

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 30.08.2026 г.

Отпечатано:

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

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



INTERRIN

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:

Барменишинова 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)

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

Yeneneh A.M., ассоц. профессор (Оман)

® – статья на правах рекламы

① – информационное сообщение

 – статья публикуется в авторской редакции

3	Колонка главного редактора
	Новости ESAB в Центральной Азии
4	Пробьем, наплавим, прострожим: ESAB предлагает линейку электродов для всех этапов металлообработки
8	От забоя до фабрики: как меняется износ оборудования на пути руды
	Геотехнология
	<i>А. А. Бояндинова, *Ж. А. Адилханова</i>
11	Оценка и прогнозирование дополнительных затрат при капитальном ремонте производственных активов геотехнологических комплексов
	Геология
	<i>*М. Е. Sanatbekov, S. K. Muratova, R. K. Smabaeva, E. Zh. Omirzakova</i>
16	Comprehensive analysis of petroleum source rocks and the conditions of hydrocarbon generation and migration in the Zaysan depression
	<i>Ж. С. Кенжетасов, *К. С. Тогизов, Қ. А. Жапабаев</i>
25	Редкоземельные элементы как геохимические индикаторы типизации урановых руд Казахстана
	Геодезия
	<i>М. Amirkhanov, *Y. Zhakypbek, N. Mukhambetzhanova, Sun Hao</i>
31	Spatial and temporal analysis of the dynamics of surface water changes in Makat and Zhylyoi districts
	<i>*Ж. М. Нукарбекова, Ш. К. Айтказинова, А. А. Бек, Н. А. Милетенко</i>
39	Заманауи геотехника әдістері – жер қойнауын игеру қауіпсіздігін қамтамасыз етудің тиімді бағыты
	Геомеханика
	<i>Ж. С. Саркулова, *Н. В. Матвиенко, К. Т. Зикирова, А. Г. Гусманова</i>
45	Оценка природного поля напряжений массива горных пород Суздальского месторождения методом измерительного гидроразрыва
	<i>Г. Мейрамбек, Карел Вах, *Л. Қ. Адильбекова, А. Н. Нуржусупова</i>
53	GB-SAR мониторингі деректері және геомеханикалық модельдеу негізінде жыныс массивінің деформациялық жағдайын кешенді талдау
	<i>С. Н. Шапошник, *Ж. М. Асанова, А. Н. Есендосова, Н. Б. Керімбаева</i>
59	Геомеханическая характеристика и оценка структурной нарушенности массива горных пород Иртышского месторождения
	<i>Д. А. Шокарев, *И. Д. Арыстан, А. А. Рахимберлина, Ж. Ж. Шильмагамбетова</i>
67	Геомеханическое обоснование технологии заполнения закрепных пустот в условиях сильнотрещиноватого массива горных пород
	Горные машины
	<i>Д. Д. Басканбаева, К. К. Елемесов, *Е. Е. Сарыбаев, С. М. Аппазова</i>
74	Маймен толтырылған бұрандалы компрессордағы жылу-масса алмасу және конденсацияны модельдеу
	Геоэкология
	<i>Е. А. Пешковская, *Н. К. Цой, Н. В. Матвиенко, А. С. Нурмаганбетова</i>
81	Экологическая оценка добычи нерудных полезных ископаемых
88	Требования к оформлению и условия предоставления статей

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



**Марат
Жакупович
Битимбаев**
главный редактор

*Дорогие читатели!
Уважаемые члены редколлегии!*

Наступил последний месяц лета, которое было полно событий, по своей важности в первую очередь для экономики нашего государства, для нашего благополучия и в создании работающего содержания нового Казахстана не имеющих прецедентов в новейшей истории.

В августе, выбрав состав нового однопалатного Парламента, названного историческим словом «Курултай», страна должна обрести Законодательный орган не только нового состава, но и нового качества в соответствии с требованиями «государства для народа».

Одним из нововведений, которое стремительно превращается в привычный образ жизни, является разработка, создание и внедрение искусственного интеллекта (ИИ). Он должен не просто упрощать жизнь казахстанцев, а коренным образом улучшить решение всех вопросов человеческих желаний в его взаимоотношениях с государством и между собой. Основной принцип новой модели: «Не человек должен искать, а его должны искать, находить, помогать, делать его жизнь проще, его самого – удовлетворенным». Первый шаг в этом направлении – это перевод сферы предоставления государственных услуг на портале «Электронное правительство» на новую платформу eGov 3.0, исключающую излишние шаги и документы. Уже доступны через диалоговое окно цифрового ассистента eGov Gpt 50 услуг. Этот помощник сам оформляет требуемую заявку и выдает готовый результат, и его обязанности до конца года возрастут до 150 услуг. Единый сквозной процесс предоставления цифровых услуг гражданам должен быть переведен на новую единую платформу QazTech. Мы говорим в первую очередь о роли ИИ в улучшении социального благополучия.

Конечно, для нас также особенно важны принципы и конструкции технологических решений ИИ по организации открытых и подземных горных работ, благодаря которым будет создана управляемая безопасность всего комплекса горных работ, обеспечена полнота извлечения полезных компонентов, снижена себестоимость и повышена производительность труда. Достижение оптимального сочетания этих технико-экономических показателей будет означать переход к «созидательному освоению недр». Его технологии позволяют пользоваться значительно увеличенными запасами полезных ископаемых (в первую очередь металлов) за счет снижения минимального промышленного содержания и расширения границ извлекаемого оруденения, создавая искусственно за счет антропогенных факторов рабочий режим ресурсовоспроизводства и ресурсосбережения при сохранении качественной природной среды.

Следующая страница новой истории освоения недр будет открываться созданием природно-техногенной сырьевой базы металлов, которая будет действовать в формате взаимосвязанного совокупного производства металлов в бесконечном восстановительно-производственном цикле из природной (геологической) среды недр и техногенной среды «второй природы» вне недр.

Институциональная модель экономического управления такой сырьевой базы является основой управляемого воспроизводства ресурсов, закрывающей предрекаемый коллапс мировой экономики из-за ожидаемого истощения недр.

Вопрос на этом закрыт, есть программа, пути решения которой в своей реализации предприятия получают для своего развития в нашей стране благодаря ярко выраженной политике, заявленной Президентом К.-Ж. Токаевым в качестве плацдарма нашего движения в XXI веке, действенную поддержку.

Продолжим создание механизмов научного предвидения, начатого нами, в публикациях в следующих номерах нашего журнала, а концовку колонки посвятим празднованию Дня шахтера 30 августа (в последнее воскресенье этого месяца). Этот праздник был рожден 10 сентября 1947 года по предложению Министерства угольной промышленности (Министр А. Ф. Засядько и его заместитель Д. Г. Оника), первый раз был отмечен 29 августа 1948 года) и с тех пор мы продолжаем поздравлять друг друга и желать «счастливого выхода наверх после трудового дня, достойной зарплаты и полных вагонов, автосамосвалов, скипов, поднимающих и доставляющих на-гора угля и руды».

Праздник в этом году знаменателен тем, что 23 августа мы выбираем состав нового Парламента – Курултая, который, конечно, мы тоже поздравляем и с состоявшимися выборами, и с праздником – Днем шахтера.

ПРОБЬЕМ, НАПЛАВИМ, ПРОСТРОЖИМ: ESAB ПРЕДЛАГАЕТ ЛИНЕЙКУ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ВСЕХ ЭТАПОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Износ деталей, дефекты сварки, необходимость пробивать отверстия в толстом металле – задачи, с которыми ежедневно сталкиваются специалисты на производственных площадках промышленной отрасли. ESAB – один из мировых лидеров в области сварочных инструментов – предлагает несколько видов электродов для металлообработки. С их помощью можно убрать изъяны, сделать отверстие или наплавку изношенной детали. Все они работают от стандартных сварочных источников и не требуют дополнительного оборудования.

Региональный масштаб отрасли подтверждает статистика за 2024 год. В Казахстане горнодобывающая промышленность выпустила продукции на 22,9 трлн тенге – 44,5% всего промышленного производства страны; добыча угля при этом выросла на 3,4%, прочих металлических руд – на 7,8%. В Узбекистане объем горнодобывающей промышленности и разработки карьеров достиг 70,2 трлн сумов. Эти данные отражают масштаб горнодобывающей промышленности региона, где простой техники влияет на темпы производства, а возможность оперативного ремонта становится важным условием стабильной работы предприятий.

Удаление дефектов без газа и плазмы

Одна из самых частых операций при ремонте металлоконструкций – строжка металла для зачистки сварных швов, литейных раковин, дефектов и трещин. Обычно для таких работ используют угольный электрод, плазменную или газовую горелку. Методы эффективны, но требуют специального оборудования: баллонов с газом, компрессоров, специальных держателей. Все это не удобно, если важна мобильность и компактность, например, при работе на монтажной или строительной площадке.

Электроды EWAC GOUGETEC решают эту проблему: они работают от обычного сварочного источника с постоянным или переменным током, а для их использования достаточно стандартного сварного аппарата и электрододержателя. Ни кислорода, ни сжатого воздуха, ни объемных баллонов не требуется. Компактность инструмента позволяет работать в труднодоступных местах, куда сложно добраться, например, газовой горелкой. Работать можно в любом пространственном положении: нижнем, вертикальном или потолочном.

Таким типом электрода можно не только удалять дефекты, но и вести полноценную резку металла, а также работы по ремонту чугуна – сплава, который повсеместно встречается в горнопромышленном оборудовании и машиностроении. Электрод эффективно выжигает грязь и масло, которые скапливаются в порах чугуна, оставляя чистую канавку, готовую к сварке.

Такое сочетание мобильности и универсальности особенно актуально для распределенной производственной инфраструктуры Центральной Азии. Чем дальше ремонтная точка находится от стационарной мастерской, тем

выше практическая ценность технологии, которая позволяет использовать уже имеющийся сварочный источник и не требует доставки газовых баллонов или компрессора. Это не исключает плазменную и газовую строжку, но дает ремонтной бригаде дополнительный вариант для срочных работ непосредственно на площадке.

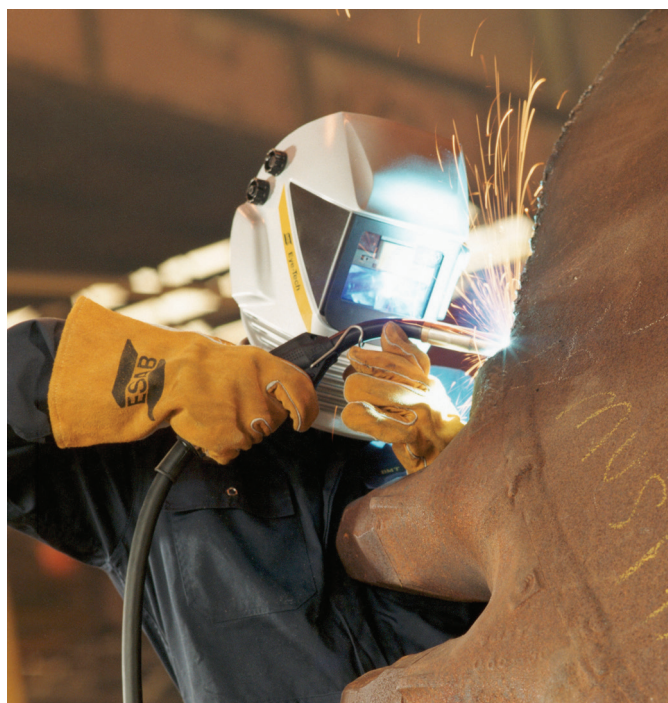
Точная и экономичная пробивка отверстий

Решить еще одну распространенную задачу – пробить ровное отверстие в металле помогут электроды EWAC Pierce. В этой области у них есть несколько конкурентных преимуществ. Прежде всего, они позволяют делать отверстия в металле большой толщины: электродом диаметра 5 мм можно пробить лист до 75 мм, а диаметром 4 мм – до 40 мм. При этом кромка получается более ровной, чем при использовании газового или плазменного резака.

