-	-	0,20	0,022	0,030
Восстановленный порошок	ост.	22,12	1,18	0,23	0,46	0,19	0,023	0,029
Смесь лома и восстановленного порошка	ост.	16,33	0,72	0,10	0,12	0,19	0,020	0,029

Значения изменения энергии Гиббса восстановительных реакций при температуре 1200 °C были получены с использованием метода линейной температурной интерполяции на основе доступных термодинамических данных для более высоких температур. Поскольку рассматриваемый температурный интервал (1200–1500 °C) является относительно узким, температурная зависимость величины ΔG в данном диапазоне может быть аппроксимирована линейной функцией.

Данный подход широко применяется при предварительном термодинамическом анализе и сравнительной оценке восстановительной способности различных восстановителей, когда основной целью является определение относительной термодинамической предпочтительности реакций, а не точный расчет равновесных параметров.

Исходя из представленных данных можно отметить значительную экзотермичность процесса, что дает предпосылки к самоподдерживающемуся режиму восстановления.

Ранее при индукционной плавке НУФХ с применением ФАСК в аналогичных восстановительных условиях регистрировались значительно более высокие температуры — до ~2100–2200 °C [12]. В рассматриваемом случае более низкий температурный уровень объясняется меньшим содержанием восстановителя, а также локальным характером экзотермического перегрева, при котором выделяющееся тепло перераспределяется в объеме относительно холодного металлического расплава, основой которого являются лом и восстановленный порошок. На данном этапе процесса формируется жидкая фаза, способствующая интенсификации тепломассопереноса.

Извлечение хрома в проведенных экспериментах оказалось сопоставимым с уровнем, достигаемым при отдельном получении НУФХ. При отдельном восстановлении хрома из хромового концентрата степень его перехода в сталь составляла порядка **65%** при использовании такой доли ФАСК, которая позволяла минимизировать нежелательный переход кремния в металлическую фазу [12].

Для сопоставления следует отметить, что при промышленном производстве ФХ в закрытых руднотермических печах степень извлечения хрома обычно составляет 83–88% при использовании предварительно окисленных окатышей, тогда как при традиционной плавке неотсортированного хромита данный показатель, как правило, не превышает 70–75%.

Более высокое извлечение хрома — до 90% — достигается при карботермическом восстановлении смеси хромитовой руды и лома в индукционной печи [8]. При этом авторы подчеркивают, что использование железного порошка является более предпочтительным с точки зрения извлечения хрома. Вместе с тем, в указанной работе процесс плавки осуществлялся в атмосфере аргона, что существенно снижало окислительное воздействие окружающей среды. Аналогично, при прямом легировании стали хромом в силикотермическом процессе степень извлечения ***Cr*** до 95.4% была обеспечена при индукционной плавке в среде аргона чистотой 99,999% [10].

Полученные результаты указывают на существенное влияние газовой атмосферы на эффективность извлечения хрома. Это влияние накладывается на окисленную природу исходного сырья, а также на высокую склонность компонентов ФАСК к окислению. Известно, что при выплавке коррозионностойких сталей в дуговых печах в шлаке может накапливаться до 2–10% Cr_2O_3, что говорит о дополнительных потерях хрома. В условиях вакуума при карботермическом восстановлении, за счет снижения парциального давления ***CO***, степень извлечения хрома может превышать 95% [9]. Однако применение вакуумных технологий существенно усложняет процесс и приводит к заметному росту его стоимости.

Максимальное извлечение хрома при использовании восстановленного железного порошка в настоящей работе составило порядка 82%, что обусловлено совокупным влиянием перечисленных выше факторов. Существенную роль играет и основность шлака, поскольку известно, что повышение основности способствует увеличению степени извлечения хрома. В проведенных экспериментах основность шлака для всех вариантов шихты находилась в диапазоне 0,9–1,0, что соответствует значениям, характерным для базовых исследований по выплавке НУФХ в индукционной печи с применением ФАСК [12]. Для НУФХ в целом типичен интервал основности 0,8–1,4 [6], что указывает на возможность ее целенаправленного увеличения в дальнейшем с целью повышения извлечения хрома.

Следует также отметить, что при традиционном вводе хрома в виде феррохрома значительные потери хрома являются неизбежными: до 30% хрома теряется в шлак на стадии производства самого ферросплава, а дополнительные потери возникают при последующем легировании стали. В этом контексте прямое легирование позволяет избежать двойного окисления хрома.

Для всех исследованных вариантов шихты зафиксировано низкое содержание вредных примесей в полученных металлических образцах (***S***, ***P*** < 0.03%), что указывает на эффективность протекающих рафинирующих реакций. В частности, это может быть связано с добавлением извести, обеспечивающей связывание серы и фосфора в шлак. Аналогичные эффекты рафинирования ранее наблюдались и при отдельном получении НУФХ с использованием ФАСК [12].

Помимо возможности прямого легирования стали хромом, открывающей перспективы непосредственного получения коррозионностойких сталей, важным преимуществом разработанного подхода является стабильность образующегося шлака. Известно, что в шлаках феррохрома возможно образование двухкальциевого силиката, который при охлаждении переходит в γ-Ca_2SiO_4 и приводит к саморассыпанию шлака [12]. В настоящем исследовании, судя по стабильному состоянию шлаков при хранении более 40 суток, данного эффекта удалось избежать. Аналогичные результаты были ранее получены при отдельной выплавке НУФХ в индукционной печи с применением ФАСК [12].

Заключение

Серии лабораторных плавок показали принципиальную возможность прямого легирования стали хромом в индукционной печи с использованием хромового концентрата и восстановителя ФАСК в атмосферных условиях.

Для каждого из трех вариантов шихты выполнено по три параллельные плавки. Среднее содержание хрома в металле составило 12,49–22,12%, а среднее сквозное извлечение хрома — 60–82%.

Наиболее высокие средние значения содержания хрома (22,12%) и его извлечения (82%) получены в варианте с восстановленным железным порошком. Для вариантов на основе стального лома и смеси лома с порошком среднее извлечение составило соответственно 60 и 64%. Полученные различия свидетельствуют о влиянии вида металлической основы на тепловой режим и восстановление хрома.

Во всех сериях плавок среднее содержание серы и фосфора в металлических образцах не превышало соответственно 0,023 и 0,030%, а образовавшийся шлак сохранял стабильность при хранении более 40 суток. Троекратное повторение каждого варианта и использование средних значений повышают обоснованность выводов о принципиальной осуществимости предложенного процесса и влиянии металлической основы шихты на извлечение хрома.

Благодарность

Данные исследования были проведены в рамках программно-целевого финансирования Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR24992758).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Достижения в области планирования и диспетчеризации производства в сталеплавильной промышленности: обзор и его интеллектуальное развитие / Y. Wang [и др.] // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2025. – № 32. – С. 2322–2340 (на английском языке)*
2. *Suer J., Traverso M., Jäger N. Обзор оценок жизненного цикла стали и экологический анализ будущих сценариев производства стали // Sustainability. – 2022. – № 14. – Ст. 14131 (на английском языке)*
3. *Jalkanen H., Gasik M. Теория переработки ферросплавов // Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology / под ред. M. Gasik. – Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2013. – С. 29–82 (на английском языке)*
4. *Эволюция оксидных включений в процессе выплавки нержавеющей стали 304L для ядерной энергетики / X. Chen [и др.] // Metals. – 2019. – № 9. – Ст. 257 (на английском языке)*
5. *Bhonde P. J., Ghodgaonkar A. M., Angal R. D. Различные методы получения низкоуглеродистого феррохрома // Proceedings of INFACON XI. – 2007. – С. 85–90 (на английском языке)*
6. *Безуглеродная выплавка феррохрома с использованием сплава ФАСК / A. Akhmetov [и др.] // Processes. – 2025. – № 13. – Ст. 1745 (на английском языке)*
7. *Прямое легирование хромом с использованием хромитовой руды в присутствии металлического железа / X. Hu [и др.] // Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. – 2013. – № 49. – С. 207–215 (на английском языке)*
8. *Прямое легирование стали хромом с использованием брикетов из хромитовой руды, прокатной окалины и нефтяного кокса / X. Hu [и др.] // Steel Research International. – 2017. – № 88. – Ст. 1600247 (на английском языке)*
9. *Исследование прямого легирования стали восстановлением Cr2O3 углеродом в вакууме / T. Song [и др.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – № 28. – С. 3903–3910 (на английском языке)*
10. *Y. Chen, Z. Xue, S. Song. Прямое легирование стали посредством силико-термического самовосстановления хромитовой руды с использованием кремнийсодержащих твердых отходов // Metals. – 2024. – № 14. – Ст. 138 (на английском языке)*
11. *Плавка и обработка стали для литья // Foseco Ferrous Foundryman's Handbook / под ред. J. R. Brown. – 11-е изд. – Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2000. – С. 121–129 (на английском языке)*
12. *Использование хромитового шпинелевого порошка в металлотермической выплавке низкоуглеродистого феррохрома / Y. Makhambetov [и др.] // Processes. – 2025. – № 13. – Ст. 2288 (на английском языке)*

ПАЙДАЛЫНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Өндірісті жоспарлау және диспетчерлеу саласындағы жетістіктер: шолу және оның интеллектуалды дамуы / Y. Wang [және т. б.] // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2025. – № 32. – Б. 2322–2340 (ағылшын тілінде)*
2. *Suer J., Traverso M., Jäger N. Болаттың өмірлік циклін бағалау бойынша шолу және болашақ болат өндірісінің сценарийлерін экологиялық талдау // Sustainability. – 2022. – № 14. – 14131 (ағылшын тілінде)*
3. *Jalkanen H., Gasik M. Ферроқорытпаларды өңдеу теориясы // Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology / ред. M. Gasik. – Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2013. – Б. 29–82 (ағылшын тілінде)*
4. *Ядролық энергетикаға арналған 304L тот баспайтын болатты балқыту процесіндегі оксидтік қосындылардың эволюциясы / X. Chen [және т. б.] // Metals. – 2019. – № 9. – 257 (ағылшын тілінде)*
5. *Bhonde P. J., Ghodgaonkar A. M., Angal R. D. Төмен көміртекті феррохром алудың әртүрлі әдістері // Proceedings of INFACON XI. – 2007. – Б. 85–90 (ағылшын тілінде)*
6. *Кешенді ФАСК қорытпасын қолдана отырып феррохромды көміртексіз балқыту / A. Akhmetov [және т. б.] // Processes. – 2025. – № 13. – 1745 (ағылшын тілінде)*
7. *Металл темірдің қатысуымен хромит рудасын пайдаланып хроммен тікелей легірлеу / X. Hu [және т. б.] // Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. – 2013. – № 49. – Б. 207–215 (ағылшын тілінде)*
8. *Хромит рудасы, прокаттық окалина және мұнай коксы негізіндегі брикеттерді қолдана отырып болатты хроммен тікелей легірлеу / X. Hu [және т. б.] // Steel Research International. – 2017. – № 88. – 1600247 (ағылшын тілінде)*

9. *Вакуум жағдайында Cr_2O_3 көміртекпен тотықсыздандыру арқылы болатты тікелей легірлеуді зерттеу / T. Song [және т. б.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – № 28. – Б. 3903–3910 (ағылшын тілінде)*
10. *Chen Y., Хие Z., Song S. Құрамында кремний бар қатты қалдықтарды пайдалану арқылы хромит рудасының силико-термиялық өзін-өзі тотықсыздандыруы негізінде болатты тікелей легірлеу // Metals. – 2024. – № 14. –138 (ағылшын тілінде)*
11. *Құюға арналған болатты балқыту және өңдеу [Melting and Treatment of Steel for Casting] // Foseco Ferrous Foundryman's Handbook / ред. J. R. Brown. – 11-басылым. – Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2000. – Б. 121–129 (ағылшын тілінде)*
12. *Төмен көміртекті феррохромды металлотермиялық балқытуда хромит шпинель ұнтағын пайдалану / Y. Makhambetov [және т. б.] // Processes. – 2025. – № 13. – 2288 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. *Advancements in production planning and scheduling within steel manufacturing: A review and its intelligent development / Y. Wang et al. // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2025. – No. 32. – P. 2322–2340 (in English)*
2. *Suer J., Traverso M., Jäger N. Review of life cycle assessments for steel and environmental analysis of future steel production scenarios // Sustainability. – 2022. – No. 14. – Article 14131 (in English)*
3. *Jalkanen H., Gasik M. Theory of Ferroalloys Processing // Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology / ed. M. Gasik. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. – P. 29–82 (in English)*
4. *Oxide-inclusion evolution in the steelmaking process of 304L stainless steel for nuclear power / X. Chen et al. // Metals. – 2019. – No. 9. – Article 257 (in English)*
5. *Bhonde P.J., Ghodgaonkar A.M., Angal R.D. Various techniques to produce low carbon ferrochrome // Proceedings of INFACON XI. – 2007. – P. 85–90 (in English)*
6. *Carbon-free smelting of ferrochrome using FeAlSiCa alloy / A. Akhmetov et al. // Processes. – 2025. – No. 13. – Article 1745 (in English)*
7. *Direct chromium alloying by chromite ore with the presence of metallic iron / X. Hu // Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. – 2013. – No. 49. – P. 207–215 (in English)*
8. *Direct alloying steel with chromium by briquettes made from chromite ore, mill scale, and petroleum coke / X. Hu et al. // Steel Research International. – 2017. – No. 88. – Article 1600247 (in English)*
9. *Study of direct alloying of steels by carbon reduction of Cr2O3 under vacuum / T. Song et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – No. 28. – P. 3903–3910 (in English)*
10. *Chen Y., Xue Z., Song S. The direct alloying of steel through silicothermic self-reduction of chromite ore utilizing Si-containing solid waste // Metals. – 2024. – No. 14. – Article 138 (in English)*
11. *Melting and Treatment of Steel for Casting // Foseco Ferrous Foundryman's Handbook / ed. J. R. Brown. – 11th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – P. 121–129 (in English)*
12. *Utilization of chromite spinel powder in the metallothermic smelting of low-carbon ferrochrome / Y. Makhambetov et al. // Processes. – 2025. – No. 13. – Article 2288 (in English)*

Сведения об авторах:
Толеукадыр Р. Т., докторант Ph.D по образовательной программе 8D07201 — «Металлургия», научный сотрудник, Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан), *ruslan-94kz@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0002-1606-838X
Смағұлов А. Қ., м. т. н., инженер, Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан), *arnatsmagulov@gmail.com;* https://orcid.org/0000-0001-5837-4257
Садық Ж. О., магистрант, инженер Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан), *sadzhad03@gmail.com*; https://orcid.org/0009-0006-8557-1532
Заякин О. В., д. т. н., заведующий лабораторией «Сталь и ферросплавы», Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург, Российская Федерация), *zferro@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0009-9831-1993

Авторлар туралы мәліметтер:
Төлеуқадыр Р. Т., 8D07201 — «Металлургия» білім беру бағдарламасы бойынша Ph.D докторанты, ғылыми қызметкер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты (Қарағанды қ., Қазақстан)
Смағұлов А. Қ., т. ғ. м., инженер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты (Қарағанды қ., Қазақстан)
Садық Ж. О., магистрант, инженер, Ж. Әбішев атындағы Химия-металлургия институты (Қарағанды қ., Қазақстан)
Заякин О. В., т. ғ. д., «Болат және ферроқорытпалар» зертханасының меңгерушісі, Ресей ғылым академиясы Орал бөлімшесінің Металлургия институты (Екатеринбург қ., Ресей Федерациясы)

Information about the authors:
Toleukadyr R. T., Ph.D student in the educational program 8D07203 — «Metallurgy», junior research fellow, Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan)
Smagulov A. K., master of tech. sci., engineer, Chemical and Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan)
Sadyk Zh. O., master's student, engineer, Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan)
Zayakin O. V., Doctor of Technical Sciences, Head of the «Steel and Ferroalloys» Laboratory, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg, Russian Federation)

Код МРНТИ 52.45.17

А. Р. Мамбеталиева[1], *А. Ж. Танабаева[1], Т. А. Карабалаев[1], Ю. П. Морозов[2]

[1]Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),

[2]Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург, Россия)

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ ОКИСЛЕННЫХ СВИНЦОВО-ЦИНКОВЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОСКУДУК

Аннотация. Настоящее исследование направлено на оценку применимости гравитационных методов для обогащения окисленных свинцово-цинковых руд Коскудукского месторождения. В рамках лабораторных исследований были проведены испытания с использованием виброцентробежной сепарации и концентрации на столе при различной крупности исходного материала, изменяющейся в пределах содержания класса -0,074 мм от 19,9 до 80%. Выявлено, что высокая степень окисления, тонкое вкрапление рудных минералов и интенсивное образование шламов существенно снижают эффективность гравитационного разделения. Результаты экспериментов указывают на ограниченность самостоятельного применения гравитационных методов и подтверждают необходимость разработки комплексных технологических схем, ориентированных на высокоэффективные и селективные флотационные процессы, адаптированные к особенностям исследуемого сырья.