Пробивку металла часто проводят плазмой, но этот способ не самый экономичный. Наибольший износ сопла и электрода плазменной горелки происходит именно в момент первичного прожига отверстия – расплавленный металл разлетается и портит расходные материалы и элементы плазматрона. Используя электрод EWAC Pierce для стартовой пробивки, можно продлить срок службы дорогостоящих плазменных расходников.

EWAC Pierce также работает от обычного сварочного источника без необходимости в сжатом воздухе, кислороде или газе. Кроме того, электродом можно не только пробивать отверстия, но и вести полноценную резку металла.

Спрос на быстрые монтажные и ремонтные операции поддерживает инвестиционный цикл в горной промышлен-





ленности региона. В Казахстане в 2024 году на добычу полезных ископаемых пришлось 3,65 трлн тенге, или 18,7% всех инвестиций страны в основной капитал. В Узбекистане инвестиции в горнодобывающую промышленность достигли 61,8 трлн сумов против 36,4 трлн сумов годом ранее. Расширение и модернизация производственных мощностей увеличивают объем работ по монтажу, адаптации и ремонту толстостенных металлоконструкций. Поэтому возможность выполнять стартовую пробивку обычным сварочным аппаратом и экономить ресурс плазменных расходников может рассматриваться как один из инструментов контроля эксплуатационных затрат.

Наплавка в условиях абразивного износа

Для деталей, работающих в условиях абразивного износа, ESAB предлагает электроды T-590, предназначенные специально для наплавки. Наплавочный слой отличается стойкостью к абразивному воздействию и ударным нагрузкам и, что немаловажно, соответствует требованиям ГОСТ по химическому составу. Сварка на малых токах минимизирует перемешивание наплавляемого металла с основным, сохраняя исходные свойства детали.

Электроды T-590 позволяют решить одну из самых актуальных задач – продлить срок службы оборудования, которое работает в условиях постоянного трения. Они уже зарекомендовали себя на предприятиях гражданского строительства, в сервисных компаниях по ремонту горно-шахтного оборудования и на других производствах.

Динамика добывающей промышленности Кыргызста-

на и Таджикистана также показывает, почему продление ресурса деталей становится системной задачей. В Кыргызстане в 2024 году добыча полезных ископаемых выросла на 4%, а ее доля в промышленном производстве увеличилась с 5,5% в 2020 году до 10,7% в 2024 году. Добыча металлических руд за год выросла на 5%, угля – на 3,6%. В Таджикистане объем добывающей промышленности увеличился на 43%, добыча металлических руд – в 1,5 раза, а каменного угля – с 1,95 млн до 2,49 млн тонн. Рост объемов извлекаемой и перемещаемой горной массы означает дополнительную нагрузку на ковши, желоба, элементы дробильного оборудования и другие детали, контактирующие с абразивными материалами. В таких условиях наплавка становится не только способом аварийного восстановления, но и частью планового технического обслуживания.

«Горнодобывающие предприятия Центральной Азии часто работают на удаленных территориях, поэтому ремонтные решения должны сочетать надежность и мобильность. Наша линейка электродов охватывает ключевые задачи технического обслуживания оборудования: наплавку, пробивку отверстий, устранение дефектов металла и подготовку поврежденных участков к сварке. Возможность выполнять эти работы непосредственно на карьерах, рудниках и монтажных площадках помогает сократить объем вспомогательного оборудования, упростить ремонт и быстрее вернуть технику в эксплуатацию», – отметила Екатерина Татарина, руководитель региона ESAB Центральной Азии, директор ТОО «ESAB Казахстан».

БОЛЬШЕ, ЧЕМ ПОСТАВЩИК

КАК КОМПАНИЯ, КОТОРАЯ ПРОИЗВОДИТ РУКАВА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, ПЕРЕОПРЕДЕЛЯЕТ ПОНЯТИЕ СЕРВИСА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ С ПАРКОМ ДО ПЯТИСТА ЕДИНИЦ ТЕХНИКИ НА ОДНОМ СЕРВИСНОМ УЧАСТКЕ — И ПОЧЕМУ ЕЁ КЛИЕНТЫ ПОЛУЧАЮТ ЭФФЕКТ, СОПОСТАВИМЫЙ С ПОКУПКОЙ НОВЫХ МАШИН.

EUROHYDROSERVICE — СЕРВИСНАЯ КОМПАНИЯ ПОЛНОГО ЦИКЛА

ОТ ПРОДАЖИ К ПАРТНЁРСТВУ

НА РЫНКЕ РВД И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ДАВНО СЛОЖИЛСЯ ПРИВЫЧНЫЙ СЦЕНАРИЙ: КУПИЛИ — ПРОДАЛИ — ЗАБЫЛИ. КЛИЕНТ ОСТАЁТСЯ ОДИН НА ОДИН С ПАРКОМ ТЕХНИКИ, АВАРИЙНЫМИ ПРОСТОЯМИ И ПОИСКОМ ТОГО, КТО ЗАВТРА УТРОМ ПРИВЕЗЁТ НУЖНЫЙ РУКАВ ИЛИ КОМПОНЕНТ В НУЖНОЙ СБОРКЕ. EUROHYDROSERVICE ВЫСТРАИВАЕТ ДРУГУЮ БИЗНЕС МОДЕЛЬ СО СВОИМИ КЛИЕНТАМИ.

ЧТО ЭТО ДАЁТ В МАСШТАБЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

КОГДА ЭТИ ПОКАЗАТЕЛИ СКЛАДЫВАЮТСЯ НА УРОВНЕ ВСЕГО ПАРКА, КАРТИНА СТАНОВИТСЯ ЕЩЁ НАПЯДНЕЕ: СОКРАЩЕНИЕ ПРОСТОЕВ **НА 79%** И ВЫСВОБОЖДЕНИЕ БОЛЕЕ **11 000 МОТО-ЧАСОВ** ПОЛЕЗНОЙ РАБОТЫ В ГОД, ИЗ РАСЧЕТА НА 200 ЕДИНИЦ ТЕХНИКИ. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРКА НА **0,83%** — ЭТО НЕ АБСТРАКТНЫЙ ПРОЦЕНТ. ПО ЭКОНОМИЧЕСКОМУ СМЫСЛУ **ОН СОПОСТАВИМ С ВВОДОМ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ДВУХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ ТЕХНИКИ — БЕЗ ИНВЕСТИЦИЙ В ИХ ПРИОБРЕТЕНИЕ.** ДВЕ МАШИНЫ, КОТОРЫЕ КЛИЕНТ ПОЛУЧАЕТ НЕ ИЗ САЛОНА, А ИЗ ГРАМОТНО ВЫСТРОЕННОГО СЕРВИСА.

ЧТО ЗНАЧИТ «СЕРВИС ПОЛНОГО ЦИКЛА» В ЦИФРАХ

В ГОРИЗОНТЕ **6–24 МЕСЯЦЕВ** ПОСЛЕ ВНЕДРЕНИЯ НАШЕЙ СЕРВИСНОЙ МОДЕЛИ КЛИЕНТ ПОЛУЧАЕТ:

- СНИЖЕНИЕ ДОЛИ ПРОСТОЕВ ИЗ-ЗА ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ РВД — **ДО 10%;**
- РОСТ ОБЩЕГО КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ ТЕХНИКИ НА **0,77–1%;**
- СОКРАЩЕНИЕ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ПРОСТОЯ ИЗ-ЗА АВАРИЙНОГО ВЫХОДА РВД НА ОДНУ ЕДИНИЦУ ТЕХНИКИ — **ДО 70%;**
- ПРИРОСТ ОБЩЕГО ФОНДА РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ ПАРКА — **+10 000 МОТО-ЧАСОВ;**
- ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПРИРОСТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПАРКА — **+0,83%.**

ОДИН СЕРВИСНЫЙ УЧАСТОК EUROHYDROSERVICE СПОСОБЕН ОБСЛУЖИВАТЬ ПАРК ДО 500 ЕДИНИЦ ТЕХНИКИ. И ДЕЛО НЕ В МАСШТАБЕ КАК ТАКОМ, А В ТОМ, ЧТО ЭТОТ РЕСУРС МЫ ПЕРЕВОДИМ В ИЗМЕРИМЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ДЛЯ КЛИЕНТА.



ПРОДАННЫЙ РУКАВ — ЭТО не финал сделки, а её НАЧАЛО

КАК УСТРОЕНА НАША УНИКАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

ЗА ЭТИМИ ЦИФРАМИ СТОИТ ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ И СЕРВИСНАЯ ДИСЦИПЛИНА.

МОНИТОРИНГ РУКАВОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ.

КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫЙ НА ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПРОСТОЕВ ТЕХНИКИ ИЗ-ЗА АВАРИЙНОГО ВЫХОДА РВД ИЗ СТРОЯ: ВИЗУАЛЬНЫЙ ОСМОТР РУКАВОВ НЕПОСРЕДСТВЕННО НА ТЕХНИКЕ, ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ, КОНТРОЛЬ СВОЕВРЕМЕННОЙ ЗАМЕНЫ ДО ТОГО, КАК РУКАВ ОТКАЖЕТ, И КОНТРОЛЬ СРОКА СЛУЖБЫ КАЖДОГО РУКАВА. МЫ ЗАМЕНЯЕМ РЕАКТИВНУЮ ЛОГИКУ — «СЛОМАЛОСЬ — ВЕЗЁМ» — НА ПРЕДИКТИВНУЮ: РУКАВ УХОДИТ В ЗАМЕНУ ТОГДА, КОГДА ЭТО ЭКОНОМИЧЕСКИ ВЫГОДНО КЛИЕНТУ, А НЕ ТОГДА, КОГДА ТЕХНИКА УЖЕ ВСТАЛА.



ОПЕРАТИВНЫЙ ЗАПАС РУКАВОВ В СОБРАННОМ ВИДЕ



ВСЕ РУКАВА КЛАССИФИЦИРУЮТСЯ ПО КАТЕГОРИЯМ А, В, С. КАТЕГОРИЯ А — САМЫЕ ВОСТРЕБОВАННЫЕ РУКАВА, ТРЕБУЮЩИЕ КРАТЧАЙШИХ СРОКОВ ЗАМЕНЫ: ХРАНЯТСЯ В СОБРАННОМ ВИДЕ, УПАКОВАНЫ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПАКЕТЫ, ПРЕДОТВРАЩАЮЩИЕ ЗАСОРЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ. КАТЕГОРИИ В И С — СКЛАДСКОЙ ЗАПАС КОМПЛЕКТУЮЩИХ, ПОДОБРАННЫЙ ПОД СПЕЦИФИКУ КОНКРЕТНОГО ПАРКА КЛИЕНТА. ЭТО ИНЖЕНЕРНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СКОРОСТИ: РУКАВ КАТЕГОРИИ А НЕ НУЖНО СОБИРАТЬ, ЕГО НУЖНО УСТАНОВИТЬ.