Ключевые слова: *гравитационное обогащение, виброцентробежная сепарация, концентрационный стол, степень измельчения, тонкая вкрапленность, технологическая эффективность.*

Қоскұдық кен орнының тотығуға ұшыраған қорғасын-мырыш кендтерін гравитациялық байыту технологиясының тиімділігін бағалау

Аңдатпа. Осы зерттеу Қоскұдық кен орнының тотыққан қорғасын-мырыш кендерін байыту үшін гравитациялық әдістердің қолданылуын бағалауға бағытталған. Зертханалық зерттеулер шеңберінде дірілден тепкіш сепарацияны және бастапқы материалдың әр түрлі мөлшерінде, 0,074 мм сынып мазмұны шегінде 19,9-дан 80%-ға дейін өзгеретін үстелде шоғырлануды пайдалана отырып сынақтар жүргізілді. Тотығудың жоғары дәрежесі, кен минералдарының майда қосылуы және шламдардың қарқынды түзілуі гравитациялық бөлінудің тиімділігін айтарлықтай төмендететіні анықталды. Зерттеудің нәтижелері гравитациялық әдістерді өз бетінше қолданудың шектеулілігін көрсетеді және зерттелетін шикізаттың ерекшеліктеріне бейімделген жоғары тиімді және селективті флотациялық процестерге бағытталған кешенді технологиялық схемаларды әзірлеу қажеттілігін растайды.

Түйінді сөздер*: гравитациялық байыту, виброцентрифугалық сепарация, концентрациялық үстел, ұнтақтау дәрежесі, шлам түзілуі, технологиялық тиімділігі.*

Assessment of the technological efficiency of gravity concentration for oxidized lead-zinc ores of the Koskuduk deposit

Abstract. The present study is aimed at assessing the applicability of gravity methods for the enrichment of oxidized lead-zinc ores from the Koskuduk deposit. As part of the laboratory research, tests were carried out using vibration separation and concentration on the table at different sizes of the starting material, varying within the range of the content of the class -0.074 mm from 19.9 to 80%. It has been revealed that a high degree of oxidation, fine inclusions of ore minerals and intensive sludge formation significantly reduce the efficiency of gravity separation. The experimental results indicate the limitations of independent application of gravity methods and confirm the need to develop complex technological schemes focused on highly efficient and selective flotation processes adapted to the characteristics of the raw materials under study.

Keywords*: gravity separation, vibrocentrifugal separation, concentration table, degree of grinding, fine inclusions, technological efficiency.*

Введение

Обогащение окисленных свинцово-цинковых руд в последние десятилетия становится все более актуальной задачей для горнодобывающей и перерабатывающей отрасли. В условиях истощения легкообогатимых запасов сульфидных руд, снижение качества минерального сырья, а также экологические ограничения на размещение отходов стимулируют переход к разработке ранее малоизученных или нерентабельных окисленных руд. Особую сложность представляет минералогический состав таких руд, в которых свинец и цинк представлены преимущественно в виде церуссита ***[$PbCO_3$]***, англезита ***[$PbSO_4$]***, смитсонита ***[$ZnCO_3$]***, гемиморфита ***[$Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$]***, гидрозинцита ***[$Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$]*** и других форм, отличающихся тонкой вкрапленностью и сложной текстурной [1], [2].

Традиционные методы переработки, основанные на флотации, разработанные в первую очередь для сульфидных руд, в случае с окисленными минералами оказываются менее эффективными. Это обусловлено слабой реагентной активностью окисленных форм металлов, а также их высокой дисперсностью и различной природной поверхностью свойств [4]. Кроме того, окисленные руды часто сопровождаются значительным количеством глинистых и углеродистых включений, что затрудняет флотационное разделение и требует применения многостадийных схем с высокой удельной затратой реагентов [5], [6] .

В этой связи возрастающий интерес вызывает использование гравитационных методов обогащения, основанных на различии плотностей минералов и пустой породы. В ряде случаев гравитационные методы позволяют отделить крупные и среднезернистые тяжелые минералы свинца и цинка с относительно высокой эффективностью при минимальном количестве химических реагентов [7].

Анализ технологических схем, внедряемых на современных обогатительных предприятиях, свидетельствует о целесообразности применения гравитационной сепарации как одного из ключевых этапов комплексной переработки. Предварительное гравитационное обогащение позволяет эффективно отделять пустую породу, повышая содержание металлов в продуктах, направляемых на последующие стадии, и тем самым снижая общую нагрузку на флотационные оборудование [8], [9]. Особенно важно это при переработке руд, содержащих углеродсодержащие или глинистые примеси, оказывающие ингибирующее действие на процессы флотации.

Целью настоящего исследования является обоснование и экспериментальное подтверждение эффективности применения гравитационных методов обогащения на этапе предварительной подготовки труднообогатимых окислен-

ных свинцово-цинковых руд месторождения Коскудук. В рамках работы предполагается изучить минеральный и гранулометрический состав руд, оценить перерабатываемость в условиях высокой степени окисления, а также определить роль гравитационной сепарации в повышении селективности и технологической эффективности последующей флотации.

Материалы и методы

Объект исследования – проба окисленных свинцово-цинковых руд Коскудукского месторождения.

По результатам химического анализа, содержание свинца в исследуемой пробе варьируется в пределах 0,82–0,85%, цинка — 0,60–0,65%. Содержание меди составляет порядка 0,02%, что не представляет интереса с точки зрения промышленной переработки. Наряду с этим в составе руды установлено присутствие благородных компонентов: содержание золота составляет около 0,6 г/т, а серебра — 5,5 г/т, что придает дополнительную ценность сырью.

Фазовая характеристика подтверждает, что руда относится к окисленному типу. Основная масса свинца (до 82,9% отн.) находится в виде окисленных и силикатных форм. Цинк также преимущественно представлен в окисленном виде — до 87,7%. Железо содержится почти полностью в форме оксидов, при этом сульфидные формы встречаются в незначительных количествах (менее 0,05% абс.), что указывает на высокую степень окисления рудного вещества.

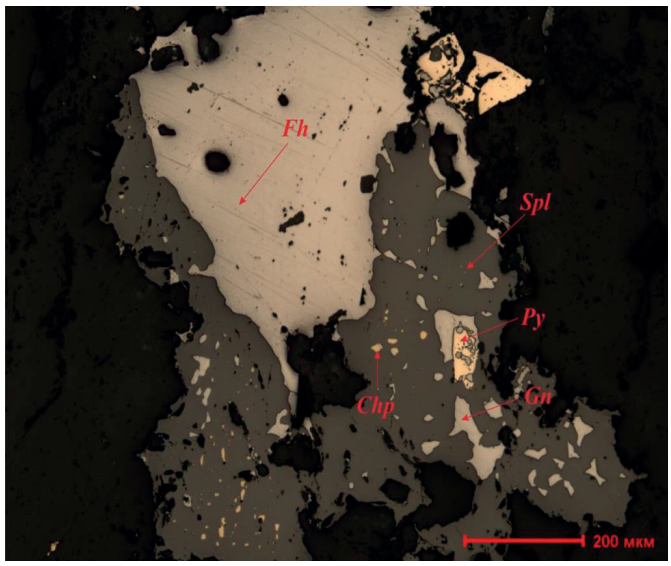
Минералогический состав окисленных свинцово-цинковых руд месторождения Коскудук отличается высокой сложностью: основными минералами являются гетит, гематит, халькопирит, сфалерит, галенит и ковеллин. Рудные минералы встречаются преимущественно в виде тонкой вкрапленности и замещенных структур, часто сопровождаемых мелкодисперсными шламами и глинистыми агрегатами. Размеры зерен колеблются в пределах 0,003–0,05 мм, а в ряде случаев снижаются до менее 5 мкм, что осложняет их раскрытие и извлечение традиционными методами флотации (рис. 1).

Таким образом, с учетом тонковкрапленной структуры руды, высокой степени окисления и различий в плотности минералов, гравитационные методы целесообразно применять в составе комбинированной схемы переработки труднообогатимых окисленных руд месторождения Коскудук.

Результаты и обсуждение

В рамках настоящего исследования были проведены лабораторные технологические испытания по гравитационному обогащению окисленной руды месторождения Коскудук с использованием виброцентробежного метода и концентрационного стола.

Эксперименты с применением виброцентробежного сепаратора СЦВ-4, разработанного Тульской горнорудной компанией, выполнялись при различных степенях измельчения руды. Режимы обогащения и схема испытаний представлены на рис. 2, а обобщенные результаты — в таблице 1. Дополнительно была исследована эффективность концентрации на лабораторном концентрационном столе СКЛ-2 (рис. 3), результаты приведены в таблице 3.



Chp – халькопирит; Py – пирит; Spl – сфалерит; Gn – галенит, Fh – блеклая руда

Рис. 1. Аншлиф. Характеристика включения минералов. Увел. 100.
Сурет 1. Жылтыратылған қима. Минералды қосындылардың сипаттамасы. Үлкейту 100.
Figure 1. Polished section. Characteristics of mineral inclusions. Magnification 100.

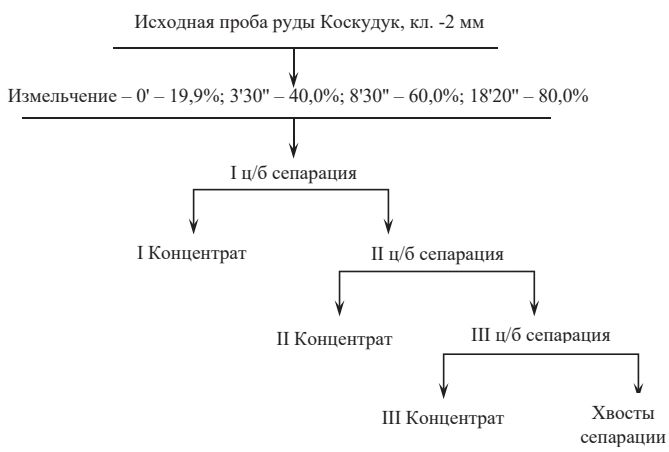


Рис. 2. Схема обогащения исходной пробы окисленной руды месторождения Коскудук, дробленой до -2,0 мм, на виброцентробежном сепараторе при разном времени измельчения.
Сурет 2. Қоскұдық кен орнының тотыққан рудасының бастапқы үлгісін -2,0 мм-ге дейін ұнтақталған діріл центрифугалық сепараторда әр түрлі ұнтақтау уақытында байыту схемасы.
Figure 2. Scheme of enrichment of the initial sample of oxidized ore from the Koskuduk deposit, crushed to -2.0 mm, in a vibratory centrifugal separator at different grinding times.

В целях количественной оценки влияния степени измельчения на эффективность гравитационного обогащения окисленных свинцово-цинковых руд место-

Таблица 1

Результаты обогащения исходной пробы окисленной руды месторождения Коскудук, дробленой до -2,0 мм, на виброцентробежном сепараторе при разном времени измельчения

Кесте 1

Қоскұдық кен орнының тотыққан кенінің бастапқы үлгісін -2,0 мм-ге дейін ұсақталған діріл центрден тепкіш сепараторда әр түрлі ұнтақтау уақытында байыту нәтижелері

Table 1

Results of enrichment of the initial sample of oxidized ore from the Koskuduk deposit, crushed to -2.0 mm, on a vibratory centrifugal separator at different grinding times

Наименование	Выход, %	Содержание, г/т*, %					Распределение, %				
		Pb	***Zn***	***Au****	***Ag****	***Fe***	***Pb***	***Zn***	***Au***	***Ag***	***Fe***
Опыт 1. Время измельчения О’; 19,9% кл. -0,074 мм											
I Концентрат ц/б	84,8	0,85	0,62	0,60	5,60	6,13	87,20	80,30	85,40	88,50	82,30
II Концентрат ц/б	1,2	0,71	0,58	1,11	5,30	5,17	1,00	1,10	2,20	1,20	1,00
∑ I и II к-т ц/б	**86**	**0,85**	**0,62**	**0,61**	**5,60**	**6,12**	**88,20**	**81,40**	**87,60**	**89,70**	**83,30**
III Концентрат ц/б	0,2	1,63	0,84	4,46	7,80	6,25	0,40	0,30	1,50	0,30	0,20
∑ концентрат ц/б	**86,2**	**0,85**	**0,62**	**0,62**	**5,60**	**6,12**	**88,60**	**81,70**	**89,10**	**90,00**	**83,50**
Хвосты ц/б	13,8	0,68	0,87	0,47	3,90	7,57	11,40	18,30	10,90	10,00	16,50
Исходная руда	100,0	0,83	0,65	0,60	5,37	6,32	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Опыт 2. Время измельчения 3.30’; 40,0% кл. -0,074 мм											
I Концентрат ц/б	17,8	2,40	0,84	1,30	14,30	6,07	50,30	23,20	37,90	47,40	17,20
II Концентрат ц/б	13,5	0,60	0,60	0,56	4,40	5,75	9,50	12,60	12,40	11,10	12,30
∑ I и II к-т ц/б	**31,3**	**1,62**	**0,74**	**0,98**	**10,03**	**5,93**	**59,80**	**35,80**	**50,30**	**58,50**	**29,50**
III Концентрат ц/б	15,3	0,35	0,50	0,41	2,70	5,40	6,30	11,90	10,30	7,70	13,10
∑ концентрат ц/б	**46,6**	**1,21**	**0,66**	**0,79**	**7,62**	**5,76**	**66,10**	**47,70**	**60,60**	**66,20**	**42,60**
Хвосты ц/б	53,4	0,54	0,63	0,45	3,40	6,77	33,90	52,30	39,40	33,80	57,40
Исходная руда	100,0	0,85	0,64	0,61	5,37	6,30	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Опыт 3. Время измельчения 8.30’; 60,0% кл. -0,074 мм											
I Концентрат ц/б	6,8	4,90	1,17	2,70	28,40	6,78	38,70	12,20	31,10	35,70	7,30
II Концентрат ц/б	6,3	1,10	0,77	0,90	7,80	5,89	8,00	7,50	9,60	9,10	5,90
∑ I и II к-т ц/б	**13,1**	**3,07**	**0,98**	**1,83**	**18,49**	**6,35**	**46,70**	**19,70**	**40,70**	**44,80**	**13,20**
III Концентрат ц/б	6,1	0,63	0,61	0,45	5,20	5,62	4,50	5,70	4,60	5,90	5,50
∑ концентрат ц/б	**19,2**	**2,30**	**0,86**	**1,39**	**14,27**	**6,12**	**51,20**	**25,40**	**45,30**	**50,70**	**18,70**
Хвосты ц/б	80,8	0,52	0,60	0,40	3,30	6,32	48,80	74,60	54,70	49,30	81,30
Исходная руда	100,0	0,86	0,65	0,59	5,41	6,28	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Опыт 4. Время измельчения 18.20’; 80,0% кл. -0,074 мм											
I Концентрат ц/б	5,5	4,32	1,04	2,40	25,30	6,30	28,40	8,90	22,80	25,70	5,50
II Концентрат ц/б	5,1	1,35	0,81	1,10	10,40	6,16	8,20	6,50	9,70	9,80	5,00
∑ I и II к-т ц/б	**10,6**	**2,89**	**0,93**	**1,77**	**18,12**	**6,23**	**36,60**	**15,40**	**32,50**	**35,50**	**10,50**
III Концентрат ц/б	3,5	0,89	0,74	0,58	6,00	5,95	3,80	4,10	3,60	4,00	3,30
∑ концентрат ц/б	**14,1**	**2,39**	**0,88**	**1,47**	**15,07**	**6,16**	**40,40**	**19,50**	**36,10**	**39,50**	**13,80**
Хвосты ц/б	85,9	0,58	0,60	0,43	3,80	6,35	59,60	80,50	63,90	60,50	86,20
Исходная руда	100,0	0,84	0,64	0,58	5,39	6,32	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

рождения Коскудук была применена методика планирования эксперимента с использованием модели Протодьяконова-Малышева. В качестве варьируемого фактора рассматривалась доля класса -0,074 мм в измельченной пробе, изменяемая в диапазоне от 19,9% до 80%. В качестве функции отклика принималось извлечение свинца в суммарный концентрат по результатам гравитационного обогащения на виброцентробежном сепараторе.

На основании нормированных данных построены аппроксимационные зависимости в виде обобщенных уравнений.

$$Y_{pb}(x) = 66,1 * (\frac{x}{40})^{-0.553} \text{ и } Y_{Zn}(x) = 47,7 * (\frac{x}{40})^{-1,055},$$

где x — степень измельчения (% класса -0,074 мм);

Y_{Pb}, Y_{Zn} — извлечение свинца и цинка соответственно, в процентах.