ЛАЗЕРНАЯ МАРКИРОВКА ГОТОВОГО ИЗДЕЛИЯ

КАЖДЫЙ ИЗГОТОВЛЕННЫЙ РУКАВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ МАРКИРУЕТСЯ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВОЧНОЙ МАШИНЫ. МАРКИРОВКА — ЭТО ПАСПОРТ ИЗДЕЛИЯ И ТОЧКА ВХОДА В ЦИФРОВОЙ КОНТУР УЧЁТА.



ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ESM — EUROHYDROSERVICE SMART MONITORING

ИНФОРМАЦИЯ О КАЖДОМ РУКАВЕ ЗАНОСИТСЯ В СОБСТВЕННУЮ ИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ ESM. СИСТЕМА ОБЕСПЕЧИВАЕТ БЫСТРОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОВТОРНЫХ И АНАЛОГИЧНЫХ РУКАВОВ, КОНТРОЛЬ ХОДИМОСТИ КАЖДОГО ИЗДЕЛИЯ И АНАЛИТИКУ ПО ГАРАЖНОМУ НОМЕРУ ТЕХНИКИ. СОТРУДНИКИ КЛИЕНТА ПОЛУЧАЮТ ДОСТУП К ESM ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ АНАЛИТИКИ, УЧЁТА И КОНТРОЛЯ ПАРКА РВД. ЭТО ОЗНАЧАЕТ ПРОЗРАЧНОСТЬ — КЛИЕНТ ВИДИТ НЕ «ЗАКРЫВАЮЩИЕ ДОКУМЕНТЫ», А РЕАЛЬНУЮ КАРТИНУ РАБОТЫ РУКАВОВ НА СВОЕЙ ТЕХНИКЕ.



ПОЧЕМУ ЭТО И ЕСТЬ ПОЛНЫЙ ЦИКЛ

ПОЛНЫЙ ЦИКЛ В НАШЕМ ПОНИМАНИИ — ЭТО ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР:

ПОДБОР И ИЗГОТОВЛЕНИЕ → ЛАЗЕРНАЯ МАРКИРОВКА → ВНЕСЕНИЕ В ESM → РАЗМЕЩЕНИЕ В ОПЕРАТИВНОМ ЗАПАСЕ ПО КАТЕГОРИЯМ А/В/С → МОНИТОРИНГ НА ТЕХНИКЕ КЛИЕНТА → ПРЕДИКТИВНАЯ ЗАМЕНА → АНАЛИТИКА ХОДИМОСТИ → КОРРЕКТИРОВКА ЗАПАСА И СТРАТЕГИИ ЗАМЕНЫ.

ВНУТРИ ЭТОГО КОНТУРА НЕТ МЕСТА ДЛЯ КЛАССИЧЕСКОЙ «ДЫРЫ» МЕЖДУ ПОСТАВКОЙ И ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ — ТОЙ САМОЙ, В КОТОРОЙ ОБЫЧНО И ВОЗНИКАЮТ АВАРИЙНЫЕ ПРОСТОИ.

EUROHYDROSERVICE — ЭТО КОМПАНИЯ, ДЛЯ КОТОРОЙ ПРОДАННЫЙ РУКАВ НЕ ФИНАЛ СДЕЛКИ, А ЕЁ НАЧАЛО. МЫ ДЕЛАЕМ СЕРВИС ПОЛНОГО ЦИКЛА, ПОТОМУ ЧТО ИМЕННО В ЭТОМ ЦИКЛЕ — А НЕ В ОТДЕЛЬНОЙ ПОСТАВКЕ — ЗАКЛЮЧАЕТСЯ РЕАЛЬНАЯ ЦЕННОСТЬ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕГО ТЕХНИКУ.

ЧТО ПОЛУЧАЕТ КЛИЕНТ

КЛИЕНТ EUROHYDROSERVICE ПОКУПАЕТ НЕ РУКАВ. ОН ПОКУПАЕТ:

- 1 ГОТОВНОСТЬ ТЕХНИКИ — ИЗМЕРИМУЮ В КГТ И МОТО-ЧАСАХ;
- 2 СКОРОСТЬ РЕАКЦИИ — ЗА СЧЁТ СОБРАННОГО ЗАПАСА КАТЕГОРИИ А И КОНСИГНАЦИОННОГО СКЛАДА КАТЕГОРИЙ В И С;
- 3 ПРОЗРАЧНОСТЬ — ЗА СЧЕТ СИСТЕМЫ ESM И КЛИЕНТСКОГО ДОСТУПА;
- 4 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ — ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ВВОДУ НОВЫХ ЕДИНИЦ ТЕХНИКИ БЕЗ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ



ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БОЛЕЕ ПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ И ПРОСЧЕТА НАПИШИТЕ НАМ НА INFO@EHS.KZ

ОТ ЗАБОЯ ДО ФАБРИКИ: КАК МЕНЯЕТСЯ ИЗНОС ОБОРУДОВАНИЯ НА ПУТИ РУДЫ

Крупные фрагменты породы, падающие в ковш или кузов самосвала, мелкая руда в перегрузочном желобе, влажный концентрат и горячий сыпучий материал воздействуют на сталь по-разному. На протяжении технологической цепочки меняются размер частиц, скорость их движения, влажность, кислотность и температура. Вместе с ними меняется и механизм износа.

Поэтому выбор материала для горного оборудования начинается с изучения реальных условий его работы. Твердость стали остается важным параметром, однако ресурс детали также зависит от ударной нагрузки, свойств абразива, конструкции узла и производственной среды. Один и тот же материал может обеспечивать разную наработку даже на соседних участках предприятия.

Маршрут меняет нагрузку

В забое и на погрузке оборудование контактирует преимущественно с крупными фрагментами породы. При падении первой порции материала на днище пустого кузова или ковша значительная часть энергии воспринимается непосредственно металлоконструкцией. Возникают вмятины, локальные деформации и риск образования трещин. По мере заполнения кузова характер воздействия меняется: следующие фрагменты сталкиваются с уже загруженной породой, скользят вдоль днища и бортов.

В этих условиях одновременно работают два механизма. Удар требует от стали способности поглощать энергию. Скользящий и режущий абразивный износ предъявляет требования к твердости поверхности. На интенсивность повреждения влияют минералогический состав породы, форма и размер фрагментов, высота падения и угол контакта с металлом.

Особое значение имеет содержание твердых минералов. Например, присутствие кварца способно заметно повысить абразивность руды. При этом состав горной массы может различаться в пределах одного месторождения, поэтому срок службы оборудования иногда меняется вместе с переходом на другой участок добычи. SSAB рекомендует учитывать не только общий тип породы, но и распределение минералов по твердости, а при необходимости использовать результаты рентгенофлуоресцентного и рентгенодифракционного анализа.

Твердость должна выдерживать удар

Для участков, где абразивное воздействие сочетается с ударной и конструкционной нагрузкой, применяется Hardox® 500 Tuf. Сталь имеет твердость 475–505 HBW, высокую прочность и гарантированную ударную вязкость при отрицательных температурах. Такое сочетание по-



Ковш для тяжелых карьерных работ, изготовленный с применением износостойкой стали Hardox® 500 Tuf

зволяет использовать ее в кузовах карьерных самосвалов, ковшах, футеровках и других деталях, которые должны сопротивляться износу и сохранять целостность при падении тяжелых фрагментов.

Hardox® 500 Tuf относится к конструкционным износостойким сталям. В правильно рассчитанной конструкции материал способен выполнять одновременно несущую и защитную функции. Это позволяет оптимизировать толщину листа, количество усиливающих элементов и локальных футеровок. Для предприятий Казахстана важна и способность стали сохранять ударную вязкость в условиях низких сезонных температур.

Выбор толщины при этом остается частью инженерного расчета. На ресурс влияют жесткость основания, распределение нагрузки, состояние сварных соединений, геометрия детали и наличие зон концентрации напряжений. Повышение твердости дает наибольший эффект, когда конструкция соответствует направлению движения материала и характеру ударов.

После дробления – химия

По мере продвижения руды к фабрике крупность материала уменьшается. В дробилках, бункерах и перегрузочных узлах возрастает доля скользящего износа. Мелкие частицы движутся вдоль поверхности, попадают в зазоры, воздействуют на сварные швы и крепления футеровки.

Одновременно может меняться состояние самого сырья. На отдельных этапах появляются вода, соли, сульфаты, хлориды и другие химически активные соединения. Влажная или кислая среда ускоряет окисление металлической поверхности. Абразивные частицы снимают образовавшийся слой, после чего химическое воздействие начинается снова. Совместное действие коррозии и абразива способно разрушать обычную износостойкую сталь быстрее, чем каждый из этих факторов по отдельности.

Для таких условий разработана Hardox® HiAce. По механическим характеристикам материал соответствует классу Hardox® 450 и имеет номинальную твердость 450 HBW. Его химический состав рассчитан на работу в средах, где абразивный износ сопровождается коррозией. Области применения включают кузова и контейнеры для

влажного сырья, бункеры, желоба, перегрузочные узлы и футеровки перерабатывающего оборудования.

По данным SSAB, в коррозионно-абразивной среде срок службы Hardox® HiAce может быть до 2,7 раза выше, чем у стандартной износостойкой стали класса 450 HBW. Конкретный результат определяется кислотностью, температурой, составом абразива, скоростью движения материала и конструкцией оборудования

Температура как часть износа

Дополнительным фактором в горно-металлургической цепочке становится температура. С нагретыми материалами контактируют желоба, приемные бункеры, футеровки и другие элементы оборудования, через которые проходят горячий кокс, продукты обжига и сыпучее сырье. При нагреве традиционные износостойкие стали могут терять твердость, что ускоряет разрушение поверхности. Сочетание температуры, абразива и химически активной среды дополнительно усложняет условия эксплуатации.



Раскаленный кокс коксохимического производства в Окселесунде. Для футеровки оборудования применяется Hardox® HiAce

В марте 2026 года SSAB представила результаты эксплуатации и исследований Hardox® HiAce при повышенных температурах. По данным компании, материал сохраняет износостойкие свойства при температуре как минимум до 400 °С. Это позволяет рассматривать его для деталей, одновременно подвергающихся нагреву, абразивному воздействию и контакту с коррозионными соединениями.

Один из примеров такого применения – коксохимическое производство SSAB в шведском Окселесунде. После выхода из печей раскаленный кокс охлаждается водой и еще горячим поступает на наклонные разгрузочные ramпы. В этих условиях материал одновременно создает абразивную нагрузку и умеренно коррозионную среду. При замене футеровки одной из ramп была использована сталь Hardox® HiAce. После нескольких месяцев работы уровень износа оказался ниже ожидаемого. В металлургическом производстве материал также может применяться в закалочных вагонах, холодильниках, кузовах для перевозки шлака и скребках загрузочных устройств печей.

Карта износа вместо единого решения

Практическая оценка начинается с последовательного обследования маршрута руды. Для каждого узла фиксируются состояние и состав материала, размер и форма частиц, направление движения, высота падения, влажность, pH и рабочая температура. Эти данные сопоставляются с фактическими повреждениями металла и историей ремонтов.

Вмятины и локальные деформации обычно указывают на значительную ударную нагрузку. Продольные борозды и равномерное уменьшение толщины характерны для скользящего абразивного воздействия. Раковины, рыхлые продукты окисления и быстрое истончение металла во влажных зонах могут говорить об участии коррозии. Трещины возле сварных соединений требуют отдельного анализа конструкции и технологии ремонта.

Карта дополняется измерениями остаточной толщины. Ультразвуковой контроль в одних и тех же точках позволяет определить абсолютную скорость износа в миллиметрах на тысячу часов работы или на заданный объем переработанного материала. Такая методика показывает не единичный срок службы детали, а распределение нагрузки по всей конструкции. SSAB рекомендует использовать регулярные замеры толщины для оценки скорости износа и планирования технического обслуживания.

По результатам обследования одна технологическая линия может быть разделена на несколько зон. Hardox® 500 Tuf применяется там, где преобладают удар, абразивное скольжение и конструкционная нагрузка. Hardox® HiAce предназначен для участков, где к абразиву добавляются влага, химически активные соединения или повышенная температура. Локальное использование разных материалов позволяет направлять запас износостойкости в наиболее нагруженные места и точнее планировать межремонтные интервалы.

От анализа к эксплуатации

Ресурс оборудования определяется всей системой: свойствами стали, геометрией детали, направлением потока, состоянием основания, креплением футеровок и качеством изготовления. Ошибка в одном элементе способна ускорить износ соседних зон. Поэтому оценка должна охватывать маршрут материала от места погрузки до последнего перегрузочного или перерабатывающего узла.

Такой подход переводит выбор стали из категории закупочной спецификации в область управления производственным ресурсом. Предприятие получает возможность сопоставлять характер износа с условиями эксплуатации, точнее выбирать материал и контролировать результат по фактической наработке.

Обсудить различия между Hardox® 500 Tuf и Hardox® HiAce, области их применения, требования к изготовлению и ремонту оборудования посетители смогут со специалистами SSAB на выставке Mining and Metals Central Asia 2026. Она пройдет 16–18 сентября в Алматы, стенд SSAB – 9-066.

ВАШ ПАРТНЁР В СВАРКЕ И РЕЗКЕ



almaty.sales@esab.com / esab.com



ПРОБЬЁМ НАПЛАВИМ ПРОСТРОЖИМ

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)

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ АКТИВОВ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. В статье предложен подход к повышению достоверности оценки экономической эффективности геотехнологического комплекса с учетом физического износа основных производственных фондов. Обосновано, что снижение остаточной стоимости оборудования при росте потребности в капитальном ремонте приводит к неполному учету фактических затрат и завышению расчетного экономического эффекта. Разработана методика определения дополнительных затрат на капитальный ремонт изношенных производственных мощностей и их включения в эксплуатационные расходы. Усовершенствована экономико-математическая модель комплекса с учетом затрат на капитальный ремонт. Применение подхода способствует обоснованному принятию решений в области технического перевооружения, капитального ремонта и воспроизводства технологического оборудования, повышая достоверность прогнозирования экономических результатов горнодобывающего предприятия.

Ключевые слова: геотехнологический комплекс, производственные активы, карьер, физический износ, амортизация, капитальный ремонт, эффективность, оценка.

Геотехнологиялық кешендердің өндіріс активтерінің капиталдық жөндеуі кезінде қосымша шығындарды бағалау және болжау

Аңдатпа. Мақалада негізгі өндірістік қорлардың физикалық тозуын ескере отырып, геотехнологиялық кешеннің экономикалық тиімділігін бағалаудың дәлдігін арттыруға арналған тәсіл ұсынылған. Құрылғылардың қалдық құны капиталдық жөндеу қажеттілігінің өсуімен төмендейтіндігінен, фактілік шығындардың толық есепке алынбауына және есептік экономикалық әсердің артуына әкеп соғатыны негізделген. Тозған өндірістік қуаттарды капиталдық жөндеуге қосымша шығындарды анықтау және оларды эксплуатациялық шығындарға енгізу әдістемесі әзірленген. Капиталдық жөндеуге кететін шығындарды ескере отырып, кешеннің экономикалық-математикалық моделі жетілдірілген. Тәсілді қолдану технологиялық жабдықты техникалық қайта жарактандыру, капиталдық жөндеу және қайта өндіру саласында негізделген шешімдер қабылдауға ықпал етіп, тау-кен кәсіпорнының экономикалық нәтижелерін болжаудың дәлдігін арттырады.

Түйінді сөздер: геотехнологиялық кешен, өндірістік активтер, карьер, физикалық тозу, созымдылық, капиталдық жөндеу, тиімділік, бағалау.

Assessment and forecasting of additional costs in the capital repair of production assets of geotechnological complexes

Abstract. This article proposes an approach to improving the reliability of assessing the economic efficiency of a geotechnical complex, taking into account the physical depreciation of fixed assets. It is demonstrated that a decrease in the residual value of equipment with an increasing need for major repairs leads to an incomplete accounting of actual costs and an overestimation of the estimated economic effect. A methodology has been developed for determining additional costs for major repairs of worn-out production facilities and their inclusion in operating expenses. An economic and mathematical model of the complex, taking into account major repair costs, has been improved. Application of this approach facilitates informed decision-making regarding technical re-equipment, major repairs, and replacement of process equipment, increasing the reliability of forecasting the economic performance of a mining enterprise.

Key words: geotechnological complex, production assets, open-pit, physical wear and tear, amortization, capital repair, efficiency, assessment.

Введение

Для горнодобывающих предприятий проблема физического и морального износа основного технологического оборудования приобретает особую значимость в условиях интенсивной эксплуатации техники и необходимости обеспечения устойчивости производственных процессов. Ухудшение технического состояния оборудования сопровождается увеличением вероятности отказов, продолжительности простоев и затрат на техническое обслуживание и капитальный ремонт. В связи с этим актуальной становится задача оценки и прогнозирования дополнительных затрат, возникающих вследствие износа производственных активов геотехнологических комплексов, с учетом их фактического технического состояния и условий эксплуатации.

Проведенный обширный анализ показал, что современные исследования управления производственными активами горнодобывающих предприятий развиваются по нескольким взаимосвязанным направлениям: экономическая оценка деятельности, организация ремонтного производства, цифровой мониторинг технического состояния и прогнозирования отказов оборудования. Исследования [1–2] формируют теоретическую основу оценки затрат, эффективности использования основных средств и прогнозирования экономических показателей, а работы по

ремонтному производству [3] раскрывают организационно-технические аспекты восстановления работоспособности оборудования. Вместе с тем традиционные подходы преимущественно ориентированы на фактические или нормативные показатели затрат и в недостаточной степени учитывают динамику технического состояния производственного оборудования.

Развитие цифровых технологий создает возможности для перехода к управлению техническим обслуживанием на основе эксплуатационных данных. Исследования [4–5] демонстрируют применение автоматизированного мониторинга и IT-технологий для получения информации о состоянии и эксплуатации оборудования, а работы [6–7] показывают возможности прогнозирования отказов и неблагоприятных событий с использованием методов прогнозной аналитики. Основное внимание в данных исследованиях уделяется технической диагностике, мониторингу и прогнозированию отказов, тогда как экономическая оценка их последствий остается недостаточно разработанной. В частности, остается недостаточно раскрытой количественная связь между износом и изменением технического состояния производственного актива, необходимостью капитального ремонта, объемом ремонтных работ и величиной дополнительных затрат. Для геотехнологических систем данная проблема особенно

значима вследствие высокой стоимости основного технологического оборудования, интенсивности его эксплуатации и существенных потерь от простоев. В связи с этим перспективным направлением является разработка интегрированного технико-экономического подхода, позволяющего учитывать состояние и условия эксплуатации производственных активов геотехнологических комплексов при оценке и прогнозировании дополнительных затрат на их капитальный ремонт.

Методы исследования

Методологическую основу исследования составил комплекс взаимодополняющих методов, ориентированных на выявление закономерностей влияния технического состояния основных производственных фондов на экономическую эффективность функционирования горно-транспортного комплекса. В работе применены системный, статистический и корреляционно-регрессионный анализ, расчетно-нормативный метод, экономико-математическое и имитационное моделирование, а также методы прогнозирования.

Системный подход позволил рассматривать экскаваторно-автомобильный комплекс как целостную производственную систему, элементы которой находятся во взаимосвязи и взаимозависимости. При этом учитывались техническое состояние оборудования, режимы его эксплуатации, производительность, продолжительность рабочих циклов и простоев, интенсивность отказов, потребность в ремонтных работах и связанные с ними затраты [8]. Статистическая обработка использовалась для систематизации и анализа фактических данных об эксплуатации технологического оборудования, его отказах, простоях и ремонтных затратах. С применением корреляционно-регрессионного анализа устанавливались количественные зависимости между величиной дополнительных затрат на капитальный ремонт и совокупностью технических и эксплуатационных факторов.

Имитационное моделирование применялось для исследования функционирования экскаваторно-автомобильного комплекса при изменяющихся горнотехнических и производственных условиях, включая изменение объемов транспортирования, расстояния перевозки, производительности оборудования, продолжительности рабочих циклов и простоев. Сопряжение имитационного моделирования с комплексной экономической оценкой позволило определить влияние эксплуатационных параметров и технического состояния технологического оборудования на формирование затрат и результирующие показатели эффективности комплекса [9].

Расчетно-нормативный метод использовался при определении амортизационных отчислений, нормативных затрат на капитальный ремонт и дополнительных расходов, обусловленных необходимостью восстановления изношенных производственных мощностей. Экономико-математическое моделирование обеспечило формализацию выявленных взаимосвязей и их включение в расчетную модель функционирования горно-транспортного комплекса.

В качестве объекта анализа преимущественно рассматривался физический износ основных производственных

фондов, поскольку его накопление обуславливает снижение эксплуатационной производительности и коэффициента полезного действия оборудования, увеличение продолжительности простоев и ремонтных затрат, а также рост себестоимости добычи. Такой методологический подход позволил комплексно оценить влияние процессов износа и воспроизводства производственных мощностей на экономическую эффективность функционирования горно-транспортного комплекса и обосновать необходимость учета соответствующих затрат при ее определении.

Результаты

Расчет амортизационных отчислений в целом по горно-транспортному комплексу как на горнодобывающих предприятиях, так и на имитационной модели производился исходя из первоначальной стоимости и утвержденных норм годовых амортизационных отчислений путем суммирования по каждому из элементов основных производственных фондов согласно методике [10], предусматривающей, что капитальный ремонт, как и другие виды ремонта, осуществляется за счет текущих затрат на производство. Амортизационные отчисления приводятся к сменным значениям и учитываются по всему имеющемуся парку технологического оборудования независимо от того, находится оно в работе или на ремонте. Учет данного показателя важен, так как он в составе эксплуатационных издержек входит в себестоимость и влияет на результирующие экономические показатели, позволяющие судить об эффективности работы системы в целом.

Изношенные производственные мощности восстанавливаются путем капитальных ремонтов и модернизации или путем полной замены их новыми. Норма затрат на капитальный ремонт оборудования была принята не более 15% от остаточной стоимости [11].

Однако данной суммы для изношенного (самортизированного) до определенной степени оборудования не хватает на стопроцентный капитальный ремонт оборудования. Это обусловлено тем, что по мере эксплуатации и износа остаточная стоимость оборудования убывает, в то время как с каждым последующим годом производственным фондам требуется все большая сумма на ремонт. Следует также отметить, что, как правило, основные производственные фонды (автосамосвалы, локомотивы и думпкары, экскаваторы, железнодорожные пути, автодороги) на горнодобывающих предприятиях эксплуатируются и после окончания нормативного срока эксплуатации. Вследствие сказанного на определенном этапе эксплуатации сумма, необходимая для ремонта изношенного оборудования, становится больше предусмотренной для этого нормы затрат. В этом случае дополнительная сумма, необходимая для обеспечения качественного капитального ремонта основных производственных фондов, обеспечивается на общих основаниях из получаемой прибыли предприятия. Предприятия берут требующиеся суммы из фонда развития производства, формирующегося при распределении чистой прибыли предприятия. В то же время необходимо учитывать, что прежде, чем получить чистую прибыль, предприятие обязано выплатить государству подоходный налог с юридических лиц.