Таблица 2

Зависимость извлечения свинца и цинка от степени измельчения (данные нормированы по результату базового опыта при 40% класса -0,074 мм)

Кесте 2

Қорғасын мен мырыш экстракциясының ұнтақтау дәрежесіне тәуелділігі (40% кластағы негізгі тәжірибе нәтижесі бойынша нормаланған мәліметтер -0,074 мм)

Table 2

The dependence of lead and zinc extraction on the degree of grinding (data normalized according to the result of the basic experiment at 40% class -0.074 mm)

Степень измельчения (–0,074 мм), %	Извлечение ***Pb***, %	Извлечение ***Zn***, %	Нормированное извлечение ***Pb***	Нормированное извлечение ***Zn***
19,9	88,6	81,7	1,34	1,71
40,0 (базовый опыт)	66,1	47,7	1,00	1,00
60,0	51,2	25,4	0,77	0,53
80,0	40,4	19,5	0,61	0,41

Таблица 3

Результаты обогащения исходной пробы окисленной руды месторождения Коскудук, дробленой до -2,0 мм, на концентрационном столе при разном времени измельчения

Кесте 3

Қоскұдық кен орнының -2,0 мм-ге дейін ұсақталған тотыққан кенінің бастапқы үлгісін әр түрлі ұнтақтау уақытында концентрация үстелінде байыту нәтижелері

Table 3

Results of enrichment of the initial sample of oxidized ore from the Koskuduk deposit, crushed to -2.0 mm, on a concentration table at different grinding times

Наименование	Выход, %	Содержание, г/т*, %					Распределение, %				
		Pb	***Zn***	***Au****	***Ag****	***Fe***	***Pb***	***Zn***	***Au***	***Ag***	***Fe***
Опыт 1. Время измельчения 3’30’’; 40,0% кл. -0,074 мм											
Концентрат	2,00	9,78	2,20	7,90	67,30	9,93	24,10	6,80	26,00	25,1	3,20
Хвосты	98,00	0,63	0,62	0,46	4,10	6,23	75,90	93,20	74,00	74,9	96,80
Исходная руда	100,0	0,81	0,65	0,61	5,36	6,30	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Опыт 2. Время измельчения 8’30’’; 60,0% кл. -0,074 мм											
Концентрат	1,80	8,82	1,74	8,40	54,0	9,38	19,40	4,80	24,30	18,00	2,70
Хвосты	98,20	0,67	0,63	0,48	4,50	6,23	80,60	95,20	75,70	82,00	97,30
Исходная руда	100,0	0,82	0,65	0,62	5,39	6,29	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Опыт 3. Время измельчения 18’20’’; 80,0% кл. -0,074 мм											
Концентрат	1,00	7,68	1,45	10,20	46,6	8,94	9,40	2,20	17,10	8,80	1,40
Хвосты	99,00	0,75	0,64	0,50	4,90	6,28	90,60	97,80	82,90	91,20	98,60
Исходная руда	100,0	0,82	0,65	0,60	5,32	6,31	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Анализ показывает, что оба компонента демонстрируют снижение извлечения при повышенной степени измельчения, однако чувствительность процесса по отношению к цинку значительно выше (показатель степени $\alpha Zn \approx -1,06$ по отношению к $\alpha Pb \approx -0,55$). Это указывает на необходимость строго контроля тонкости помола с целью минимизации шламовых потерь и оптимизации параметров гравитационного обогащения.

С учетом полученных результатов дополнительно были проведены испытания по обесшламливанию измельченной до -2 мм пробы руды с использованием лабораторного гидроциклона. Массовая доля выделенных шламов составила 8,3%, однако потери с ними ценных компонентов оказались значительными: свинец — 6,8%, цинк — 12,1%, золото — 3,7%, серебро — 5,0%. Концентрации металлов в шламовой фракции остаются выше фоновых значений, что исключает возможность ее отвального хранения и свидетельствует о необходимости включения шламов в дальнейшую переработку.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что применение гравитационного обогащения и обесшламливания для исследуемой руды является ограниченно эффективным. Основными препятствующими факторами являются высокая степень тонкости вкра-

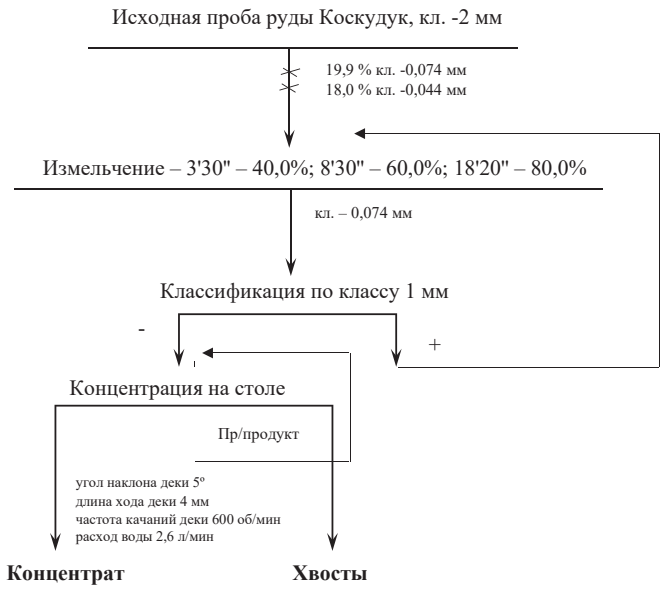


Рис. 3. Схема обогащения исходной пробы окисленной руды месторождения Коскудук, дробленой до -2,0 мм, на концентрационном столе при разном времени измельчения.
Сурет 3. Қоскұдық кен орнының -2,0 мм-ге дейін ұсақталған тотыққан рудасының бастапқы үлгісін әр түрлі ұнтақтау уақытында концентрация үстелінде байыту схемасы.
Figure 3. Scheme of enrichment of the initial sample of oxidized ore from the Koskuduk deposit, crushed to -2.0 mm, on a concentration table at different grinding times.

пленности, склонность руды к образованию шламов при измельчении, а также невозможность эффективного выделения ценных минералов по плотности. В этой связи переработка окисленной руды Коскудука требует альтернативных подходов, в первую очередь — флотационных технологий, адаптированных к условиям повышенного содержания глинистых компонентов и высоко окисленных форм свинца и цинка.

Заключение

Проведенные исследования продемонстрировали наличие существенных технологических ограничений при применении гравитационных методов для переработки окисленных свинцово-цинковых руд Коскудукского месторождения. Эти ограничения обусловлены тонкодисперсной вкрапленностью рудных компонентов, высокой степенью окисления минералов, а также интенсивным образованием шламов в процессе измельчения.

Результаты опытов по обесшламливанию показали значительные потери ценных металлов со шламовой фракцией, что исключает возможность ее утилизации в качестве отвального продукта и указывает на необходимость включения дополнительных этапов обогащения.

Установленные особенности поведения минералов в условиях гравитационного разделения подтверждают неэффективность самостоятельного применения данного метода. Таким образом, дальнейшие направления технологического совершенствования переработки руд месторождения Коскудук следует связывать с разработкой интегрированных схем, основанных на флотационных процессах с предварительной сульфидизацией окисленных минералов. Дополнительное внимание должно быть уделено оптимизации состава и режимов подачи реагентов, а также проработке решений по возврату ценных компонентов из шламов, что в совокупности позволит повысить общую эффективность и рентабельность переработки.

Благодарность

Данная статья написана по результатам исследований в рамках грантового проекта № AP23489765. Руководитель проекта, доктор Ph.D, ассоц. профессор А. Р. Мамбеталиева. Проект финансировался при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Nayak A., Jena M. S., Mandre N. R. Обогащение свинцово-цинковых руд — обзор // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2021. – Т. 42 (5). – С. 564–583 (на английском языке)*
2. *Термодинамическое и экспериментальное обоснование переработки цинково-свинцовых руд / V. Shevko [и др.] // Minerals. – 2023. – Т. 13 (5). – С. 819 (на английском языке)*
3. *Переработка окисленной свинцово-цинковой руды путем совместного обжига с пиритсодержащей рудой / I. G. Antropova [и др.] // Minerals. – 2024. – Т. 14 (12). – Ст. 1241 (на английском языке)*
4. *Yuangan Chen, Yongsheng Sun, Yuexin Han. Эффективное флотационное разделение свинцово-цинковых оксидных руд с использованием технологий переработки минералов // Green and Smart Mining Engineering. – 2024. – Т. 2. – С. 175–189 (на английском языке)*
5. *Исследование флотационного извлечения типичной углеродсодержащей свинцово-цинковой сульфидной руды в провинции Гуйчжоу с предварительной декарбонизацией. / Guanghui Li [и др.] // Chemie der Erde. – 2024. – Т. 84 (1). – Ст. 126096 (на английском языке)*
6. *Технология флотации руды оксида цинка с использованием тройного амина в режиме открытого контура / Zhiwei Li [и др.] // Minerals. – 2024. – Т. 14 (9). – С. 902 (на английском языке)*
7. *Göktepe F. Обработка отходов свинцового рудника с помощью многогравитационного сепаратора Mozley (MGS) // Journal of Environmental Management. – 2005. – Т. 76 (4). – С. 277–281 (на английском языке)*
8. *Исследование гравитационной предварительной обработки тугоплавкой золотосодержащей руды из месторождения Актобе / M. B. Barmenshinova [и др.] // Eurasian Mining. – 2024. – Т. 41 (1). – С. 11–14 (на английском языке)*
9. *Подтверждение гравитационной концентрации свинцово-цинковой руды месторождения Шалкия / S. A. Telkov [и др.] // Journal of Mining Science. – 2019. – Т. 3. – С. 430–436 (на английском языке)*
10. *Исследование изменений окислительно-восстановительного потенциала при обогащении окисленных полиметаллических руд / A. Mambetaliyeva [и др.] // Appl. Sci. – 2025. – Т. 15. – Ст. 6091 (на английском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Nayak A., Jena M. S., Mandre N. R. Қорғасын-мырыш кендерін байыту — шолу // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2021. – Т. 42 (5). – Б. 564–583 (ағылшын тілінде)*
2. *Мырыш-қорғасын кендерін өңдеудің термодинамикалық және эксперименттік негіздемесі / V. Shevko [және т. б.] // Minerals. – 2023. – Т. 13 (5). – Б. 819 (ағылшын тілінде)*
3. *Тотыққан қорғасын-мырыш кенін пирит бар рудамен бірге күйдіру арқылы өңдеу / I. G. Antropova [және т. б.] // Minerals. – 2024. – Т. 14 (12). – 1241 (ағылшын тілінде)*
4. *Yuangan Chen, Yongsheng Sun, Yuexin Han. Минералды өңдеу технологияларын қолдану арқылы қорғасын-мырыш оксиді кендерін тиімді флотациялық бөлу // Green and Smart Mining Engineering. – 2024. – Т. 2. – Б. 175–189 (ағылшын тілінде)*
5. *Гуйчжоу провинциясындағы типтік көміртекті қорғасын-мырыш сульфидті кенді алдын ала декарбонизациялау арқылы флотациялық қалпына келтіруді зерттеу / Guanghui Li [және т. б.] // Chemie der Erde. – 2024. – Т. 84 (1). – 126096 (ағылшын тілінде)*
6. *Ашық контурлы үш амин мырыш оксиді флотациялау технологиясы / Zhiwei Li [және т. б.] // Minerals. – 2024. – Т. 14 (9). – Б. 902 (ағылшын тілінде)*
7. *Göktepe F. Қорғасын кенішінің қалдықтарын Mozley көп гравитациялық сепараторымен (MGS) өңдеу // Journal of Environmental Management. – 2005. – Т. 76 (4). – Б. 277–281 (ағылшын тілінде)*
8. *Ақтөбе кен орнының құрамында алтыны бар кенді гравитациялық алдын ала өңдеуді зерттеу / M. B. Barmenshinova [және т. б.] // Eurasian Mining. – 2024. – Т. 41 (1). – Б. 11–14 (ағылшын тілінде)*
9. *Шалқия кен орнындағы қорғасын-мырыш кенінің гравитациялық концентрациясын растау / S. A. Telkov [және т. б.] // Journal of Mining Science. – 2019. – Т. 3. – Б. 430–436 (ағылшын тілінде)*
10. *Тотыққан полиметалл кендерін байыту кезінде тотығу-тотықсыздану потенциалының өзгеруін зерттеу / A. Mambetaliyeva [және т. б.] // Appl. Sci. – 2025. – Т. 15. – 6091 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. *Aryasuta Nayak M. S. Jena N. R. Mandre. Beneficiation of lead-zinc ores — a review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2021. – Vol. 42 (5). – P. 564–583 (in English)*
2. *Thermodynamic and experimental substantiation of processing zinc-lead ores / Shevko Victor et al. // Minerals. – 2023. – Vol. 13 (5). – P. 819 (in English)*
3. *Processing of Oxidized Lead-Zinc Ore by Co-Roasting with Pyrite-Bearing Ore / I. G. Antropova et al. // Minerals. – 2024. – Vol. 14 (12). – Article 1241 (in English)*
4. *Yuangan Chen, Yongsheng Sun, Yuexin Han. Efficient flotation separation of lead-zinc oxide ores using mineral processing techniques // Green and Smart Mining Engineering. – 2024. – Vol. 2. – P. 175–189 (in English)*
5. *Study on flotation recovery of typical carbon-bearing lead-zinc sulphide ore in guizhou with pre-decarbonization / Guanghui Li et al. // Chemie der Erde. – 2024. – Vol. 84 (1). – Article 126096 (in English)*
6. *Open-circuit technology of zinc oxide ore flotation with ternary amine / Zhiwei Li et al. // Minerals. – 2024. – Vol. 14 (9). – P. 902 (in English)*
7. *Göktepe F. Treatment of lead mine waste by a Mozley multi-gravity separator (MGS) // Journal of Environmental Management. – 2005. – Vol. 76 (4). – P. 277–281 (in English)*
8. *Study of gravity pretreatment of refractory gold-bearing ore from Aktobe deposit / M. B. Barmenshinova et al. // Eurasian Mining. – 2024. – Vol. 41 (1). – P. 11–14 (in English)*
9. *Substantiation of gravity concentration to the Shalkiya deposit lead-zinc ore / Sh. A. Telkov et al. // Journal of Mining Sciences. – 2019. – Vol. 3. – P. 430–436 (in English)*
10. *Study of oxidative–reductive potential changes in the enrichment of oxidized polymetallic ores / A. Mambetaliyeva et al. // Appl. Sci. – 2025. – Vol. 15. – Article 6091 (in English)*

Информация об авторах:

Мамбеталиева А. Р., доктор Ph.D, ассоц. профессор кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), *a.mambetaliyeva@satbayev.university;* https://orcid.org/0000-0003-1536-5259

Танабаева А. Ж., *докторант кафедры* «Металлургия и обогащение полезных ископаемых» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), *i_love_mamy@bk.ru;* https://orcid.org/0000-0003-4992-5138

Карабалаев Т. А., магистрант кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), *talgatkarabalaev@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0002-4050-0993

Морозов Ю. П., доктор техн. наук, профессор кафедры «Обогащение полезных ископаемых», Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург, Россия), *tails2002@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0003-0554-5176

Авторлар туралы мәліметтер:

Мамбеталиева А. Р., Ph.D докторы, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының қауымдастырылған профессоры Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Танабаева А. Ж., «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының докторанты Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Карабалаев Т. А., «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының магистранты Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Морозов Ю. П., техника ғылымдарының докторы, «Пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының профессоры, Орал мемлекеттік тау-кен университеті (Екатеринбург қ., Ресей)

Information about the authors:

Mambetaliyeva A. R., Ph.D, Associate Professor at the Department of Metallurgy and Mineral Processing at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Tanabaeva A. Zh., doctoral student of the Department of Metallurgy and Mineral Processing at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Karabalaev T. A., Master's student of the Department of Metallurgy and Mineral Processing at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Morozov Yu. P., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University (USMU) (Yekaterinburg, Russia)

Код МРНТИ 52.31.61

Г. Ю. Абдугалиева[1,2], А. О. Орсаринова[3], *С. О. Хусаинова[4,5], Т. Ж. Саукен[5]
[1] Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен-металлургия институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан),
[2]Д. А. Қонаев атындағы Тау-кен істері институты (Алматы қ., Қазақстан),
[3]С. Аманжолав атындағы Шығыс Қазақстан университеті (Өскемен қ., Қазақстан),
[4]әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы қ., Қазақстан),
[5]«Жоғары технологиялар институты» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