Таким образом, очевидно, что предприятие несет дополнительные затраты, которые, как правило, не учитываются при расчете экономического эффекта от проведения того или иного мероприятия, что, в свою очередь приводит к получению завышенного экономического эффекта. В связи с этим во избежание необоснованного завышения планируемой прибыли, в рамках планирования и управления горно-транспортными работами необходимо включать их в текущие затраты, как постоянные расходы.

Вследствие сказанного дополнительные затраты на капитальный ремонт оборудования из суммы чистой прибыли предприятия рассчитываются по следующей формуле:

$$З_{\text{рем.}}^{\text{доп.}} = \frac{\Pi - Н_{\text{п.}}}{\Pi_{\text{ч.}}}, \quad (1)$$

где Π – валовая прибыль предприятия, тыс. тенге;

$Н_{\text{п.}}$ – подоходный налог с юридических лиц, тыс. тенге,

$\Pi_{\text{ч.}}$ – часть чистой прибыли, остающаяся у предприятия после вычета затрат на капремонт, тыс. тенге.

Таким образом, сумма затрат на капитальный ремонт оборудования рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{рем.кап.}} = З_{\text{рем.}}^{\text{доп.}} + Н_{\text{рем.}} \quad (2)$$

Подобные расчеты производятся по каждому из элементов геотехнологического комплекса.

Общая сумма дополнительных затрат на капитальный ремонт производственных мощностей ($З_{\text{рем.}}$) получается путем суммирования этих затрат по каждому отдельному элементу:

$$З_{\text{рем.}} = \sum_{n=1}^{\Pi} З_{\text{рем.э.п.}}^{\text{доп.}} + \sum_{p=1}^P З_{\text{рем.э.р.}}^{\text{доп.}} + \sum_{a=1}^A З_{\text{рем.а.}}^{\text{доп.}} + \sum_{l=1}^L З_{\text{рем.л.}}^{\text{доп.}} + \sum_{c=1}^C З_{\text{рем.с.}}^{\text{доп.}} + \sum_{d=1}^D З_{\text{рем.д.}}^{\text{доп.}}, \quad (3)$$

где $\sum_{n=1}^{\Pi} З_{\text{рем.э.п.}}^{\text{доп.}}$, $\sum_{p=1}^P З_{\text{рем.э.р.}}^{\text{доп.}}$, $\sum_{a=1}^A З_{\text{рем.а.}}^{\text{доп.}}$, $\sum_{l=1}^L З_{\text{рем.л.}}^{\text{доп.}}$ – сумма дополнительных затрат на ремонт соответственно каждого n -го экскаватора на погрузке, p -го экскаватора на разгрузке, a -го автосамосвала и l -го локомотивосостава;

$\sum_{c=1}^C З_{\text{рем.с.}}^{\text{доп.}}$, $\sum_{d=1}^D З_{\text{рем.д.}}^{\text{доп.}}$ – сумма дополнительных затрат на ремонт каждого км соответственно схемы путевого развития и автодороги.

Расчет затрат по схеме путевого развития и автотрассе производится исходя из остаточной стоимости 1 км железнодорожных путей, величина которой зависит от назначения путей (временные или постоянные), и затрат на содержание 1 км путей. Эти затраты заносятся в программный комплекс, в котором осуществляется расчет затрат по коммуникациям за 1 м в смену.

Обсуждение результатов

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что учет амортизационных отчислений и затрат на восстановление изношенных производственных мощностей является необходимым условием объективной оценки экономической эффективности функционирования геотехнологического комплекса.

Традиционный подход, при котором амортизационные отчисления определяются исходя из первоначальной стоимости основных фондов и установленных норм, позволяет учитывать их влияние на текущие эксплуатационные затраты независимо от фактического технического состояния оборудования. При этом данный подход не в полной мере отражает реальные потребности предприятия в восстановлении производственных мощностей по мере накопления их физического износа.

Результаты исследования показывают, что применение фиксированной нормы затрат на капитальный ремонт в размере не более 15% от остаточной стоимости оборудования имеет ограниченную область применимости. На начальных этапах эксплуатации величина остаточной стоимости основных фондов относительно высока, поэтому предусмотренных средств может быть достаточно для выполнения необходимых ремонтных работ. Однако по мере увеличения срока эксплуатации оборудования и снижения его остаточной стоимости возникает обратная зависимость: потребность в затратах на восстановление возрастает вследствие увеличения физического износа, тогда как расчетная величина средств на капитальный ремонт, определяемая в процентах от остаточной стоимости, сокращается.

Особенно существенным данное противоречие становится для горно-транспортного оборудования, эксплуатируемого за пределами нормативного срока службы. К таким объектам относятся автосамосвалы, локомотивы и думпкары, экскаваторы, железнодорожные пути и автомобильные дороги. Продолжение эксплуатации таких основных фондов позволяет сохранять производственную мощность без единовременных капитальных вложений в полную замену оборудования, однако одновременно приводит к увеличению затрат на поддержание его работоспособности. Следовательно, фактическая потребность в финансовых ресурсах для восстановления технического состояния оборудования может существенно превышать величину, определяемую исключительно исходя из его остаточной стоимости.

Таким образом, результаты подтверждают необходимость выделения дополнительных затрат на капитальный ремонт в самостоятельный элемент текущих эксплуатационных расходов при экономической оценке мероприятий, направленных на повышение эффективности геотехнологического комплекса. Их исключение из расчетов приводит к неполному отражению фактических затрат предприятия и, как следствие, к завышению величины ожидаемого экономического эффекта и планируемой прибыли. Включение указанных расходов в состав постоянных затрат позволяет повысить достоверность экономической оценки и обеспечить сопоставимость результатов функционирования геотехнологического комплекса при различной степени износа его производственных мощностей.

Расчет дополнительных затрат по каждому элементу геотехнологического комплекса с последующим их суммированием позволяет перейти от оценки отдельных еди-

ниц оборудования к определению совокупной финансовой нагрузки, связанной с поддержанием производственных мощностей в работоспособном состоянии. Такой подход дает возможность учитывать различия в стоимости оборудования, сроках его эксплуатации, степени физического износа и потребности в капитальном ремонте.

В целом результаты исследования свидетельствуют, что учет дополнительных затрат на капитальный ремонт позволяет устранить один из факторов систематического завышения экономического эффекта при оценке мероприятий по совершенствованию горно-транспортной системы. Предлагаемый подход может быть использован как при экономической оценке отдельных технических мероприятий, так и при имитационном моделировании вариантов развития ГТК, обеспечивая более реалистичное отражение взаимосвязи между физическим износом основных фондов, затратами на их восстановление и конечными экономическими показателями деятельности горнодобывающего предприятия.

Заключение

Проведенное исследование показало, что объективная оценка экономической эффективности геотехнологического комплекса требует учета физического износа основных производственных фондов и затрат на их восстановление. Установлено, что по мере снижения остаточной стоимости оборудования фактическая потребность в затратах на капитальный ремонт возрастает, особенно при эксплуатации оборудования за пределами нормативного срока службы.

Обоснована формула определения дополнительных затрат на капитальный ремонт изношенных производ-

ственных мощностей, покрываемых за счет средств фонда развития производства. Учет данных затрат в составе эксплуатационных расходов позволяет более полно отразить фактические расходы предприятия на поддержание горно-транспортного комплекса в работоспособном состоянии и избежать завышения рассчитываемого экономического эффекта. Внесенные корректировки позволили усовершенствовать экономико-математическую модель функционирования горно-транспортного комплекса за счет более адекватного учета основных фактических затрат, связанных с эксплуатацией, ремонтом и восстановлением производственных мощностей.

Практическая значимость предложенного подхода заключается в повышении обоснованности управленческих решений в области технического перевооружения, капитального ремонта и воспроизводства технологического оборудования, что способствует более точному прогнозированию экономических результатов деятельности горнодобывающего предприятия. Особое значение данный подход имеет для совершенствования управления процессом воспроизводства производственных мощностей горно-транспортных комплексов на карьерах.

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. Čech J., Sofranko M. Экономический прогноз и оценка горнодобывающего предприятия // *E A M Ekonomie A Management*. – 2018. – Т. 21. – Вып. 2. – С. 38–52 (на английском языке)
2. Зайцев Н. Л. Экономика организации. – М.: «Экзамен», 2000. – 768 с. (на русском языке)
3. Буданов В. Г. Возможности повышения потенциала ремонтного производства // *В поисках новых возможностей развития предприятия / под общ. ред. В. И. Усенко, А. М. Макарова*. – Лисаковск; Челябинск, 2002. – С. 66–69 (на русском языке)
4. Koteleva N., Valnev V. Автоматическое обнаружение сценариев технического обслуживания оборудования и систем управления в промышленности // *Applied Sciences*. – 2023. – Т. 13. – № 24. – Ст. 12997 (на английском языке)
5. Недорогие технологии Интернета вещей (IoT) для мониторинга и оптимизации малотоннажных карьерных самосвалов и экскаваторов открытых горных работ / H. Aguirre-Jofré [и др.] // *Automation in Construction*. – 2021. – Т. 131. – Ст. 103918 (на английском языке)
6. Сетевая платформа автоматизации прогнозирования отказов карьерных самосвалов / И. В. Зырянов [и др.] // *Горная Промышленность*. – 2024. – № 3. – С. 56–63 (на русском языке)
7. Краткосрочное прогнозирование риска аварий на уровне сегментов с использованием передового моделирования данных на основе проактивных и реактивных данных об авариях / B. Dimitrijevic [и др.] // *Applied Sciences*. – 2022. – Т. 12. – Ст. 856 (на английском языке)
8. Boyandipova A. A., Adilkhanova Z. A. Информационное обеспечение системы управления технологическими процессами на открытых карьерах // *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM-2020*. – Албена, Болгария. – 2020. – С. 441–448 (на английском языке)
9. 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)
10. Адилханова Ж., Бояндинова А. Концепция системы управления технологическими процессами на карьерах // *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM-2018*. – Албена, Болгария. – 2018. – С. 191–196 (на английском языке)
11. Налоговый кодекс Республики Казахстан. – Алматы, 2025. – 544 с. (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Čech J., Sofranko M. Тау-кен кәсіпорнының экономикалық болжамы және бағалауы // *E A M Ekonomie a Management*. – 2018. – Т. 21. – Шығ. 2. – Б. 38–52 (ағылшын тілінде)
2. Зайцев Н. Л. Ұйым экономикасы. – М.: «Экзамен», 2000. – 768 б. (орыс тілінде)

3. Буданов В. Г. Жөндеу өндірісінің әлеуетін арттыру мүмкіндіктері // Кәсіпорынды дамытудың жаңа мүмкіндіктерін іздеуде / жалпы ред. В. И. Усенко, А. М. Макарова. – Лисаковск; Челябинск, 2002. – Б. 66–69 (орыс тілінде)
4. Koteleva N., Valnev V. Өнеркәсіптегі жабдықтар мен басқару жүйелерінің қызмет көрсету сценарийлерін автоматты анықтау // *Applied Sciences*. – 2023. – Т. 13. – № 24. – 12997 (ағылшын тілінде)
5. Шағын масштабтағы кен тасығыш вагондар мен беткі кен қазу шанышқыларын бақылау және оңтайландыру үшін шығындары төмен заттар интернеті (IoT) / H. Aguirre-Jofré [және т. б.] // *Automation in Construction*. – 2021. – Т. 131. – 103918 (ағылшын тілінде)
6. Карьерлік самосвалдардың істен шығуын болжауды автоматтандырудың желілік платформасы / И. В. Зырянов [және т. б.] // *Тау-кен өнеркәсібі*. – 2024. – № 3. – Б. 56–63 (орыс тілінде)
7. Dimitrijevic B., Khales S. D., Asadi R., Lee J. Апаттар тәуекелін сегмент деңгейінде қысқа мерзімді болжау, апаттар бойынша алдын-ала және кейінгі деректерге негізделген озық деректер моделін қолдану арқылы / В. Dimitrijevic [және т. б.] // *Applied Sciences*. – 2022. – Т. 12. – Б. 856 (ағылшын тілінде)
8. Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. Ашық карьерлердегі технологиялық процестерді 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. Геотехнологиялық кешендердің тұрақты жұмыс істеуі үшін жобалық басқару шешімдерінің негізгі көрсеткіштері // *Тау-кен ақпараттық-талдамалық бюллетень*. – 2026. – № 2–1. – Б. 182–196 (орыс тілінде)
10. Әділханова Ж., Бояндинова А. Карьерлердегі технологиялық процестерді басқару жүйесінің тұжырымдамасы // *Proceedings of the International multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM-2018*. – Албена, Болгария. – 2018. – Б. 191–196 (ағылшын тілінде)
11. Қазақстан Республикасының Салық кодексі. – Алматы, 2025. – 544 б. (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Čech J., Sofranko M. Economic projection and evaluation of mining venture // *E A M Ekonomie A Management*. – 2018. – Vol. 21. – Issue 2. – P. 38–52 (in English)
2. Zaitsev N. L. *Ekonomika organizatsii [Economics of the Organization]*. – Moscow: Ekzamen, 2000. – 768 p. (in Russian)
3. Budanov V. G. *Vozmozhnosti povysheniia potentsiala remontnogo proizvodstva [Opportunities to Increase the Potential of Repair Production]* // *V poiskakh novykh vozmozhnostei razvitiia predpriiatiia [In Search of New Opportunities for Enterprise Development]* / pod obshch. red. V. I. Usenko, A. M. Makarova. – Lisakovsk; Chelyabinsk, 2002. – P. 66–69 (in Russian)
4. Koteleva N., Valnev V. Automatic Detection of Maintenance Scenarios for Equipment and Control Systems in Industry // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – No. 24. – Article 12997 (in English)
5. Low cost internet of things (IoT) for monitoring and optimising mining small-scale trucks and surface mining shovels / H. Aguirre-Jofré et al. // *Automation in Construction*. – 2021. – Vol. 131. – Article 103918 (in English)
6. Setevaja platforma avtomatizacii prognozirovaniia otkazov kar'ernykh samosvalov [Network platform for automating the prediction of failures of quarry dump trucks] I. V. Zyryanov et al. // *Gornaja Promyshlennost' [Mining Industry]*. – 2024. – No. 3. – P. 56–63 (in Russian)
7. Short Term Segment-Level Crash Risk Prediction Using Advanced Data Modeling with Proactive and Reactive Crash Data / B. Dimitrijevic et al. // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – Article 856 (in English)
8. Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. An information support for management system of technological processes at open pits // In: *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 Z. A. Ključevye pokazateli proektnykh upravlencheskikh reshenij dlja ustojchivogo funkcionirovaniia geotekhnologičeskikh 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)
10. Adilkhanova Zh., Boyandinova A. Concept of Management System of Technological Processes at Open Pits // In: *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM-2018*. – Albena, Bulgaria. – 2018. – P. 191–196 (in English)
11. *Nalogovyi kodeks Respubliki Kazakhstan [Tax Code of the Republic of Kazakhstan]*. – Almaty, 2025. – 544 p. (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» РМҚ «Д. А. Қонаев атындағы Тау-кен институты» филиалының ғылыми хатшысы (Алматы қ., Қазақстан)

Әділханова Ж. А., т. ғ. к., «ҚР ҰК МҚК» РМҚ «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 (Almaty, Kazakhstan)

Код МРНТИ 38.53.17

*M. E. Sanatbekov, S. K. Muratova, R. K. Smabaeva, E. Zh. Omirzakova
 Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF PETROLEUM SOURCE ROCKS AND THE CONDITIONS OF HYDROCARBON GENERATION AND MIGRATION IN THE ZAYSAN DEPRESSION

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of source rocks and the conditions of hydrocarbon generation and migration within the Zaisan Basin. The study focuses on Permian deposits (Taranchin, Maichat, and Akkolkan formations), which represent the principal source rocks of the region. The aim of the research is to evaluate their generative potential and to identify patterns of hydrocarbon migration. The study integrates seismic data, structural analysis. It is established that the central part of the basin exhibits the greatest thickness and burial depth of source rocks, providing the most favorable thermobaric conditions for hydrocarbon generation. The role of tectonic faults, pinch-out zones, and lithological seals in the formation of migration pathways and traps was comprehensively substantiated.

Key words: Zaisan Basin, source rocks, Permian deposits, hydrocarbon generation, hydrocarbon migration, tectonic faults, petroleum potential, exploration geology.

Зайсан ойпатындағы мұнайаналық тау жыныстарды, көмірсутектердің генерациясы мен миграциясы жағдайларын кешенді талдау

Аннотация. Мақалада Зайсан ойпатындағы мұнайаналық тау жыныстар мен көмірсутектердің генерациясы және миграциясы жағдайлары қарастырылған. Зерттеу нысаны ретінде аймақтың негізгі мұнай түзуші кешені болып табылатын пермь шөгінділері (Таранчи, Майчат және Аққолқан свиталары) алынған. Жұмыстың мақсаты – олардың генерациялық әлеуетін бағалау және көмірсутектердің көшу заңдылықтарын анықтау. Зерттеуде сейсмикалық барлау, құрылымдық талдау әдістері қолданылды. Нәтижесінде ойпаттың орталық бөлігінде тау жыныстардың ең үлкен қалыңдығы мен тереңдігі анықталып, қолайлы термобарлық жағдайлар қалыптасқаны көрсетілді. Тектоникалық бұзылыстардың, сыналу аймақтарының және литологиялық экрандардың миграция мен тұтқыштардың қалыптасуындағы рөлі кешенді түрде негізделді.

Түйінді сөздер: Зайсан ойпаты, мұнайаналық жыныстар, пермь шөгінділері, көмірсутектердің генерациясы, көмірсутектердің миграциясы, тектоникалық бұзылыстар, мұнай-газ перспективтілігі, геологиялық барлау жұмыстары.

Комплексный анализ нефтематеринских пород, условий генерации и миграции углеводородов в Зайсанской впадине

Аннотация. В статье рассмотрены нефтематеринские породы и условия генерации и миграции углеводородов в Зайсанской впадине. Объектом исследования являются пермские отложения (Таранчинская, Майчатская и Акколканская свиты), играющие ключевую роль в нефтегазообразовании региона. Целью работы является оценка их генерационного потенциала и выявление закономерностей миграции углеводородов. Используются методы сейсморазведки и структурного анализа. Установлено, что центральная часть впадины характеризуется максимальной мощностью и глубиной залегания пород, обеспечивающих благоприятные термобарические условия. Роль тектонических нарушений, зон выклинивания и литологических экранов в формировании миграционных путей и ловушек была комплексно обоснована.

Ключевые слова: Зайсанская впадина, нефтематеринские породы, отложения, генерация углеводородов, миграция углеводородов, тектонические нарушения, нефтегазоносность, геологоразведочные работы.

Introduction

The Zaysan Depression, located in Eastern Kazakhstan, represents a promising area for petroleum exploration studies. Geological exploration works have led to the discovery of the Sarybulak oil and gas field, which has significantly increased scientific and industrial interest in the geological investigation of this region [1, 2].

This study aims to provide a comprehensive analysis of the distribution of source rocks, the conditions of hydrocarbon accumulation, and the assessment of future exploration potential. The research is based on data from previous studies, modern geological materials, and results obtained from original investigations.

Despite accumulated knowledge, the Zaysan Depression remains insufficiently studied in terms of its petroleum system characteristics, which makes the present analysis particularly relevant. Special attention is given to paleotectonic reconstruction, the timing of hydrocarbon generation and migration, as well as the formation of structural and stratigraphic traps.

The formation of the Zaysan Depression began in the Late Paleozoic. From a tectonic perspective, it represents a long-evolving intermontane basin with a sublatitudinal strike, bordered in the north by the Altai mountain system and in the south by the Saur-Tarbagatai mountain system [1, 2, 3]. The tectonic scheme is shown in Figure 1.

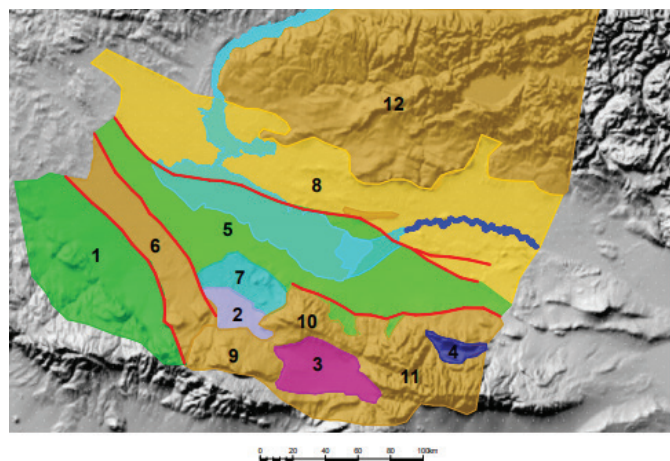
Within the studied area, several negative structural elements are distinguished, including the Baytogai trough, Aksuat subsidence, Akzhar subsidence, Fedoseev subsidence, and Kenderlyk graben. Positive structures include the Arkarly uplift, Manrak uplift, and Aktobe block. The mountain ranges identified in the study area comprise the Eastern Tarbagatai Range, Manrak Range, Saikan Range, and the Altai Mountains.

The central part of the Zaysan Depression is occupied by the Baytogai trough, which represents its largest and most deeply subsided structural element. This area is characterized by the widest distribution of source rocks and preserves the most complete stratigraphic section of sedimentary deposits [3, 4, 5].

At present, commercially discovered and producing oil and gas accumulations are associated with the Sarybulak Central and Sarybulak East structures.

In total, 55 wells have been drilled in the Zaysan Depression over different periods (Figure 3). The primary target horizons of most recent wells include Paleogene, Jurassic, and Triassic deposits. Permian sediments have been penetrated by a limited number of wells. The most complete stratigraphic section is represented by the parametric well S-1P. In this well, oil shows were first identified within Permian deposits.

Geophysical data obtained from wells, including vertical seismic profiling (VSP), have enabled a more detailed interpretation of the geological structure of the area. Well data



Subsidence zones: 1 – Aksuat depression; 2 – Akzhar depression; 3 – Fedoseev depression; 4 – Kendyrlyk trough; 5 – Baytogai trough. Uplifts: 6 – Arkarly uplift; 7 – Manrak uplift; 8 – Aktobe block. Mountain ranges: 9 – East Kazakhstan Range; 10 – Manrak Range; 11 – Saikan Range; 12 – Altai Mountains.