УРАНДЫ ЖЕРАСТЫ ҰҢҒЫМАЛЫҚ СІЛТІЛЕУ ӘДІСІМЕН ӨНДІРУ КЕЗІНДЕГІ АПАТТЫҚ ЖАҒДАЙЛАРДЫ СЦЕНАРИЙЛІК ТАЛДАУ

Аңдатпа. Жұмыста уранды жер асты ұңғымалық сілтілеу әдісімен өндіру кезіндегі өнеркәсіптік қауіпсіздікке талдау жасалып, апаттық жағдайларды сценарийлік модельдеуге ерекше назар аударылды. Жүйелік талдау негізінде қауіпті өндірістік үдерістер мен инфрақұрылымның сыни факторлары айқындалды. Апаттық жағдайлардың себептерін, даму механизмдерін және олардың салдарын сипаттауға мүмкіндік беретін сценарийлік-бағдарланған әдіс қолданылды. Апаттық жағдайларды ықтималдылығы, салдарының ауырлығы, тәуекел деңгейі бойынша бағалау үшін сараптама негізінде тәуекелдер матрицасы құрастырылды. Ең жоғары қауіп төндіретін үдерістер ретінде ерітінділерді айдау-шығару және тасымалдау операциялары нақтыланды. Тәуекелдерді төмендету және қауіпсіздікті арттыру бойынша ұсыныстар берілді.
Түйінді сөздер: *уран өндіру, жер асты ұңғымалық сілтілеу, өнеркәсіптік қауіпсіздік, апат сценарийлері, тәуекелдерді бағалау, қауіпті үдерістер.*

Scenario analysis of accidents in uranium mining by in-situ leaching method

Abstract. This paper presents an analysis of industrial safety in uranium mining using the in-situ leaching method, with a focus on scenario-based modeling of accident situations. Based on a systems approach, key hazardous production processes and critical infrastructure elements are identified. A scenario-oriented method is applied, enabling the description of the causes, development mechanisms, and consequences of accidents. A risk matrix is developed using expert judgment to classify hazards according to their likelihood and severity of consequences. It is established that the most hazardous processes are solution injection and transportation operations. Measures aimed at risk reduction and safety enhancement are proposed.
Keywords: *uranium mining, in-situ leaching, industrial safety, accident scenarios, risk assessment, hazardous processes.*

Сценарный анализ аварийных ситуаций при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания

Аннотация. В работе представлен анализ промышленной безопасности при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания с акцентом на сценарное моделирование аварийных ситуаций. На основе системного подхода идентифицированы ключевые опасные производственные процессы и критические факторы инфраструктуры. Применен сценарно-ориентированный метод, позволяющий описать причины, механизмы развития аварий и их последствия. Составлена матрица риска с использованием экспертных оценок для классификации опасностей по вероятности и тяжести последствий. Установлено, что наиболее опасными являются процессы закачки-откачки и транспортировки растворов. Предложены меры по снижению рисков и повышению безопасности.
Ключевые слова: *добыча урана, подземное скважинное выщелачивание, промышленная безопасность, сценарии аварий, оценка риска, опасные процессы.*

Кіріспе

Жер асты ұңғымалық сілтілеу (ЖҰС) әдісі қолайлы гидрогеологиялық жағдайлары бар елдерде, соның ішінде Қазақстанда, уран өндірудің басым тәсілі болып табылады. Аталған технология өнімді қабатқа сілтілеуші ерітінділерді енгізу және кейіннен уранқұрамды ерітіндіні жер бетіне шығарып алу қағидатына негізделген [1, 2].

Өнеркәсіптік қауіпсіздік тұрғысынан ЖҰС пайдалы қазбаларды шахталық өндіру әдісімен салыстырғанда неғұрлым қауіпсіз болып саналады, себебі:

- *тау-кен қазбалары және оларға байланысты опырылулар болмайды;*
- *шаң түзілуі мен аэрозольдердің пайда болуы төмендейді;*
- *жұмысшылардың кенмен тікелей жанасуы барынша азаяды [3, 4].*

Алайда қазіргі зерттеулер қауіпті өндірістік факторлардың сақталатынын және олардың химиялық, радиациялық және гидрогеологиялық үдерістермен байланысты өзіндік ерекшеліктері бар екенін көрсетеді [5, 6, 7].

Осыған байланысты, зерттеудің мақсаты уранды жер асты ұңғымалық сілтілеу әдісімен өндіру кезіндегі өнеркәсіптік қауіпсіздікті талдауда сценарийлік-бағдарланған әдістемені қолдану арқылы ықтимал апаттық жағдайлардың дамуының себеп-салдарлық байланыстарын анықтау болып табылады. Бұл әдістің тәуекелдерді бағалаудың дәстүрлі әдістерінен айырмашылығы — апаттардың даму динамикасын және олардың технологиялық үдерістерде каскадты түрде таралу мүмкіндігін ескереді.

Зерттеу әдістері

ЖҰС әдісімен уран өндіретін кәсіпорындардағы басым тәуекелдерді анықтауда қауіпті өндірістік факторларды бағалаудың жүйелік талдауы тиімді болып табылады [8, 9]. Жүйелік талдау уран өндіруші кәсіпорынды геологиялық орта, технологиялық үдерістер, жабдықтар, персонал және қоршаған орта компоненттерін қамтитын интеграцияланған өндірістік-технологиялық жүйе ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Жер асты ұңғымалық сілтілеу әдісін қолданатын уран кеніштерінің қауіпті өндірістік объектілерге жататынын ескере отырып [10, 11, 12], уран өндірудегі қауіпті үдерістерді сәйкестендіру үшін ЖҰС технологиялық циклінің келесі негізгі үдерістері қарастырылды [7]:

- *ұңғымаларды бұрғылау және жабдықтау;*
- *сілтілеуші ерітінділерді айдау және тасымалдау;*
- *өнімді ерітінділерді шығару және тасымалдау;*
- *сорбция-десорбция үдерістері;*
- *күкірт қышқылын сақтау және онымен жұмыс істеу;*
- *жанар-жағармай материалдарымен жұмыс істеу.*

МемСТ 12.0.003-74 бойынша қауіпті және зиянды өндірістік факторларды жіктеу негізінде уран кеніштерінде келесі қауіпті өндірістік факторлар сәйкестендірілді (1-кесте) [12].

1-кестеде келтірілген уран өндірудегі сәйкестірілген қауіпті өндірістік үдерістерді орындау барысында орын алатын апаттардың туындау ықтималдығын сипаттау үшін сценарийлік-бағдарланған әдістемені қолдану негізінде

Кесте 1

Уран кеніштеріндегі қауіпті үдерістер мен нысандарды сәйкестендіру

Table 1

Identification of hazardous processes and facilities at uranium mines

Таблица 1

Идентификация опасных процессов и объектов на урановых рудниках

№	Айқындалған қауіпті өндірістік үдерістер мен нысандар тізбесі	Қауіпті заттар мен факторлардың атауы	Үдерісті және нысанды қауіптілік тізбесіне енгізу туралы мәліметтер
1	Ұңғымаларды бұрғылау	Қауіпті жабдық: машиналар мен механизмдердің айналмалы және қозғалмалы бөліктері, жабдықтың құлау қаупі	Қауіпті технологиялық үдеріс
2	Қышқылды ерітінділерді қысыммен айдау және тасымалдау	0,07 МПа-дан жоғары қысымда жұмыс істейтін жабдықты пайдалану; күкірт қышқылы (жоғары белсенді сорбент)	Қауіпті технологиялық үдеріс, химиялық қауіпті зат
3	Өнімді ерітіндіні шығару және тасымалдау	Радиоактивті-химиялық қауіпті ерітінді (құрамында уран, радий, торий, мышьяк, ванадий және т.б.)	Қауіпті технологиялық үдеріс, химиялық қауіпті зат
4	Сорбциялық-экстракциялық үдерістер	Жоғары белсенді сорбенттер; қыздырылған ерітінділер; концентраттардың шығу қаупі	Радиациялық белсенділік; қауіпті технологиялық үдеріс, қауіпті зат
5	Күкірт қышқылын сақтау, тасымалдау және пайдалану	Күкірт қышқылы, улы аэрозольдер	Қауіпті технологиялық үдеріс, қауіпті зат
6	Жанар-жағармай (ЖЖМ) қоймасы	Жанғыш заттар мен жанар-жағармайды жеткізу, сақтау және пайдалану; жанармай құю колонкасы	Қауіпті технологиялық үдеріс, қауіпті жабдық

апаттардың себептерін, даму механизмдерін және олардың салдарын айқындау қажет. Әрбір апаттың сценарийі келесі элементтерді қамтиды:

- *себепші фактор;*
- *технологиялық параметрлердің ауытқуы;*
- *бақылау жүйелерінің істен шығуы;*
- *эскалация кезеңі;*
- *салдарлар.*

Айқындалған қауіпті өндірістік үдерістердегі ықтимал апаттарды (1-кесте) пайда болу ықтималдығы мен олардың салдарының ауырлығы бойынша бағалау сараптамалық әдіс арқылы тәуекелдер матрицасын жасау негізінде жүргізілді. Бұл матрицада қауіпті үдерістердегі ықтимал апаттық жағдайлар келесі критерийлермен бағаланды:

- *ықтималдылық (төмен, орташа, жоғары);*
- *салдардың ауырлығы (1–3);*
- *тәуекел деңгейі.*

Нәтижелер және талқылау

Айқындалған қауіпті өндірістік үдерістер мен нысандарға (1-кесте) сәйкес туындайтын ықтимал апаттық жағдайлар және олардың дамуының сценарийлерін қарастырылды:

1) Ұңғымаларды бұрғылау кезіндегі ықтимал апаттық жағдайлар

Себепші факторлар: қысым теңгерімінің бұзылуы, газдың (CO_2, радон) келуі, жабдықтың істен шығуы.

Сценарийдің дамуы: қысымның артуы немесе шығынның өзгеруі → автоматты қорғаныс жүйесінің істен шығуы → қабаттық флюидтердің келуі → ұңғыма сағасынан шығарындылардың орын алуы → жабдықтың зақымдануы және ықтимал тұтану.

Салдарлары: газдар мен сұйықтықтардың шығарындылары, персоналға әсері (жарақаттану), өрт қаупі.

2) Ерітінділерді қысыммен айдау кезіндегі ықтимал апаттық жағдайлар

Себепші факторлар: реттегіштің бітелуі немесе істен шығуы; коррозия, механикалық зақымдану және тозу салдарынан құбыр учаскесінің жарылуы; арматураның бұзылуы (жапқыштардың, қамыттардың ажырауы).

Ықтимал апаттық жағдайдың даму сценарийі: қысымның артуы → автоматтың істен шығуы → құбырдың жарылуы → қышқылдың төгілуі → топыраққа және жер асты суларына енуі.

Салдарлары: химиялық күйіктер, топырақтың деградациясы, жер асты суларының ластануы.

3) Өнімді ерітіндіні сорып шығару және тасымалдау кезіндегі ықтимал апаттық жағдайлар

Себепші факторлар: коррозия, механикалық зақымданулар.

Ықтимал апаттық жағдайдың даму сценарийі: сыртқа ағып кетудің пайда болуы → қысымның төмендеуі → ұзақ уақыт байқалмайтын ағып кету → радионуклидтердің жинақталуы → ластанған шлейфтің қалыптасуы.

Салдарлары:

- *сыртқы төгілу кезінде — аумақтың жергілікті ластануы;*
- *жерасты ағып кету кезінде — жерасты суларының ластануы;*

- үлкен көлемді шығарындылар кезінде — радионуклидтердің жинақталуы және дезактивация жүргізу қажеттілігі.

4) Сорбциялық-экстракциялық үдерістер кезіндегі ықтимал апаттық жағдайлар (радиациялық белсенділік)

Себепші фактор — колонналардың бітелуі.

Ықтимал апаттық жағдайдың даму сценарийі: қысымның артуы → жабдықтың бұзылуы → концентрацияланған ерітіндінің шығарындылары → жергілікті ластану.

Салдарлары: радиациялық әсердің артуы, жұмыс аймағының ластануы.

5) Күкірт қышқылын сақтау және пайдалану кезіндегі ықтимал апаттық жағдайлар

Себепші факторлар: коррозия, оператор қателігі.

Ықтимал апаттық жағдайдың даму сценарийі: резервуардың герметикалығының бұзылуы немесе артық толуы→ қышқылдың төгілуі → аэрозольдердің түзілуі → ластанудың таралуы.

Салдарлары: химиялық күйіктер, ауаның ластануы, инфрақұрылымның зақымдануы.

6) Жанар-жағармай қоймаларында және жанармай құю станцияларындағы ықтимал апаттық жағдайлар

Себепші факторлар: жанар-жағармай материалдарын сақтау ережелерінің бұзылуы, жанармай құю кезінде ЖЖМ-нің жер бетіне төгілуі.

Апаттық жағдайдың даму сценарийі: қауіпсіздік ережелерін бұзу → жанармайдың төгілуі → тұтану → өрт.

Салдарлары: қайталама жарылыстар, термиялық күйіктер, материалдық шығын.

Жоғарыда қарастырылған ықтимал апаттардың туындауы мен дамуын ескере отырып, уранды ЖҰС әдісімен өндіру кезіндегі апаттық жағдайларды сценарийлік блок-схема түрінде көрсетуге болады (1-сурет).

Ұсынылған блок-схема (1-сурет) ЖҰС жүйелеріндегі апаттық жағдайлардың дамуының механизмін бейнелейді және болжаудың цифрлық модельдерін, сондай-ақ ерте ескерту жүйелерін әзірлеу үшін негіз ретінде пайдаланылуы мүмкін.

1-суретте көрсетілген ЖҰС әдісімен уран өндіру кезіндегі негізгі ықтимал апаттық жағдайлардың сценарийлік талдауы олардың пайда болуының ең негізгі алғышарттарының туындауының келесідей басты себептерін анықтауға мүмкіндік береді:

- жабдықтар мен техникалық құрылғылардың істен шығуы және ақаулары;

- персоналдың қате әрекеттері.

Технологиялық жабдықтардың істен шығуы мен ақаулары келесі факторларға байланысты орын алады:

- жабдықты дұрыс пайдаланбау немесе оның ақаулы күйі;

- жабдықтың апаттық жұмыс режимі;

- техникалық қызмет көрсету (ТҚ) және жоспарлы-алдын алу жөндеу (ЖАЖ) кестелерінің сақталмауы;

- жабдықтың зауыттық ақаулары;

- коррозия, физикалық тозу немесе температуралық деформация;

- бақылау-өлшеу аспаптары мен автомат жүйелерінің ақаулары;



Сурет 1. Уранды жер асты ұңғымалық сілтілеу әдісімен өндіру кезіндегі апаттардың даму сценарийінің блок-схемасы.
Figure 1. Flowchart of accident scenario development in uranium extraction by in-situ leaching.
Рис. 1. Блок-схема сценария развития аварий при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания.

- күкірт қышқылымен және жанар-жағармай материалдарымен жұмыс істеу кезінде жабдықтардың, құбырлардың және бекітпе арматураның герметикалығының бұзылуы.

Персоналдың қате әрекеттері келесі себептерге байланысты орын алады:

- операторлардың қателіктері (айдау параметрлерін дұрыс орнатпау (қысым, pH), желілерді шатастыру (айдау/шығару));

- қоршаған ортаны жеткіліксіз мониторингтік бақылау (әлсіз бақылау, кеш әрекет ету, жерасты сулары сапасын уақтылы бақыламау);

- радиациялық қауіпсіздік талаптарын бұзу (дозиметриялық бақылаудың толық жүргізілмеуі, экрандау немесе герметизацияның болмауы);

- қолданыстағы қауіпсіздік ережелерінің, технологиялық регламенттердің, нұсқаулықтар мен еңбекті қорғау, қауіпсіздік техникасы, техникалық пайдалану, өрт қауіпсіздігі бойынша нормативтік құжаттардың талаптарын сақтамау, олар жабдықтардың, қондырғылар мен механизмдердің қауіпсіз және апатсыз жұмысын реттейді;

- қауіпті өндірістерге, жабдықтар мен механизмдерге қызмет көрсетуге оқытылмаған, аттестатциядан өтпеген персоналды жіберу;

Кесте 2

Тәуекелдер матрицасы

Table 2

Risk Matrix

Таблица 2

Матрица риска

Үдеріс	Ықтималдылық*	Ауырлық*	Тәуекел деңгейі
Сілтілеу ерітінділерді айдау және тасымалдау (төгілу, ағып кету)	С	3	Жоғары
Өнімді ерітінділерді шығару және тасымалдау (төгілу, ағып кету)	С	3	Жоғары
Сорбциялық-экстракциялық үдерістер	Н/С	3	Орташа-жоғары
Күкірт қышқылын сақтау	С	2	Орташа
Ерітінділердің миграциясы	Н	3	Орташа-жоғары
Шкала: *Ықтималдылық: Н — төмен, С — орташа, В — жоғары *Ауырлық: 1 — төмен, 2 — орташа, 3 — жоғары			

- жабдықтарды жөндеу және демонтаждау бойынша регламенттердің бұзылуы (механикалық зақымданулар, дәнекерлеу-құрастыру жұмыстарының ақаулары);

- орындалатын функцияларға біліктіліктің сәйкес келмеуі, инженерлік-техникалық қызметкерлердің жеткіліксіз құзыреттілігі.

2-кестеде айқындалған қауіпті өндірістік үдерістердің сараптамалық бағалау әдісі негізінде құрастырылған тәуекелдер матрицасы келтірілген.

Тәуекелдер матрицасы (2-кесте) қауіпті технологиялық үдерістердің ең сыни санаттарына келесі үдерістердің жататынын көрсетеді:

- сілтілеуші ерітінділерді айдау және тасымалдау;

- өнімді ерітінділерді шығару және тасымалдау.

Аталған үдерістер жоғары ықтималдылықпен, ауыр салдарлармен және апаттардың каскадты түрде даму мүмкіндігімен сипатталады.

Қорытынды

Жүргізілген сараптамалық зерттеу нәтижесінде уран кенорындарын жер асты ұңғымалық сілтілеу әдісімен өндірудің қауіпсіздігі химиялық, радиациялық және гидрогеологиялық факторлардың әсерімен шартталған күрделі, көпқұрамды тәуекелдермен сипатталатыны нақтыланды. Ұсынылған сценарийлік тәсіл апаттық жағдайлардың дамуының себеп-салдарлық байланыстарын анықтауға, олардың каскадты сипатын бағалауға және өнеркәсіптік қауіпсіздікті басқарудың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Әзірленген типтік апат сценарийлерінің құрылымданған схемасы қауіпсіздікті мониторингтеуде және тәуекелдерді басқару тиімділігін арттыру үшін негіз болады.

Уран өндірісіндегі ең қауіпті үдеріске жататын технологиялық ерітінділерді айдау-шығару және тасымалдаудың негізгі операциялары сарапталып, оларды орындау кезінде өнеркәсіптік және экологиялық қауіпсіздікті арттырудың келесі шаралары ұсынылады:

- нақты уақыт режиміндегі мониторинг жүйелерін енгізу;

- ұңғымалардың герметикалығын арттыру;

- құбырлардың коррозияға және тозуға төзімділігін күшейту үшін коррозияға қарсы материалдарды қолдану;

- ұңғымаларды мониторингтеуді автоматтандыру;

- гидрогеологиялық модельдеуді енгізу;

- барлық деңгейлерде персоналды жүйелі оқыту және аттестатциялау.

Тәуекелдерді төмендету мақсатында ұсынылған бұл шаралар уран өндірісіндегі ауытқуларды алдын-ала анықтауға, апаттардың эскалациясын болдырмауға және заманауи мониторинг пен басқару жүйелерін енгізуге бағытталған.

Уран кенорындарын ЖҰС әдісімен игеруде өндірістік үдерістердің апаттық қауіптілігін бағалауда қолданылған сценарлық талдау тәсілі уран өндіруші кәсіпорындарда өнеркәсіптік қауіпсіздік жүйелерін жетілдіру үшін әдіснамалық негіз болады және еңбекті қорғау мен қауіпсіздікті басқарудың халықаралық стандарттарының (ISO 45001) талаптарын сақтауға бағытталған.

Зерттеу нәтижелері өндірістік үдерістердің қауіпсіздігін арттыру және экологиялық тәуекелдерді төмендету арқылы БҰҰ-ның ТДМ 3 («Жақсы денсаулық және әл-ауқат») және ТДМ 12 («Жауапты тұтыну және өндіріс») қол жеткізуге ықпал етеді.

ПАЙДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Li G., Yao J. Уран өндіруде жер асты шаймалау (ISL) әдісіне шолу // Mining. – 2024. – Т. 4. № 1. – Б. 120–148 (ағылшын тілінде)*
2. *Төмен өткізгішті уран кенінен уранды электркинетикалық жер асты сілтілеу әдісімен алу / С. Li [және т. б.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2025. – Т. 57. – №. 2. – 103212 (ағылшын тілінде)*

3. *Abriol J. P. Сілтілеу теориясы және практикасы // Вайнхайм: Wiley-VCH, 2017. – Б. 329–345 (ағылшын тілінде)*
4. *Уранды жер асты әдісімен өндіру әсеріне ұшыраған сулы қабаттарды қалпына келтіру стратегияларын салыстыруға арналған реактивті тасымалдауды модельдеу құралы / N. Seigneur [және т. б.] // Journal of Contaminant Hydrology. – 2024. – Т. 265. – 104392 (ағылшын тілінде)*
5. *Mussayeva E., Bakhtin M., Kurbanova A. Уранды жер асты сілтілеу әдісімен өндірудің қоршаған ортаға әсері: шолу // Environments. – 2026. – Т. 13. – № 7. – 366 (ағылшын тілінде)*
6. *Barnes R. I. Пайдалы қазбаларды ұңғымалық шаймалау әдісімен жерасты өндіру // Шам: Springer, 2019. – Б. 233–249 (ағылшын тілінде)*
7. *Ковалева О. С. Уран өндіру әдістерінің қауіпсіздігін бағалау: монография. – Томск: ТПУ баспасы, 2020. – 164 б. (орыс тілінде)*
8. *Manaa E. S. A., Mahmoud S. A. E., Awny E. Египет. Орталық Шығыс шөлі. Қызыл теңіз жағалауындағы Ochre-Umm Greifat кенінен уранды селективті сілтілеу және бөлу // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2024. – Т. 41. – P. 2579–2588 (ағылшын тілінде)*
9. *Mwetulundila A.-L., Atangana A. Кеңістіктік біртекті емес тегеурінді сулы қабаттағы уранды жер асты сілтілеу кезіндегі ластаушы заттардың тасымалдануын сандық модельдеу // Modeling Earth Systems and Environment. – 2025. – Т. 11. – 316 (ағылшын тілінде)*
10. *Абдугалиева Г. Ю., Имангазин М. К., Утянова У. С. Қазақстан Республикасының тау-кен өндіру саласындағы өнеркәсіптік қауіпсіздік мәселелері жөніндегі нормативтік дереккөздерге шолу // ҚР ҰҒА жаңалықтары, Геология және техникалық ғылымдар сериясы. – 2016. – № 4. – Б. 103–109 (орыс тілінде)*
11. *Қазақстан Республикасының «Азаматтық қорғау туралы» кодексі (өзгерістер мен толықтырулармен). – Астана: Юрист, 2023. – 312 б. (қазақ тілінде)*
12. *МемСТ 12.0.003–74. Еңбекті қорғау стандарттарының жүйесі. Қауіпті және зиянды өндірістік факторлар. Жіктелуі. – М.: Стандарттар баспасы, 1976 (орыс тілінде)*

REFERENCES

1. *Li G., Yao J. A Review of In Situ Leaching (ISL) for Uranium Mining // Mining. – 2024. – Vol. 4. – No. 1. – P. 120–148 (in English)*
2. *Electrokinetic in situ leaching of U from low-permeability uranium ore / C. Li et al. // Nuclear Engineering and Technology. – 2025. – Vol. 57. – No. 2. – Article 103212 (in English)*
3. *Abriol J. P. Leaching: Theory and Practice // Weinheim: Wiley-VCH, 2017. – P. 329–345 (in English)*
4. *Reactive transport modelling as a toolbox to compare remediation strategies for aquifers impacted by uranium in situ recovery / N. Seigneur et al. // Journal of Contaminant Hydrology. – 2024. –Vol. 265. – Article 104392 (in English)*
5. *Mussayeva E., Bakhtin M., Kurbanova A. Environmental Impacts of In Situ Leaching Uranium Mining: A Review // Environments. – 2026. – Vol. 13. – No. 7. – Article 366 (in English)*
6. *Barnes R. I. In Situ Recovery of Minerals // Cham: Springer, 2019. – P. 233–249 (in English)*
7. *Kovaleva O. S. Ocenka bezopasnosti sposobov dobychi urana: monografiya [Safety Assessment of Uranium Mining Methods: Monograph]. – Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2020. – 164 p. (in Russian)*
8. *Manaa E. S. A., Mahmoud S. A. E., Awny E. Selective Leaching and Separation of Uranium from Ochre-Umm Greifat, Red Sea Coast, Central Eastern Desert, Egypt // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2024. – Vol. 41. – P. 2579–2588 (in English)*
9. *Mwetulundila A.-L., Atangana A. Numerical simulation of uranium in-situ leaching contaminant transport in a spatially heterogeneous confined aquifer // Modeling Earth Systems and Environment. – 2025. – Vol. 11. – Article 316 (in English)*
10. *Abdugaliyeva G. Yu., Imangazin M. K., Utyanova U. S. Obzor normativnyh istochnikov po voprosam promyshlennoj bezopasnosti v gornodobyvayushchej otrasli Respubliki Kazahstan [Survey of reference resources on HSE issues in mining industry of the Kazakhstan] Izvestiya NAN RK, Seriya geologii i tekhnicheskih nauk [News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences]. – 2016. – No. 4. – P. 103–109 (in Russian)*
11. *Code of the Republic of Kazakhstan «On Civil Protection» (as amended and supplemented). – Astana: Yurist, 2023. – 312 p. (in Kazakh)*
12. *GOST 12.0.003–74. SSBT. Opasnye i vrednye proizvodstvennye faktory. Klassifikatsiya [Occupational Safety Standards System. Hazardous and Harmful Production Factors. Classification]. – Moscow: Izdatelstvo standartov, 1976 (in Russian)*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Li G., Yao J. Обзор метода подземного выщелачивания (ISL) при добыче урана // Mining. – 2024. – Т. 4. – № 1. – С. 120–148 (на английском языке)*

2. *Электрокинетическое подземное выщелачивание урана из низкопроницаемой урановой руды / C. Li [и др.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2025. – Т. 57. – № 2. – Ст. 103212 (на английском языке)*
3. *Abriol J. P. Выщелачивание: теория и практика // Вайнхайм: Wiley-VCH. – 2017. – С. 329–345 (на английском языке)*
4. *Моделирование реактивного переноса как инструмент сравнения стратегий восстановления водоносных горизонтов, подвергшихся воздействию подземного выщелачивания урана / N. Seigneur [и др.] // Journal of Contaminant Hydrology. – 2024. – Т. 265. – Ст. 104392 (на английском языке)*
5. *Mussayeva E., Bakhtin M., Kurbanova A. Воздействие добычи урана методом подземного выщелачивания на окружающую среду: обзор // Environments. – 2026. – Т. 13. – №. 7. – Ст. 366 (на английском языке)*
6. *Barnes R. I. Подземная добыча полезных ископаемых методом скважинного выщелачивания // Шам: Springer. – 2019. – С. 233–249 (на английском языке)*
7. *Ковалева О. С. Оценка безопасности способов добычи урана: монография. – Томск: изд-во ТПУ, 2020. – 164 с. (на русском языке)*
8. *Manaa E. S. A., Mahmoud S. A. E., Awny E. Селективное выщелачивание и разделение урана из руды Ochre-Umm Greifat, побережье Красного моря, Центральная Восточная пустыня, Египет // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2024. – Т. 41. С. 2579–2588 (на английском языке)*
9. *Mwetulundila A.-L., Atangana A. Численное моделирование переноса загрязняющих веществ при подземном выщелачивании урана в пространственно неоднородном напорном водоносном горизонте // Modeling Earth Systems and Environment. – 2025. – Т. 11. – Ст. 316 (на английском языке)*
10. *Абдугалиева Г. Ю., Имангазин М. К., Утянова У. С. Обзор нормативных источников по вопросам промышленной безопасности в горнодобывающей отрасли Республики Казахстан // Известия НАН РК, Серия геологии и технических наук. – 2016. – № 4. – С. 103–109 (на русском языке)*
11. *Кодекс Республики Казахстан «О гражданской защите» (с изм. и доп.). – Астана: Юрист, 2023. – 312 с. (на казахском языке)*
12. *ГОСТ 12.0.003–74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Издательство стандартов, 1976 (на русском языке)*

Авторлар туралы мәліметтер:
Абдугалиева Г. Ю., техника ғылымдарының докторы, профессор, Ө. А. Байқоңыров атындағы Тау-кен-металлургия институты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Д. А. Қонаев атындағы Кен істері институтының бас ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан), *g_1102@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0003-2349-9396
Орсаринова А. О., сеньор-лектор, IT және жаратылыстану ғылымдары жоғары мектебі, С. Аманжолав атындағы Шығыс Қазақстан университеті (Өскемен қ., Қазақстан), *asem.oraldinova@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0006-6314-9816
Хусаинова С. О., «Табиғи-техногендік қауіп-қатерлер» ББ магистранты, «География және табиғатты пайдалану» факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Өнеркәсіптік қауіпсіздік бойынша аға оқытушы, «Жоғары технологиялар институты» ЖШС «Қазақстан ядролық университеті» филиалы (Алматы қ., Қазақстан), *khussainovasamal@gmail.com;* https://orcid.org/0009-0002-8339-6233
Саукен Т. Ж., техника ғылымдарының магистрі, инженер-зерттеуші, Жаңа бағытты дамыту зертханасы, ЖШС «Жоғары технологиялар институты» (Алматы қ., Қазақстан), *talshynsauken@gmail.com;* https://orcid.org/0009-0007-4773-0659

Information about the authors:
Abdugaliyeva G. Yu., Doctor of Technical Sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute named after O.A. Baikonurov, K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Chief Researcher at the D. A. Kunaev Institute of Mining (Almaty, Kazakhstan)
Orsarinova A. O., Senior Lecturer, Higher School of IT and Natural Sciences, S. Amanzholov East Kazakhstan State University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)
Khussainova S. O., Master's student of the Educational Program «Natural and technogenic risks», Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Senior Lecturer on Industrial Safety, Branch of Kazakhstan Nuclear University, «Institute of High Technologies» LLP (Almaty, Kazakhstan)
Sauken T. Zh., Master of Technical Sciences, Research Engineer, Laboratory for the Development of New Directions, «Institute of High Technologies» LLP (Almaty, Kazakhstan)

Сведения об авторах:
Абдугалиева Г. Ю., доктор техн. наук, профессор, Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, гл. научный сотрудник Института горного дела имени Д. А. Кунаева (г. Алматы, Казахстан)
Орсаринова А. О., сеньор-лектор, Высшая школа IT и естественных наук, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)
Хусаинова С. О., магистрант ОП «Природно-техногенные риски», факультет «География и природопользование», Казахский национальный университет им. аль-Фараби, ст. преподаватель по Промышленной безопасности, Филиал «Казахстанский ядерный университет» ТОО «Институт высоких технологий» (г. Алматы, Казахстан)
Саукен Т. Ж., магистр техн. наук, инженер-исследователь, лаборатория развития новых направлений, ТОО «Институт высоких технологий» (г. Алматы, Казахстан)

Код МРНТИ 52.47.19

*Д. С. Садуакасов, Р. У. Баямирова, А. Р. Тогашева, Р. Т. Асылбек
Университет Есенова (г. Актау, Казахстан)

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ ЗАВОДНЕНИЯ НА ПОЗДНЕЙ СТАДИИ РАЗРАБОТКИ МНОГОПЛАСТОВЫХ ЗАЛЕЖЕЙ (НА ПРИМЕРЕ 3-ГО БЛОКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ УЗЕНЬ)

Аннотация. В данной научной работе представлена комплексная методология повышения эффективности разработки юрских горизонтов XIII–XVIII 3-го блока месторождения Узень, находящегося на завершающей стадии эксплуатации. Исследование основано на интеграции седиментологического анализа, методов материального баланса, гидродинамического скрининга и подбора геолого-технических мероприятий. Установлено, что длительная закачка сточных вод при повышенных давлениях привела к формированию техногенной трещиноватости и неэффективной циркуляции агента вытеснения. Предложена стратегия реконфигурации системы ППД с дифференциацией давлений нагнетания. Реализация комплекса мероприятий позволит вовлечь остаточные запасы в разработку и обеспечить дополнительную добычу нефти.
Ключевые слова: *месторождение Узень, заводнение, остаточные запасы, геолого-технические мероприятия, система ППД, гидродинамический анализ.*

Көпқабатты кен орындарын игерудің соңғы сатысында су айдауды оңтайландырудың кешенді тәсілі (Өзен кен орнының 3-блогы мысалында)

Аңдатпа. Бұл ғылыми жұмыста пайдаланудың соңғы сатысындағы Өзен кен орнының 3-блогындағы XIII–XVIII юра горизонттарын игеру тиімділігін арттырудың кешенді әдістемесі ұсынылған. Зерттеу седиментологиялық талдау, материалдық баланс әдістері, гидродинамикалық скрининг және геологиялық-техникалық шараларды іріктеуді біріктіруге негізделген. Ұзақ уақыт бойы жоғары қысыммен ағынды суларды айдау техногендік жарықшақтардың қалыптасуына және ығыстыру агентінің тиімсіз айналымына әкелгені анықталды. Айдау қысымдарын саралау арқылы қабат қысымын ұстап тұру жүйесін қайта құру стратегиясы ұсынылды. Ұсынылған шараларды іске асыру қалдық мұнай қорларын игеруге тартуға және қосымша мұнай өндіруді қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.
Түйінді сөздер: *Өзен кен орны, суландыру, қалдық қорлар, геологиялық-техникалық іс-шаралар, ҚҚҰ жүйесі, гидродинамикалық талдау.*

An integrated approach to waterflooding optimization at the late stage of multilayer reservoir development (case study of block 3 of the Uzen oil field)

Abstract. This scientific work presents an integrated methodology for improving the development efficiency of the Jurassic horizons XIII–XVIII of Block 3 at the Uzen field, which is at the final stage of operation. The study is based on the integration of sedimentological analysis, material balance methods, hydrodynamic screening, and selection of geological and technical measures. It was established that long-term wastewater injection at elevated pressures resulted in the formation of technogenic fracturing and inefficient circulation of the displacement agent. A strategy for reconfiguring the reservoir pressure maintenance system with differentiated injection pressures was proposed. Implementation of the proposed measures will allow residual oil reserves to be involved in development and provide additional oil production.
Keywords: *Uzen field, waterflooding, remaining reserves, well interventions, pressure maintenance system, hydrodynamic analysis.*

Введение

Месторождение Узень, открытое в 1961 году в Мангистауской области Казахстана, относится к категории уникальных по величине начальных геологических запасов. Однако на сегодняшний день объект находится на поздней стадии выработки, для которой характерны высокая степень истощения основных эксплуатационных объектов, падение пластового давления и повсеместное обводнение продукции, достигающее по отдельным элементам 3-го блока критических 90–94% [1–5].