Шөгү аймақтары: 1 – Ақсуат ойысы; 2 – Ақжар ойысы; 3 – Федосеев ойысы; 4 – Кендірлік прогибі; 5 – Байтогай прогибі. Көтерілу аймақтары: 6 – Арқарлы көтерілімі; 7 – Маңырақ көтерілімі; 8 – Ақтөбе блогы. Тау жоталары: 9 – Шығыс Қазақстан жотасы; 10 – Маңырақ жотасы; 11 – Сауыр жотасы; 12 – Алтай таулары.

Зоны опускания: 1 – Аксуатская впадина; 2 – Акжарская впадина; 3 – Федосеевская впадина; 4 – Кендырлыкский прогиб; 5 – Байтогайский прогиб. Поднятия: 6 – Аркарлинское поднятие; 7 – Манракское поднятие; 8 – Актобинский блок. Горные хребты: 9 – Восточно-Казахстанский хребет; 10 – Манракский хребет; 11 – Сауырский хребет; 12 – Алтайские горы.

Figure 1. Tectonic scheme of the Zaysan Depression.
Сурет 1. Зайсан ойпатының тектоникалық сызбасы.
Рис. 1. Тектоническая схема Зайсанской впадины.

were integrated with the interpretation of 2D and 3D seismic surveys (Figure 4). Vertical seismic profiling was particularly important for refining the velocity model of the subsurface.

In addition, during drilling of modern wells, 184 meters of core were recovered from Permian deposits with a recovery rate exceeding 90%. Subsequently, standard and special laboratory analyses of the core samples were carried out in Kazakhstan and Russia to refine the reservoir porosity–permeability properties and to obtain data on the quality of the Permian horizon.

Methods / Research

The geological structure of the Zaysan Depression includes a complex assemblage of sedimentary rocks penetrated by wells, ranging in age from the Carboniferous to the Quaternary [6]. Five distinct structural stages can be clearly identified (Figure 5).

The Silurian-Carboniferous stage is highly deformed, contains numerous intrusive bodies, is metamorphosed, and represents the crystalline basement. Sedimentary cover sequences overlie the basement and can be subdivided into four structural stages.

Deposits ranging from the Middle Carboniferous to the Permian are strongly deformed in places. The next struc-

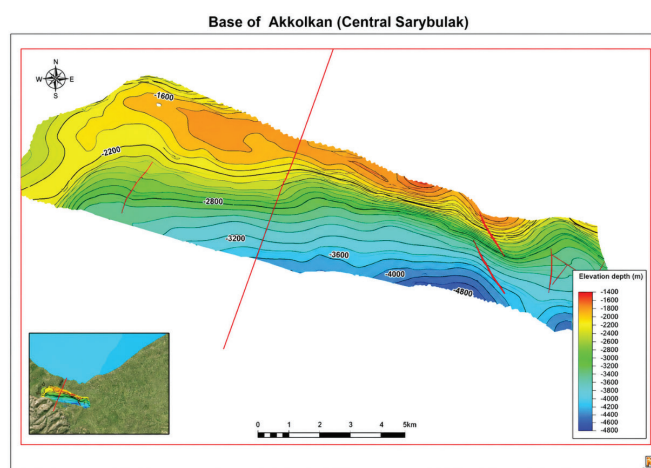


Figure 2. Seismic time section and structural map of the oil reservoir in the Central Sarybulak structure.

Сурет 2. Орталық Сарыбұлақ құрылымындағы мұнай коллекторының уақыттық қимасы және құрылымдық картасы.

Рис. 2. Временной разрез и структурная карта нефтяного коллектора в Центральной Сарыбулакской структуре.

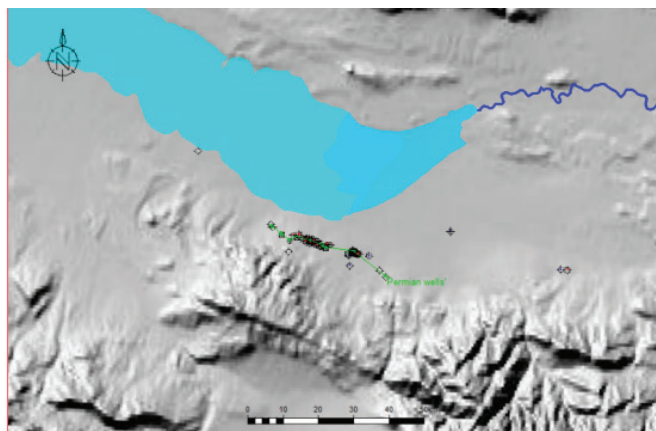


Figure 3. Location of drilled wells in the Zaysan Depression.

Сурет 3. Зайсан ойпатындағы бұрғыланған ұңғымалардың орналасуы.

Рис. 3. Расположение пробуренных скважин в Зайсанской впадине.

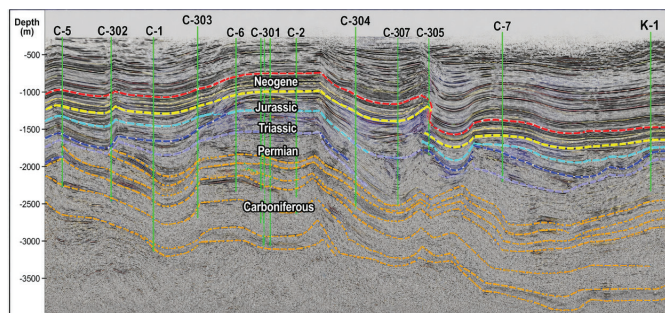


Figure 4. Correlation scheme and cross-section through wells penetrating Permian deposits (faults not shown).
Сурет 4. Пермь шөгінділерін кесіп өтетін ұңғымалар бойынша корреляция сызбасы және қима (жарылымдар көрсетілмеген).

Рис. 4. Схема корреляции и разрез по скважинам, вскрывающим пермские отложения (разломы не показаны).

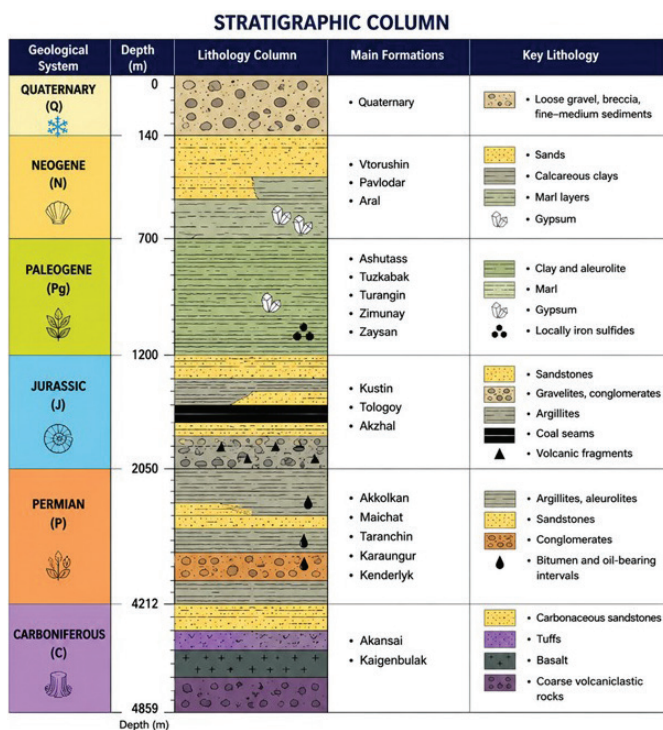


Figure 5. Lithological and stratigraphic description of the Zaysan Basin.

Сурет 5. Зайсан бассейнінің литологиялық және стратиграфиялық сипаттамасы.

Рис. 5. Литологическое и стратиграфическое описание Зайсанского бассейна.

tural stage includes Triassic sediments, which unconformably overlie the underlying formations both angularly and stratigraphically. Jurassic rocks, which also exhibit structural and stratigraphic unconformities with both overlying and underlying units, constitute the fourth structural stage. The uppermost structural stage is composed of Cenozoic deposits, which unconformably overlie Paleozoic and Mesozoic formations and, in some areas, even the folded basement.

The age determinations were carried out using laboratory core studies based on palynological (spore-pollen) and micro-faunal assemblages. Within the Zaysan Depression, the oldest rocks penetrated by drilling are of Carboniferous age.

Source rocks: composition and distribution. Within the Zaysan Depression, the primary source rocks are represented by Permian deposits, including the Taranchin, Maichat, and Akkolkan formations. Their study is of critical importance for evaluating the petroleum potential of the region.

Permian sediments in the Zaysan Depression are unevenly distributed and have a limited areal extent. Zones of maximum subsidence and pinch-out areas can be distinguished. The main information regarding the depth and thickness of these deposits has been obtained through the interpretation of 2D and 3D seismic survey data, as well as drilling results [7].

The greatest extent and maximum burial depth of the Permian deposits are observed in the central part of the depression, where 3D seismic surveys have been conducted. The depth to the base of these formations reaches approximately -5400 m below sea level (Figure 6). In this zone, the source rocks are least affected by degradation and retain significant thickness, making the area a highly prospective hydrocarbon generation kitchen.

A progressive decrease in both thickness and burial depth of the Permian succession toward the northeast and west is associated with compressional tectonic processes. These processes led to uplift of the formations, their exposure at the surface, and subsequent erosion. To the south, the Permian deposits locally plunge beneath the thrust structures of the Saur-Tarbagatai mountain system.

According to 2D seismic profiles No. 76 and No. 66, a gradual thinning and pinch-out of Permian deposits occurs toward the northeast. These rocks are unconformably overlain by Mesozoic and Cenozoic sediments. The presence of pronounced angular unconformities indicates active tectonic deformation and subsequent erosion of earlier structural complexes.

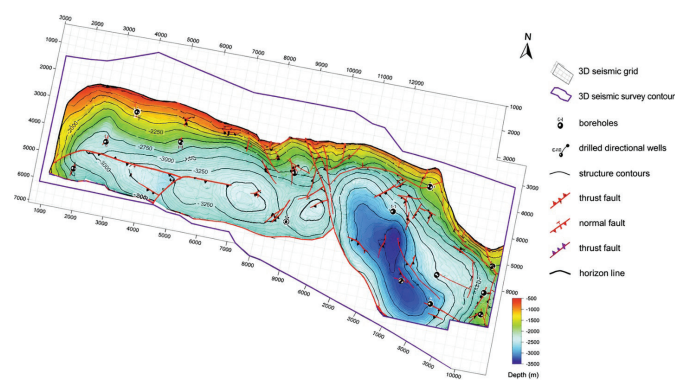


Figure 6. Structural map at the base of Permian deposits.

Сурет 6. Пермь шөгінділерінің табыы бойынша құрылымдық карта.

Рис. 6. Структурная карта по подошве пермских отложений.

Seismic profile 273, running through the central part of the Zaysan Depression, demonstrates the preservation of a more complete stratigraphic section and the presence of angular un-

conformities toward the basin margins. It should be noted that the Permian succession is complicated by a system of faults formed and reactivated at different stages during the tectonic evolution of the region (Figure 7).

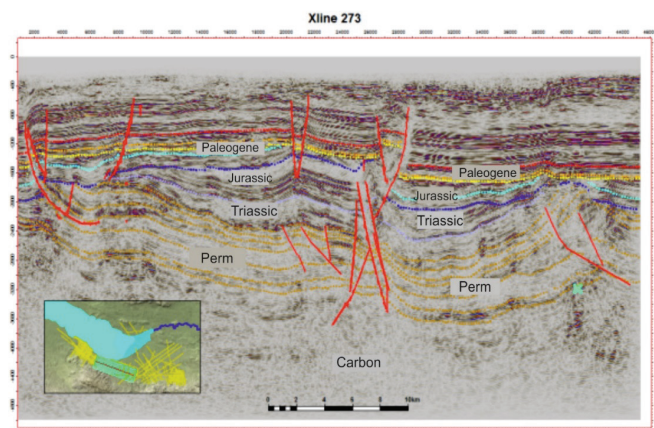


Figure 7. Time seismic profile along line 273.