Главная научно-практическая проблема текущего этапа эксплуатации 3-го блока (горизонты XIII–XVIII) заключается в глубоком противоречии между проектной однородной жесткой системой заводнения и фактическим сложным макронеоднородным строением продуктивных пластов. Сетка скважин исторически разбуривалась без учета пространственной геометрии песчаных тел различного генезиса. В результате нагнетаемая вода устремилась по кратчайшим путям наименьшего фильтрационного сопротивления — высокопроницаемым рукавообразным русловым каналам, вызвав преждевременное обводнение реагирующего фонда. При этом обширные линзовидные и застойные зоны пойменных отложений оказались гидродинамически изолированными. Ситуация усугубляется развитием процессов техногенного трещинообразования из-за превышения критических давлений закачки, что фактически превратило систему ППД в инструмент неэффективного круговорота попутно добываемой воды. Возникла необходимость пересмотра подходов к управлению заводнением на основе седиментологического и термогидродинамического мониторинга [6–10].

Геологическая и петрофизическая модель коллектора

Седиментологический анализ фаций

Основой для пересмотра геологического строения 3-го блока послужил детальный анализ керного материала скважины № 6602 и обобщение данных фундаментального отчета *Robertson Research International Limited*. Юрские продуктивные пласты месторождения Узень формировались в палеогеографических условиях динамичной прибрежно-морской аллювиально-дельтовой равнины. Нами выделены и закартированы две макрофации, оказывающие полярное влияние на процессы фильтрации.

Фация русловых каналов (Channel CA): аллювиальные отложения активных дельтовых проток, представленные массивными, хорошо отсортированными мелко- и среднезернистыми песчаниками. Обладают превосходными фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС), абсолютная проницаемость нередко превышает 2000–3000 мД. Пространственно они образуют непрерывные, протяженные рукавообразные тела («шнурки»), по которым развивается опережающий фронт обводнения.

Фация пойменных и лагунных осадков (Floodplain CB): мелководные отложения временных разливов, прибреж-

ных маршей, болот и застойных лагун. Представлены сильноглинизированными алевролитами и тонкослоистыми пачками аргиллитов. Фация характеризуется высокой прерывистостью, изменчивостью геометрии и низкими коллекторскими свойствами (проницаемость менее 10–50 мД). Именно здесь локализованы основные тупиковые и застойные ОИЗ.

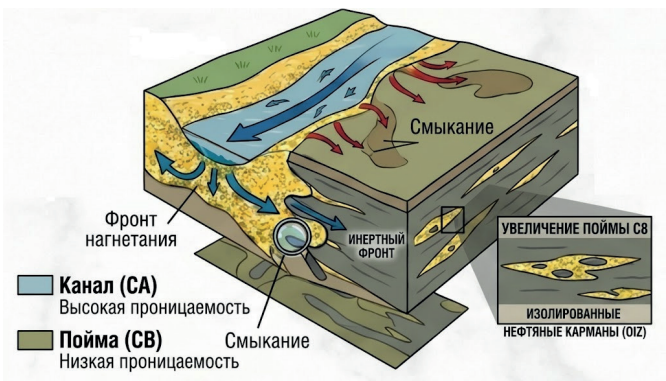


Рис. 1. Схема седиментологической архитектуры пластов 3-го блока месторождения Узень (составлено авторами на основе отчета Robertson Research, 2002 г.).
Сурет 1. Өзен кен орны 3-ші блогы қабаттарының седиментологиялық архитектурасының схемасы (авторлармен Robertson Research, 2002 ж. есебі негізінде құрастырылған).
Figure 1. Schematic of the sedimentological reservoir architecture within Block 3 of the Uzen field (compiled by the authors based on the Robertson Research report, 2002).

Уточнение дифференцированных петрофизических зависимостей

Классические детерминированные гидродинамические модели месторождения опирались на генеральную (усредненную) петрофизическую зависимость «пористость — проницаемость» ($K_p - K_r$), что приводило к систематической ошибке: искусственному завышению проводимости пойменных коллекторов и занижению потенциала русловых зон. Для устранения данного несоответствия на базе математической обработки керна скв. 6602 нами были выведены раздельные фациально-ориентированные уравнения регрессии:

Для русловых каналов (Фация СА):

$$log_{10}(K_{pr}) = +0.2071297 \cdot K_p - 2.748585 \ (R^2 = 0.61)$$

Для пойменных зон (Фация СВ):

$$log_{10}(K_{pr}) = +0.1531569 \cdot K_p - 2.510258 \ (R^2 = 0.66)$$

Интеграция этих уравнений в цифровую геологическую модель позволила локализовать новые зоны неколлекторов и уточнить фильтрационные потоки, что в корне изменило карту распределения гидродинамических сопротивлений пласта.

Оценка текущего состояния и структуры запасов

По состоянию на 01.07.2024 г. остаточные извлекаемые запасы нефти 3-го блока характеризовались значительным потенциалом дальнейшей разработки и превышали

Рисунок 2. График **дифференцированных** петрофизических зависимостей «пористость-проницаемость» по данным скважины №6602 для фаций СА и СВ

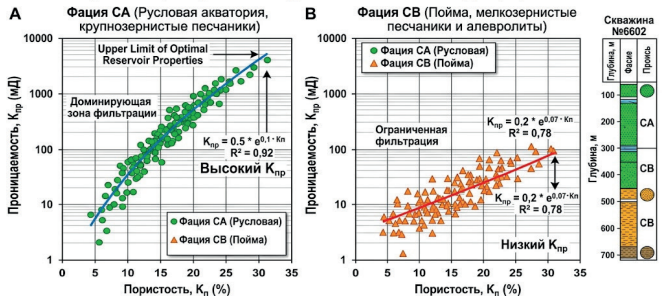


Рис. 2. График дифференцированных петрофизических зависимостей «пористость-проницаемость» по данным скважины № 6602 для фаций СА и СВ.
Сурет 2. СА және СВ фациялары үшін № 6602 ұңғымасының деректері бойынша сараланған «кеуектілік-өткізгіштік» петрофизикалық тәуелділіктерінің графигі.
Figure 2. Plot of differentiated «porosity-permeability» petrophysical relationships based on well No. 6602 data for CA and CB facies.

33 млн тонн. Данный объем запасов распределен по нескольким продуктивным горизонтам, отличающимся геолого-физическими характеристиками, степенью выработанности и уровнем обводненности. Анализ структуры остаточных запасов свидетельствует о наличии существенного объема трудноизвлекаемых углеводородов, локализованных преимущественно в зонах с неоднородным строением коллекторов и сниженной проницаемостью.

Как видно из таблицы 1, наибольшие объемы начальных геологических и извлекаемых запасов сосредоточены в горизонтах XIV и XVII, что указывает на их ключевую роль в общей системе разработки месторождения. При этом остаточные извлекаемые запасы по отдельным горизонтам сохраняются на достаточно высоком уровне, несмотря на длительный период эксплуатации и высокую степень обводненности продукции. Текущие значения коэффициента извлечения нефти характеризуются значительной вариативностью, что обусловлено различиями в фильтрационно-емкостных свойствах пластов, неоднородностью строения коллекторов и эффективностью системы заводнения.

Высокая степень обводненности отдельных объектов, достигающая 90% и более, свидетельствует о неравномерном охвате пласта процессом вытеснения и преждевременном прорыве закачиваемой воды по наиболее проницаемым интервалам. В то же время наличие значительных остаточных запасов указывает на существование зон, недостаточно вовлеченных в разработку, что подтверждает необходимость внедрения современных методов регулирования фильтрационных потоков и повышения нефтеотдачи пластов.

Таким образом, представленные в таблице 1 данные демонстрируют значительный потенциал дальнейшей доразработки горизонтов XIII–XVIII и обосновывают необходимость применения комплексных технологий интенсификации добычи нефти, направленных на снижение обводненности продукции, увеличение коэффициента ох-

вата пластов воздействием и повышение конечного коэффициента извлечения нефти.

Таблица 1

Дифференцированная структура запасов горизонтов XIII–XVIII (на 01.07.2024 г.)

Кесте 1

XIII–XVIII горизонттары қорларының сараланған құрылымы (01.07.2024 ж. жағдай бойынша)

Table 1

Differentiated reserve structure of horizons XIII–XVIII (as of July 1, 2024)

Горизонт	НГЗ, млн т	НИЗ, млн т	ОИЗ, млн т	Текущий КИН, д. ед.	Текущая обводненность, %
XIII	28.03	14.0	7.0	0.16	76–86
XIV	55.50	24.7	14.0	0.16–0.24	87– 92
XV	27.40	10.9	4.8	0.09–0.32	80–89
XVI	24.30	10.4	3.9	0.22–0.32	87–94
XVII	29.90	12.5	5.7	0.22–0.23	82–86
XVIII	8.90	3.5	1.8	0.19	72
Итого	174.03	76.0	33.2	—	—

Анализ таблицы показывает, что несмотря на обводненность, превышающую 85–90%, средний текущий КИН колеблется в пределах 0.16–0.25. Это свидетельствует о преимущественно очаговом характере выработки запасов: русла полностью промыты, а поймы не затронуты разработкой.

Гидродинамический анализ эффективности системы заводнения

Инструменты скрининга и метод материального баланса

Для экспресс-диагностики качества заводнения были построены специализированные полулогарифмические графики зависимости текущего КИН от интегрального коэффициента охвата пласта заводнением по объему (E_{vol}). Расчет E_{vol} осуществлялся через оценку объема порового пространства, занятого подвижной нефтью (MOPV) по формуле 1:

$$E_{\vartheta} = \frac{MOPV}{W_i - W_p \cdot B_{\omega}}, \quad (1)$$

где W_i — накопленная закачка;

W_p — накопленная добыча воды,

B_w — объемный коэффициент воды.

Более детально расчет параметра MOPV (Mobile Oil Pore Volume — объем порового пространства, занятого подвижной нефтью) производился на основе геологических данных по формуле 2:

$$MOPV = V_p \cdot (S_{oi} + S_{or}), \quad (2)$$

где V_p — объем пор;

S_{oi} — начальная нефтенасыщенность;

S_{or} — остаточная нефтенасыщенность.

Для обеспечения высокой точности расчетов в данной работе значения MOPV определялись дифференцированно для каждой фации. Объем пор (V_p) и параметры насыщения для русловых каналов (СА) и пойменных отложений (СВ) рассчитывались раздельно, с использованием фациально-ориентированных уравнений регрессии, описанных в разделе 2.2. Это позволило учесть, что в низкопроницаемой фации СВ диапазон подвижной нефти значительно ниже, чем в высокопроницаемых руслах.

Знаменатель уравнения $(W_i - W_p \cdot B_w)$ характеризует объем нетто-закачки — то есть реальное количество воды, оставшееся в пласте и участвующее в процессе вытеснения. Сравнение накопленной нетто-закачки с величиной MOPV позволяет количественно оценить, какая доля потенциально подвижной нефти уже замещена водой. Расчет «неэффективной» циркуляции основывался на сопоставлении фактических кривых обводнения с теоретическими кривыми Баклея-Леверетта, построенными для различных фациальных условий.

Фактические траектории графиков для XV и XVI горизонтов демонстрируют резкое выполаживание и уход вправо от нормативных кривых Баклей-Леверетта. Это указывает на классический сквозной прорыв воды. Применение теории фракционного течения позволило рассчитать, что объем «неэффективной» циркуляции (когда нагнетаемая вода прорывается в добывающие скважины практически без совершения полезной работы по вытеснению нефти из матрицы пласта) варьируется от 40 до 80% в годовом разрезе [11–12].

Феномен техногенной трещиноватости («авто-ГРП»)

Ключевым фактором деградации системы заводнения на 3 блоке стало повсеместное превышение критического давления нагнетания. Фактический забойный градиент давления раскрытия вертикальных трещин для глубин залегания юрского комплекса (в среднем 1262 м) равен 0.13 атм/м. Таким образом, критическое забойное давление, при котором начинается раскрытие трещин «авто-ГРП», составляет 164 атм.

На основе анализа графиков Холла (зависимости интегрального устьевого давления от накопленной закачки) установлено, что реальные забойные давления в нагнетательных скважинах блока (например, скв. № 1590, № 3433) годами поддерживались на уровне 220–235 атм.

В процессе долговременной закачки воды в нагнетательные скважины месторождения (на примере скважины № 6602) при давлениях нагнетания, превышающих критические значения, наблюдается развитие явления техногенного самопроизвольного гидроразрыва пласта (далее — авто-ГРП). Данный процесс оказывает двоякое влияние на эффективность системы поддержания пластового давления (ППД) в зависимости от геологической неоднородности и фациальной принадлежности пластов-коллекторов.

На рис. 3 (А) детально разукрупнен пошаговый механизм формирования техногенной трещины в условиях низкопроницаемой фации СВ (пойменные отложения). Постоянный рост забойного давления ($P_{заб}$) приводит к локальному превышению давления разрыва породы.

Жидкость нагнетания устремляется в образовавшийся дефект, инициируя развитие и раскрытие магистральной трещины авто-ГРП. Однако, в отличие от высокопроницаемых русловых песчаников (фация СА), в пластах фации СВ, характеризующихся повышенной глинистостью и микрослоистостью, отмечается высокая пластичность породы и развитая сеть естественных микротрещин. Это приводит к быстрому рассеиванию энергии потока и потенциальному смыканию (деградации) техногенной трещины при снижении устьевого давления.

Для идентификации и мониторинга динамики развития авто-ГРП был применен метод интегрального диагностического графика Холла в модификации зависимости интегрального коэффициента Холла ($K_{инт}$) от накопленного объема закачки в логарифмическом масштабе (рис. 3, Б).

Анализ диагностической кривой позволяет выделить следующие ключевые этапы:

1. Соответствует стабильной фильтрации жидкости в режиме радиального притока при постоянном значении приемистости и стабильной проницаемости удаленной зоны пласта.

2. Момент четкого отклонения фактической кривой закачки вниз от теоретического линейного тренда. Данный перелом указывает на скачкообразное снижение интегрального коэффициента Холла, что физически интерпретируется как резкое улучшение фильтрационных свойств призабойной зоны пласта (ПЗП) за счет раскрытия высокопроводящего канала.

3. Область, расположенная ниже теоретической линии. В высокопроницаемой фации СА (зеленый цвет на графике Холла) авто-ГРП протекает стабильно и эффективно, обеспечивая устойчивый прирост приемистости за счет высокой жесткости скелета русловых песчаников. Напротив, для фации СВ (как показано на графике) наблюдается нестабильный характер отклонения, свидетельствующий о периодическом затухании проводимости трещины, что требует строгого контроля давления закачки для предотвращения деградации фильтрационного канала.

Таким образом, совместный анализ фациального замещения и модифицированного графика Холла позволяет оперативно диагностировать геомеханические изменения в ПЗП нагнетательных скважин, оптимизировать устьевые давления и рассчитывать целевую приемистость для достижения нормативного уровня компенсации отборов (до 120%) без риска прорыва вод по высокопроводящим трещинам к добывающему фонду.

Техногенная трещина раскрывается в направлении максимального главного стресса и соединяет нагнетательную скважину с добывающей кратчайшим высокопроводящим каналом. Агент вытеснения сбрасывается по трещине напрямую, вымывая узкую зону и оставляя нетронутыми основные нефтенасыщенные блоки коллектора. Ярким примером служит нагнетательная скважина № 3433: проведение детальных исследований и последующий спуск пакера для ликвидации заколонного перетока позволили скорректировать объем эффективного воздействия, снизив паразитную уходящую закачку с 850 до 739 тыс. м³.

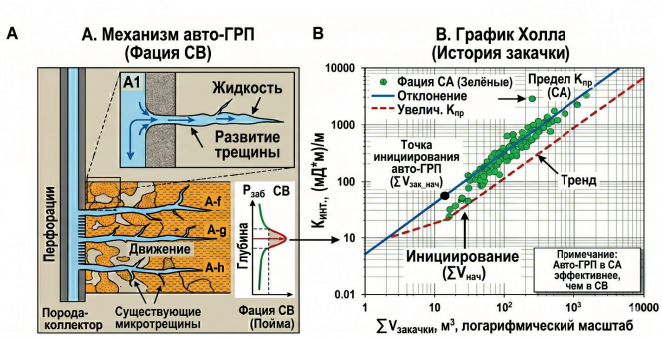


Рис. 3. Механизм техногенного авто-ГРП и диагностический график Холла.
Сурет 3. Техногендік авто-ГӨЖ (гидравликалық өнімділікті жару) механизмі және Холл диагностикалық графигі.
Figure 3. Mechanism of induced auto-hydraulic fracturing and Hall diagnostic plot.

Программа оптимизации и адресных ГТМ

Для изменения текущей негативной характеристики вытеснения и перераспределения фильтрационных потоков из промытых русловых фаций (СА) в слабодренируемые пойменные (СВ) была разработана комплексная программа адресных ГТМ. Главный технологический принцип программы — ограничение устьевых давлений нагнетания ниже точки закрытия трещин «авто-ГРП» в сочетании с физико-химическим выравниванием профиля приемистости (ВПП).

Дифференцированные технологические решения по горизонтам

XIII горизонт (25 операций). Выявлен жесткий дефицит пластовой энергии в первом подблоке. Запланирован массовый перевод скважин с нижележащих горизонтов (ПВЛГ) под добычу с обязательным проведением пропантного ГРП (скв. № 6933, № 4413, № 7042) для создания высокопроводящих каналов в низкопроницаемой пойме. Ожидаемый прирост — 13.1 тыс. тонн нефти в год.

XIV горизонт (29 операций). Проводится масштабная реконфигурация очагового заводнения. Запланирован ввод 6 простаивающих скважин под нагнетание (включая скв. № 6927, № 2075) для создания встречных фронтов вытеснения в обход промытых зон. Для вскрытия изолированных целиков нефти на скв. № 6990 проектируется зарезка бокового ствола (ЗБС). Ожидаемый эффект — 10.5 тыс. тонн в год.

XV горизонт (15 операций). Ввиду высокой расчлененности пласта предусмотрено проведение ремонтно-изоляционных работ (РИР) по ликвидации заколонных перетоков и приобщение неразрабатываемой пачки «А» (скв. № 4702), а также циклическое ВПП на скв. № 3435. Ожидаемый эффект — 12.2 тыс. тонн в год.

XVIII горизонт (9 операций). Гидродинамический каротаж скв. № 6147 показал, что текущий интервал перфорации дренирует лишь 12.5% эффективной нефтенасыщенной толщины. Предложен дострел нижнего интервала (1354–1356 м) с последующей закачкой вязкоупругих составов (ВУС) на реагирующих нагнетательных скважинах для перераспределения потоков.

Целевые показатели программы

Прогнозные показатели технологической эффективности программы геолого-технических мероприятий (ГТМ) свидетельствуют о значительном потенциале увеличения добычи нефти за счет комплексного воздействия на продуктивные горизонты XIII–XVIII. Планируемая реализация мероприятий направлена на вовлечение в разработку остаточных трудноизвлекаемых запасов, повышение коэффициента охвата пластов воздействием, а также снижение негативного влияния высокой обводненности продукции.

Как показано в таблице 2, суммарное количество запланированных операций по блоку составляет 96, при этом ожидаемая дополнительная добыча нефти за 12 месяцев оценивается на уровне 61,3 тыс. т. Наибольший вклад в общий технологический эффект прогнозируется по XIII и XV горизонтам, доля которых составляет 21 и 20% соответственно. Высокие показатели эффективности для данных объектов обусловлены значительным объемом остаточных извлекаемых запасов, а также наличием участков с недостаточным охватом пласта процессом заводнения.

Таблица 2

Прогнозные показатели технологической эффективности программы ГТМ

Кесте 2

ГТІ бағдарламасының технологиялық тиімділігінің болжамды көрсеткіштері

Table 2

Predicted indicators of technological efficiency of the well intervention program

Наименование объекта	Количество операций	Доп. добыча нефти (12 мес.), тыс. т	Доля в общем эффекте, %
13 горизонт	25	13.1	21%
14 горизонт	29	10.5	17%
15 горизонт	15	12.2	20%
16 горизонт	9	6.5	11%
17 горизонт	9	10.0	16%
18 горизонт	9	8.9	15%
Итого по блоку	96	61.3	100%

Для XIV горизонта предусматривается наибольшее количество операций — 29, что связано с крупными запасами нефти и высокой степенью неоднородности коллектора. Несмотря на значительную обводненность продукции, реализация комплекса ГТМ позволит обеспечить дополнительную добычу на уровне 10,5 тыс. т нефти. Существенный эффект также ожидается по XVII и XVIII горизонтам, где прогнозируемая дополнительная добыча составит 10,0 и 8,9 тыс. т соответственно.

Наименьший объем дополнительной добычи прогнозируется по XVI горизонту, что связано с более высокой степенью выработанности запасов и ограниченными возможностями вовлечения остаточной нефти в активную разработку. Тем не менее проведение мероприятий на данном объекте остается экономически и технологически целесообразным ввиду необходимости стабилизации текущих показателей добычи и поддержания пластового давления.

Таким образом, представленные в таблице 2 прогнозные показатели подтверждают высокую эффективность планируемой программы геолого-технических мероприятий и демонстрируют перспективность комплексного подхода к доразработке зрелых высокообводненных месторождений. Реализация намеченных мероприятий позволит обеспечить дополнительную добычу нефти, повысить степень извлечения остаточных запасов и увеличить общую эффективность эксплуатации объекта разработки.

Обсуждение результатов

Представленные расчеты доказывают, что без изменения текущей конфигурации заводнения утвержденный проектный КИН (0.38–0.50) на 3 блоке месторождения Узень достигнут не будет. Традиционное экстенсивное наращивание объемов закачки лишь усугубляет обводненность за счет циркуляции воды по трещинам «авто-ГРП».

Предложенный нами переход к интеллектуальному планированию ППД базируется на поддержании интегральной компенсации отборов жидкостей закачкой на уровне 120% строго при забойных давлениях нагнетания ниже 164 атм (для исключения раскрытия трещин). Математическое моделирование пятилетнего прогноза по XVIII горизонту показало, что точечный дострел нижних пачек в скв. № 6147 совместно с блокированием промытых русел с помощью ВУС на реагирующих участках скважин № 8767 и № 6363 приведет к изменению направления фильтрационных потоков и обеспечит кумулятивный прирост добычи нефти до 4.5 тыс. тонн только по данному элементу. Это подтверждает, что интеграция адресных ГТМ формирует мощный системный эффект оздоровления всего эксплуатационного блока.

Для верификации предложенной стратегии было выполнено трехмерное гидродинамическое моделирование в программном комплексе *tNavigator*. В основу модели легла цифровая геологическая сетка, учитывающая распределение фаций СА и СВ и соответствующие им петрофизические зависимости (формулы 1 и 2).

Процедура моделирования включала следующие этапы:

1. Инициализация модели: задание начальных условий по пластовому давлению и насыщенности на дату начала разработки.

2. Адаптация (History Matching): воспроизведение истории разработки 3-го блока за период с 2000 по 2024 гг. Основными параметрами адаптации служили динамика обводненности по скважинам-реагентам и забойные давления в нагнетательных скважинах с учетом динамического раскрытия трещин «авто-ГРП».

3. Прогнозный расчет: сопоставление двух сценариев — базового (продолжение текущей эксплуатации без ограничений по давлению) и целевого (реализация программы из 96 ГТМ с ограничением забойного давления на уровне 164 атм).

Заключение

Выполненное комплексное научно-исследовательское и прикладное исследование позволяет сформулировать следующие ключевые выводы:

− Традиционный подход с использованием усредненных петрофизических моделей неприменим на поздней стадии разработки многопластовых залежей. Использование раздельных уравнений регрессии для русловой (СА) и пойменной (СВ) макрофаций позволяет достоверно оценивать ФЕС и локализовать невыработанные ОИЗ.

− Эксплуатация нагнетательного фонда в режиме «авто-ГРП» наносит вред разработке, формируя каналы паразитной циркуляции воды. Ограничение давлений нагнетания точкой закрытия техногенных трещин является обязательным условием для вовлечения низкопроницаемой матрицы пласта в разработку.

− Обоснован целевой уровень компенсации отборов на уровне 120%, рассчитанный индивидуально для каждой ячейки с учетом коэффициентов взаимовлияния скважин.

− Внедрение разработанной адресной программы из 96 ГТМ обеспечивает прогнозируемое получение в год, улучшает структуру остаточных запасов и существенно продлевает рентабельный срок промышленной эксплуатации 3-го блока месторождения Узень.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26101849).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Akhmetzhan S., Churikova L., Kalesheva G. Обзор интегрированного метода решения проблем, связанных с повторной разработкой обводненных месторождений // International Journal of GEOMATE. – 2023. – Т. 25. – № 109. – С. 85–92 (на английском языке)*
2. *Комплекс гидродинамических исследований скважин и пластов на месторождении Узень / Р. У. Баямирова [и др.] // Нефть и газ. – 2024. – № 2 (140). – С. 199–210 (на русском языке)*
3. *Интегрированные стратегии контроля обводненности на зрелых нефтяных месторождениях Казахстана / Z. Alisheva [и др.] // Polymers. – 2025. – Т. 17. – № 7. – С. 829 (на английском языке)*
4. *Imanbayev B., Kushekov R., Sagyndikov M., Shyrakbayev D. Технико-экономическое обоснование применения полимерного заводнения в условиях месторождения Узень // SPE Annual Caspian Technical Conference. – Нур-Султан, Казахстан, 15–17 ноября 2022 г. (на английском языке)*
5. *Оценка и научное обоснование применения полимерного заводнения на месторождении Узень / Б. А. Иманбаев [и др.] // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2022. – Т. 4. – № 1. – С. 9–27 (на русском языке)*
6. *Королев М. С., Королев С. С. Оценка эффективности и оптимизация систем поддержания пластового давления // Территория Нефтегаз. – 2009. – № 8. – С. 74–78 (на русском языке)*
7. *Таджибаев М. О., Баямирова Р. У., Тогашева А. Р. Разработка интегрированного подхода по оценке локализации остаточных извлекаемых запасов нефти для повышения эффективности геолого-технических мероприятий на месторождении Узень // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2025. – Т. 7. – № 1. – С. 42–53 (на русском языке)*
8. *Новый метод оптимизации стратегий заводнения в многопластовых песчаниковых коллекторах / J. Guo [и др.] // Energies. – 2024. – Т. 17. – № 8. – Ст. 1828 (на английском языке)*
9. *Быстрый метод оптимизации заводнения на основе модели INSIM-FPT и его применение к трехмерным коллекторам / W. Liu [и др.] // Fuel. – 2021. – Т. 292. – Ст. 120219 (на английском языке)*
10. *Ogbeiwi P., Aladeitan Y., Udebhulu D. Подход к оптимизации заводнения: пример месторождения X // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2018. – Т. 8. – № 1. – С. 271–289 (на английском языке)*
11. *Синергия геохимии и концептуальных технологий при оптимизации разработки многопластовых залежей купола Парсумурун месторождения Узень / Н. Д. Сарсенбеков [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 59–66 (на русском языке)*
12. *Метод оптимизации добычи на основе линий тока для месторождений с заводнением / L. Zhang [и др.] // Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – Ст. 37569 (на английском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Akhmetzhan S., Churikova L., Kalesheva G. Қайта игерілетін суланған кен орындарын әзірлеумен байланысты мәселелерді шешудің интеграцияланған әдісіне шолу // International Journal of GEOMATE. – 2023. – Т. 25. – № 109. – Б. 85–92 (ағылшын тілінде)*
2. *Өзен кен орнындағы ұңғымалар мен қабаттарды гидродинамикалық зерттеу кешені / Р. У. Баямирова [және т. б.] // Мұнай және газ. – 2024. – № 2 (140). – Б. 199–210 (орыс тілінде)*
3. *Қазақстанның игерудің соңғы сатысындағы мұнай кен орындарындағы сулану деңгейін бақылаудың интеграцияланған стратегиялары / Z. Alisheva [және т. б.] // Polymers. – 2025. – Т. 17. – № 7. – Б. 829 (ағылшын тілінде)*
4. *Imanbayev B., Kushekov R., Sagyndikov M., Shyrakbayev D. Өзен кен орны жағдайында полимерлік суландыруды қолданудың техникалық-экономикалық негіздемесі // SPE Annual Caspian Technical Conference. – Нұр-Сұлтан, Қазақстан, 2022 жылғы 15–17 қараша (ағылшын тілінде)*
5. *Өзен кен орнында полимерлік суландыруды қолдануды бағалау және ғылыми негіздеу / Б. Иманбаев [және т. б.] // Қазақстан мұнай-газ саласының хабаршысы. – 2022. – Т. 4. – № 1. – Б. 9–27 (орыс тілінде)*
6. *Королев М. С., Королев С. С. Пласт қысымын ұстап тұру жүйелерінің тиімділігін бағалау және оңтайландыру // «Территория Нефтегаз» журналы. – 2009. – № 8. – Б. 74–78 (орыс тілінде)*
7. *Таджибаев М. О., Баямирова Р. У., Тогашева А. Р. Өзен кен орнында геологиялық-техникалық іс-шаралардың тиімділігін арттыру үшін мұнайдың қалдық алынатын қорларының орналасуын бағалаудың интеграцияланған тәсілін әзірлеу // Қазақстан мұнай-газ саласының хабаршысы. – 2025. – Т. 7. – № 1. – Б. 42–53 (орыс тілінде)*
8. *Көпқабатты құмтас коллекторларындағы суландыру стратегияларын оңтайландырудың жаңа әдісі / J. Guo [және т. б.] // Energies. – 2024. – Т. 17. – № 8. – 1828 (ағылшын тілінде)*

9. *INSIM-FPT деректерге негізделген моделі арқылы суландыруды оңтайландырудың жедел әдісі және оның үшөлшемді коллекторларға қолданылуы / W. Liu [және т. б.] // Fuel. – 2021. – Т. 292. – 120219 (ағылшын тілінде)*
10. *Ogbeiwi P., Aladeitan Y., Udebhulu D. Суландыруды оңтайландыру тәсілі: X кен орны мысалында // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2018. –Т. 8. – № 1. – Б. 271–289 (ағылшын тілінде)*
11. *Өзен кен орнының Парсумұрын күмбезіндегі көпқабатты кеніштерді игеруді оңтайландырудағы геохимия мен концептуалдық технологиялардың синергиясы / Н. Д. Сарсенбеков [және т. б.] // Томск политехникалық университетінің хабаршысы. Георесурстар инжинирингі. – 2025. – Т. 336. – № 6. – Б. 59–66 (орыс тілінде)*
12. *Суландырылатын кен орындары үшін ағын сызықтарына негізделген өндіруді оңтайландыру әдісі / L. Zhang [және т. б.] // Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – 37569 (ағылшын тілінде)*

REFERENCES

1. *Akhmetzhan S., Churikova L., Kalesheva G. A review study on an integrated method for solving problems associated with the re-development of waterflooded fields // International Journal of GEOMATE. – 2023. – Vol. 25. – No. 109. – P. 85–92 (in English)*
2. *Kompleks gidrodinamicheskikh issledovanii skvazhin i plastov na mestorozhdenii Uzen' [Complex of hydrodynamic studies of wells and formations at the Uzen field] R. U. Bayamirova et al. Neft' i gaz [Oil and Gas]. – 2024. – No. 2 (140). – P. 199–210 (in Russian)*
3. *Integrated strategies for controlling water cut in mature oil fields in Kazakhstan / Z. Alisheva et al. // Polymers. – 2025. – Vol. 17. – No. 7. – P. 829 (in English)*
4. *Imanbayev B., Kushekov R., Sagyndikov M., Shyrakbayev D. Technical and Economic Feasibility of Polymer Flooding under the Conditions of the Uzen Field // SPE Annual Caspian Technical Conference. – Nur-Sultan, Kazakhstan, November 15–17, 2022 (in English)*
5. *Otsenka i nauchnoe obosnovanie primeneniya polimernogo zavodneniya na mestorozhdenii Uzen' [Evaluation and scientific justification of polymer flooding application in the Uzen oilfield] B. Imanbayev et al. Vestnik neftegazovoi otrasli Kazakhstana [Kazakhstan Journal for Oil & Gas Industry]. – 2022. – Vol. 4. – No. 1. – P. 9–27 (in Russian)*
6. *Korolev M. S., Korolev S. S. Otsenka effektivnosti i optimizatsiya sistem podderzhaniya plastovogo davleniya [Evaluation of efficiency and optimization of reservoir pressure maintenance systems]. Territoriya Neftegaz [Territory of Oil and Gas]. – 2009. – No. 8. – P. 74–78 (in Russian)*
7. *Tadzhibayev M. O., Bayamirova R. U., Togasheva A. R. Razrabotka integrirovannogo podkhoda po otsenke lokalizatsii ostatochnykh izvlekaemykh zapasov nefti dlya povysheniya effektivnosti geologo-tekhnicheskikh meropriyatii na mestorozhdenii Uzen' [Development of an integrated approach to assessing the localization of the residual recoverable oil reserves to enhance the effectiveness of geological and technical measures at the Uzen field]. Vestnik neftegazovoi otrasli Kazakhstana [Kazakhstan Journal for Oil & Gas Industry]. – 2025. – Vol. 7. – No. 1. – P. 42–53 (in Russian)*
8. *A new method for optimizing water-flooding strategies in multi-layer sandstone reservoirs / J. Guo et al. // Energies. – 2024. – Vol. 17. – No. 8. – Article 1828 (in English)*
9. *A rapid waterflooding optimization method based on INSIM-FPT data-driven model and its application to three-dimensional reservoirs / W. Liu et al. // Fuel. – 2021. – Vol. 292. – Article 120219 (in English)*
10. *Ogbeiwi P., Aladeitan Y., Udebhulu D. An approach to waterflood optimization: case study of the reservoir X // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2018. – Vol. 8. – No. 1. – P. 271–289 (in English)*
11. *Sinergiya geokhimii i kontseptual'nykh tekhnologii pri optimizatsii razrabotki mnogoplastovykh zalezhei kupola Parsumurun mestorozhdeniya Uzen' [Synergy of geochemistry and concept technology in optimising the development of multi-layer reservoirs in the Parsumurun dome of the Uzen field] N. D. Sarsenbekov et al. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering]. – 2025. – Vol. 336. – No. 6. – P. 59–66 (in Russian)*
12. *A streamline-based production optimization method for waterflooding reservoirs / L. Zhang et al. // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Article 37569 (in English)*

Сведения об авторах:
Садуакасов Д. С., канд. техн. наук, ассоц. профессор, Университет Есенова (г. Актау, Казахстан), *danabek.saduakassov@yu.edu.kz;* https://orcid.org/0000-0003-1248-8747
Баямирова Р. У., канд. техн. наук, ассоц. профессор, Университет Есенова (г. Актау, Казахстан), *ryskol.bayamirova@yu.edu.kz;* https://orcid.org/0000-0003-1588-3144
Тогашева А. Р., канд. техн. наук, ассоц. профессор, Университет Есенова (г. Актау, Казахстан), *aliya.togasheva@yu.edu.kz;* https://orcid.org/0000-0002-5615-2711
Асылбек Р. Т., магистрант, Университет Есенова (г. Актау, Казахстан), *renat.assylbek@yu.edu.kz;* https://orcid.org/0009-0008-5783-6761

Авторлар туралы мәліметтер:
Садуакасов Д. С., техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Есенов университеті (Ақтау қ., Қазақстан)
Баямирова Р. Ұ., техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Есенов университеті (Ақтау қ., Қазақстан)
Тогашева Ә. Р., техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Есенов университеті (Ақтау қ., Қазақстан)
Асылбек Р. Т., магистрант, Есенов университеті (Ақтау қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Saduakassov D. S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Yessenov University (Aktau, Kazakhstan)
Bayamirova R. U., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Yessenov University (Aktau, Kazakhstan)
Togasheva A. R., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Yessenov University (Aktau, Kazakhstan)
Asylbek R. T., Master's student, Yessenov University (Aktau, Kazakhstan)

К 75-ЛЕТИЮ НИЗАМЕТДИНОВА ФАРИТА КАМАЛОВИЧА

3 октября 2026 года исполнилось 75 лет со дня рождения Низаметдинова Фарита Камаловича – доктора технических наук, профессора, академика КазНАЕН и НАГН РК, Президента Союза маркшейдеров Казахстана, члена Президиума Международного маркшейдерского сообщества (ISM), лауреата Премии Совета Министров РК, обладателя звания «Лучший преподаватель вуза».

Низаметдинов Ф. К. является крупным ученым и экспертом, создателем современного научного направления в области маркшейдерско-геомеханического исследования открытых разработок на горнодобывающих предприятиях. Выпускник Карагандинского политехнического института Фарит Камалович посвятил более 49 лет подготовке высококвалифицированных специалистов для казахстанской индустрии, он восстановил научную школу маркшейдеров-геомехаников, которую создал в свое время член-корреспондент НАН РК Попов И. И., и на данный момент поддерживает образование новой геодезической школы с применением цифровых технологий измерений. Под его научным руководством выполнены актуальные научные исследования по обоснованию параметров устойчивых откосов уступов и бортов карьеров и разработке прогрессивных методов мониторинга их состояния на более чем 30 месторождениях, таких как Соколовское, Сарбайское, Качарское, Васильковское, Николаевское, Коунрадское, Жезказганское, Варваринское, Коктасжальское и другие.

Низаметдинов Ф. К. подготовил 6 докторов и 17 кандидатов технических наук, а также 6 докторов философии (Ph.D), которые успешно применяют цифровые технологии в научных исследованиях и учебном процессе. Кроме того, он создал на базе университета Центр геосканирования, оснащенный уникальным комплексом оборудования и лицензионным программным обеспечением мирового уровня.

Перспективы науки определяются ведущими научными школами. На современном этапе, когда научные и научно-технические проблемы требуют объединения усилий ученых, роль научных школ становится все более важной. Научная школа – сообщество исследователей, сконцентрированных вокруг крупного ученого, генератора идей, который обладает особыми исследовательскими и человеческими качествами. Таким ученым, объединившим большую группу соратников, докторантов, магистрантов и студентов, и является профессор Низаметдинов Ф. К.

За 20 лет руководства кафедрой маркшейдерского дела и геодезии Фарит Камалович полностью обновил материально-техническую базу: приобретены и реализованы в научных исследованиях при выполнении хоздоговорных работ для горнодобывающих предприятий и в учебном процессе цифровые и лазерные технологии с применением электронных тахеометров, рулеток и навигационных спутниковых систем, сканеров и программные продукты. Созданы специализированный компьютерный класс и лаборатория автоматизации маркшейдерско-геодезических измерений. На системной основе повышалась остепененность, педагогическая и производственная квалификация преподавателей. Следует отметить, что 10 сотрудников кафедры стали обладателями звания «Лучший преподаватель вуза РК».



В связи с потребностями горного, строительного и нефтегазопромыслового производства в республике открыта подготовка специалистов по направлению «Геодезия и картография», а по запросам производства новые специальности бакалавриата, магистратуры и докторантуры Ph.D: Маркшейдерское дело, Геотехника и Цифровая аэрофотосъемка. Установлены тесные связи кафедры с горнодобывающими предприятиями, в числе которых: ТОО «Корпорация Казахмыс», АО «ССГПО», АО «Жайремский ГОК», АО «Алтынтау Кокшетау», АО «Алтай полиметаллы» и др. Кафедра успешно сотрудничает с фирмой «Leica Geosystems» (Швейцария) и ведущими техническими университетами Германии, Чехии, России и Узбекистана.

За годы плодотворной научно-педагогической деятельности Низаметдинов Ф. К. разработал и опубликовал свыше 200 научных и учебно-методических трудов, включая изобретения, монографии, высокорейтинговые научные статьи, учебники.

При всей загруженности научно-педагогической и административно-управленческой деятельностью профессор Низаметдинов Ф. К. с 2011 г. организовывает и проводит Съезды и Международные Форумы маркшейдеров в РК на базе КарТУ им. Абылкаса Сагинова. Его неустанными усилиями осуществлено объединение всех маркшейдеров горнодобывающих предприятий Республики Казахстан в профессиональный Союз, который включается в международное маркшейдерское движение. Президент Союза маркшейдеров РК Низаметдинов Ф. К. избран в члены Международного Президиума (ISM), академиком Казахстанской Национальной академии естественных наук, национальных академий горных наук РК и РФ.

За активное и плодотворное участие в научной и педагогической деятельности он награжден дипломами 1 степени ВДНХ Казахской ССР и 2 степени ВДНХ СССР, серебряной медалью ВДНХ СССР, дипломом Лауреата Премии Совета Министров Казахской ССР в области науки и техники, отмечен Почетной грамотой МОН РК, нагрудным знаком «За заслуги в развитии науки в РК», благодарностями от ряда министерств, дважды удостоен звания «Лучший преподаватель вуза РК».

Поздравляем профессора Низаметдинова Ф. К. с юбилеем и желаем ему здоровья, счастья и новых творческих успехов в научно-педагогической деятельности!

Редакция и коллеги сердечно поздравляют Фарита Камаловича Низаметдинова с юбилеем, желают крепкого здоровья, благополучия, творческого долголетия и новых научных достижений!

К 55-ЛЕТИЮ МИЛЕТЕНКО НАТАЛЬИ АЛЕКСАНДРОВНЫ

26 октября 2026 года исполнилось 55 лет Наталье Александровне Милетенко — известному российскому ученому в области геомеханики и управления гидрогеомеханическими процессами, специалисту в сфере рационального освоения недр и охраны окружающей среды, талантливому организатору науки и популяризатору научных знаний, кандидату технических наук, старшему научному сотруднику Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН.

Научная деятельность Натальи Александровны посвящена решению одной из важнейших задач современного недропользования — обеспечению безопасности горных работ, сохранению водных объектов и минимизации негативного воздействия горнодобывающей промышленности на окружающую среду. Ее исследования направлены на развитие научных основ управления гидрогеомеханическими процессами при освоении недр, совершенствование методов оценки техногенного воздействия на массив горных пород и разработку природоохранных решений, учитывающих сложное взаимодействие геологических, гидрогеологических, горнотехнических и экологических факторов.

Значительное место в научном наследии Н. А. Милетенко занимает развитие комплексного подхода к решению геомеханических задач, основанного на принципах системности, междисциплинарности и инновационности. В ее трудах впервые представлена научно обоснованная классификация условий подработки водных объектов, позволяющая дифференцированно выбирать методы управления гидрогеомеханическими процессами с учетом природных и техногенных особенностей территорий. Разработанные ею научные положения и природоохранные мероприятия направлены на предупреждение негативных последствий горных работ и сохранение окружающей среды в районах освоения минеральных ресурсов.

Высокая научная значимость исследований Натальи Александровны получила признание профессионального сообщества. В 2005 году она была удостоена медали РАН имени М. В. Ломоносова в области наук о Земле — высшей ведомственной награды для молодых ученых. В последующие годы ее профессиональные достижения отмечены ведомственными и отраслевыми наградами, в том числе наградами Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации и Союза маркшейдеров России. В 2022 году Н. А. Милетенко стала победителем конкурса WIM Russia «Талантливая женщина в добывающей отрасли» в номинации «Золотая идея года» за популяризацию научных знаний среди школьников и молодых ученых в области наук о Земле и охраны окружающей среды.

Важным направлением ее профессиональной деятельности является совершенствование нормативно-методического обеспечения горных работ. Наталья Александровна внесла личный вклад в подготовку отраслевых методических документов, в том числе по определению параметров опасных зон на горных предприятиях АК «АЛРОСА» и организации комплексного горно-экологического мониторинга при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей. Она является автором 136 научных трудов, включая шесть патентов и учебник «Геомеханика» для высших учебных заведений. Результаты ее исследований были включены в материалы XIII Международного форума «Экология 2022», организованного при участии Государственной Думы и Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации.

Особое место в деятельности Натальи Александровны занимает развитие международного научного сотрудничества, прежде всего с учеными и научно-образовательными организациями Республики Казахстан. На протяжении многих лет она последовательно укрепляет профессиональные связи между российским и казахстанским научными сообществами, содействуя обмену исследовательским опытом, распространению научных знаний и развитию сотрудничества в области наук о Земле, горного дела и охраны окружающей среды.

Значимым направлением этой работы стало взаимодействие с Институтом горного дела имени Д. А. Кунаева — одним из известных научных центров Казахстана в области горного дела и освоения минеральных ресурсов. Участие Н. А. Милетенко в совместных международных научных мероприятиях, проводимых при участии ИГД им. Д. А. Кунаева, способствует укреплению профессионального диалога между российскими и казахстанскими специалистами, обсуждению актуальных проблем горной науки и поиску подходов к рациональному использованию природных ресурсов. Такие контакты имеют особое значение в условиях возрастающих требований к экологической безопасности горных работ, сохранению природных комплексов и внедрению научно-обоснованных технологий освоения недр.



Сотрудничество Н. А. Милетенко с ведущими вузами Казахстана в качестве приглашенного лектора способствует обмену научным опытом, распространению передовых знаний в области геомеханики и экологически безопасного недропользования, а также укреплению научно-образовательных связей. Н. А. Милетенко активно участвует в международных научных инициативах, объединяющих ученых разных поколений и научных школ, внося значительный вклад в развитие сотрудничества между Россией и Казахстаном. Ее плодотворная деятельность отмечена Благодарственным письмом Фонда Первого Президента Республики Казахстан.

Н. А. Милетенко вносит значительный вклад в развитие научного сотрудничества и поддержку молодых исследователей. В 2002–2019 годах она возглавляла Совет молодых ученых и специалистов ИПКОН РАН, выступила организатором Международной школы «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», а с 2014 года является заместителем председателя Международной научной школы академика РАН К. Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр». В 2002–2012 годах входила в Совет молодых ученых РАН, координируя работу по Отделению наук о Земле, и продолжает участвовать в деятельности Ученого совета ИПКОН РАН.

Особое внимание Наталья Александровна уделяет популяризации науки: с 2009 года проводит научно-просветительские лекции для школьников, посвященные наукам о Земле, охране водных ресурсов и экологической безопасности недропользования, а также координировала программу «Молодые ученые России» на телеканале «Просвещение», в рамках которой подготовлено более 40 передач. С 2021 года она является ученым секретарем редакционной коллегии журнала «Маркшейдерия и недропользование».

Многогранность Н. А. Милетенко проявляется и в литературном творчестве: она — член Союза писателей России, автор трех поэтических сборников и слов Гимна Ассоциации женщин современной индустрии. В своих произведениях она обращается к темам патриотизма и шахтерского труда, сочетая творческую деятельность с просветительскими и гуманитарными инициативами.

Профессиональный путь Натальи Александровны — пример преданности науке, активной гражданской позиции и стремления передавать знания новым поколениям.

Коллектив Института горного дела им. Д. А. Кунаева сердечно поздравляет Наталью Александровну Милетенко с прекрасным юбилеем! Желаем крепкого здоровья, благополучия, неиссякаемой энергии, вдохновения и новых достижений, женского счастья, душевной гармонии, любви и тепла близких людей! Пусть научные идеи воплощаются в жизнь, международное сотрудничество развивается, а преданность избранному делу приносит удовлетворение, признание коллег и новые поводы для гордости!

Бояндинова Асия Адылкановна,
Ученый секретарь Института горного дела им. Д. А. Кунаева
РГП «НЦ КПМС РК»,
доктор технических наук, доцент