Сурет 7. 273 сызық бойындағы уақыттық сейсмикалық профиль.

Рис. 7. Временной сейсмический профиль по линии 273.

The study of the distribution of Permian deposits shows that the greatest burial depth and areal extent of these formations are observed in the central part of the Zaysan Depression. Source rocks in the central basin area are least affected by partial or complete destruction, which is reflected in their greater preserved thickness.

Thus, the Permian source rock sequences exhibit the highest preservation and hydrocarbon generation potential in the central part of the Zaysan Depression. Toward the basin margins, especially in the northeastern sector, their degradation is observed due to tectonic movements and erosion. These results provide a basis for petroleum potential prediction and for identifying prospective exploration targets [8].

Discussion of Results

Analysis of source rocks. In the study of source rocks, an important aspect is the evaluation of their hydrocarbon generation potential. This work utilizes data from specialized core analyses conducted on samples from the Maichat Formation interval, as presented in Table 2.

The data obtained from the Rock-Eval pyrolysis analyzer include the following parameters:

S1 – amount of free hydrocarbons, mg/g;

S2 – amount of hydrocarbons released during pyrolysis, mg/g;

S3 – amount of released CO_2 , mg/g;

Tmax – temperature of maximum hydrocarbon generation, °C.

Based on these measured parameters, the following geochemical indices are calculated:

HI (Hydrogen Index) – mg/g;

OI (Oxygen Index) – mg/g;

PI (Production Index) – mg/g.

The obtained and calculated pyrolysis data were systematized into diagrams to determine the quality of source rocks and its variation with depth (Figure 8). The organic richness of the studied interval of the Maichat Formation does not exceed 10%. The investigated interval is moderately enriched in total organic carbon. The hydrocarbon generation potential is considered relatively good, with values ranging from 20 to 70 mg/g.

The Hydrogen Index allows for the determination of the predominant type of organic matter. As shown in the diagram, most of the data indicate a marine depositional setting in which organic material was accumulated. The normalized oil content varies with depth, with most values clustering around 200.

In terms of thermal maturity, almost all vitrinite reflectance data are approximately 0.6%. It should be noted that these analyses were performed on Permian deposits sampled from a depth interval of 2424–2475 m (1903–1954 m below sea level) in a well located closer to the structural crest.

Accordingly, more mature Permian deposits with higher hydrocarbon generation potential are expected to occur at greater depths in the central part of the Zaysan Depression. Pyrolysis data from deeper-lying source rock intervals are not available.

The kerogen quality, type, and thermal maturity were evaluated using cross-plots based on the Van Krevelen diagram (Figures 9 and 10). The constructed plots indicate that the kerogen falls within the transitional zone between Type I and Type II.

In terms of thermal maturity, the organic matter is classified as mature and is located within the oil generation window.

Table 2

Results of pyrolysis analysis of source rocks

Кесте 2

Бастапқы тау жыныстардың пиролиздік талдау нәтижелері

Таблица 2

Результаты пиролизного анализа материнских пород

Глубина, м	SRA TOC	S1	S2	S3	Tmax (°C)	Calc. % Ro	HI	OI	S2/S3	S1/TOC *100	PI
2424.54	6.06	12.5	41	0.3	429.41	0.569	681	4.5	153	206	0.23
2424.85	6.39	13.7	45	0.3	430.71	0.593	704	4.5	155	215	0.23
2425.26	4.28	8.53	28	0.3	429.78	0.576	664	6.5	101	199	0.23
2425.54	4.7	9.83	31	0.3	429.15	0.565	654	6.4	102	209	0.24

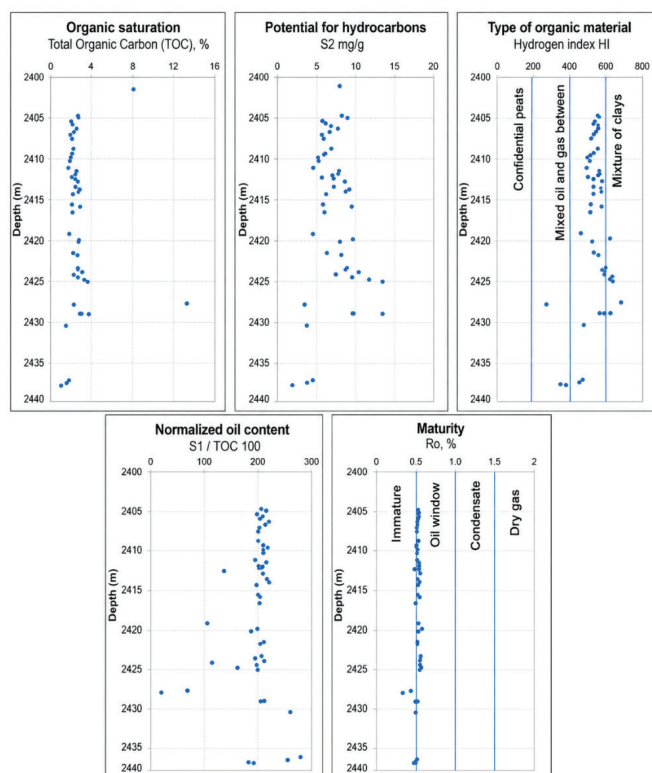


Figure 8. Summary results of pyrolysis data for source rocks.

Сурет 8. Бастапқы тау жыныстар бойынша пиролиз деректерінің жинақталған нәтижелері.

Рис. 8. Сводные результаты пиролизных данных по материнским породам.

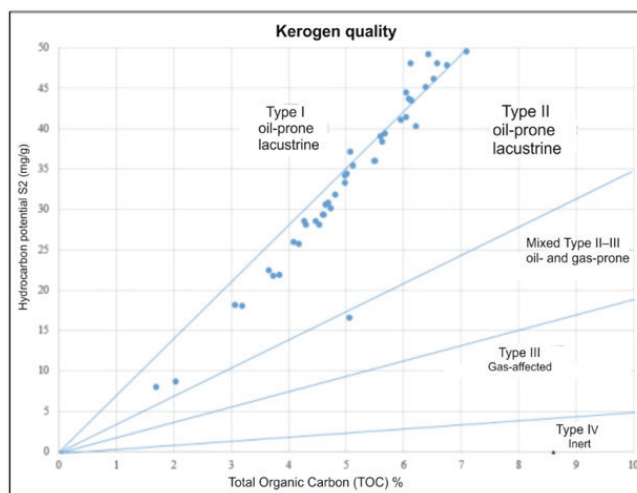


Figure 9. Kerogen type and thermal maturity.

Сурет 9. Кероген түрі және жылулық жетілуі.

Рис. 9. Тип керогена и термическая зрелость.

The pyrolysis results of the source rocks allow several conclusions to be drawn. The source rock interval of the Maic-hat Formation within the Permian deposits is characterized by kerogen that falls within the transitional zone between Type I and Type II. This interval exhibits a good hydrocarbon generation potential, and the kerogen is classified as mature, corresponding to the oil window.

Vitrinite reflectance data indicate a value of approximately 0.6%, which reflects the onset of thermal maturity of the source rocks. Thus, the hydrocarbon generation center is likely localized in the deeper parts of the central Zaysan Depression, where Permian deposits occur at maximum burial depths and provide optimal conditions for thermocatalytic decomposition of organic matter [9].

Conditions of Hydrocarbon Generation and Migration.

Tectonic activity played a key role in the formation of structural and fault-sealed traps. The system of faults and steep bedding angles likely facilitated the migration of oil and gas from source rocks. At the same time, these tectonic movements also contributed to the partial destruction of accumulations and the leakage of hydrocarbons.

At the end of the Triassic, during the fourth stage of tectonic activity, the source rocks were buried to sufficient depths to initiate oil generation. This period was associated with the formation of Permian accumulations. However, as noted earlier, Permian strata locally reached the surface at steep angles, which may have led to partial loss of generated hydrocarbons, primarily the lighter oil fractions, leaving behind heavier components within the accumulations. Subsequently, these formations were overlain by Jurassic sediments. The dominant trap type at this stage was represented by fault-sealed traps.

At the end of the Jurassic, during the sixth compressional tectonic stage, new migration pathways were formed along newly created and reactivated faults. A portion of the Permian hydrocarbons migrated into overlying Jurassic deposits. Hydrocarbon accumulations formed in both structural and fault-sealed traps. Due to the exposure of parts of the Jurassic and Triassic deposits at the surface, a portion of hydrocarbons was lost.

During the final tectonic stage, biodegradation of oil occurred with associated gas generation, leading to the formation of gas accumulations. Compressional tectonics and faulting contributed to the development of structural and fault-controlled traps, which facilitated gas migration into Jurassic and Paleogene deposits. The scheme of hydrocarbon generation and migration is illustrated in profile 171 (Figure 10).

Migration of oil from source rocks occurred through several pathways. The presence of porous and permeable intervals within the Permian deposits provided pathways for initial migration. Steep bedding angles also played a positive role in facilitating hydrocarbon movement within the Permian succession. The abundance of faults cutting through the stratigraphic section enabled vertical migration into overlying formations [10].

The schematic migration process is illustrated on Xline profiles 315 (Figures 11 and 12).

Oil generated within Permian source rocks migrated along faults and permeable beds dipping at steep angles. As a result of this primary migration, lithological, stratigraphic, and structural oil accumulations were formed within Permian reservoir units.

Subsequent tectonic movements induced secondary migration of oil from Permian accumulations into overlying Jurassic deposits. During this process, heavier oil fractions tended to

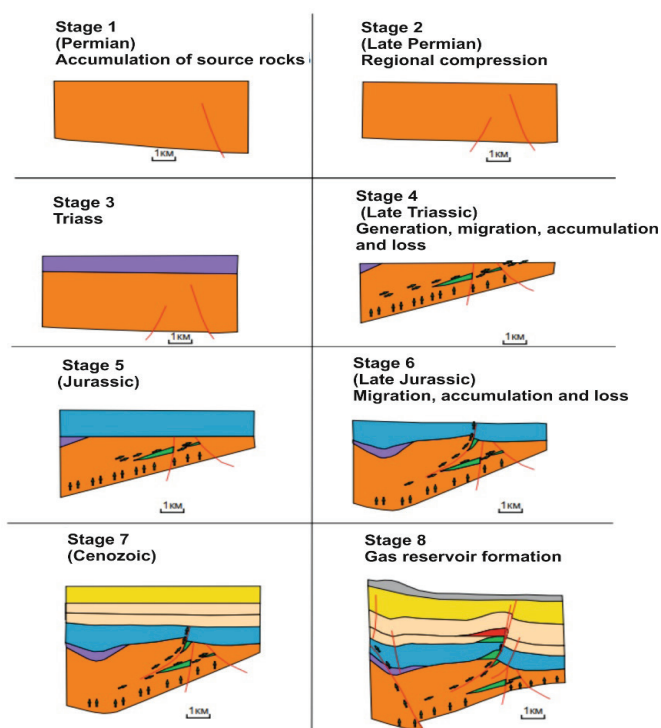


Figure 10. Model of hydrocarbon generation and migration.

Сурет 10. Көмірсутектердің генерациясы мен миграциясының моделі.

Рис. 10. Модель генерации и миграции углеводородов.

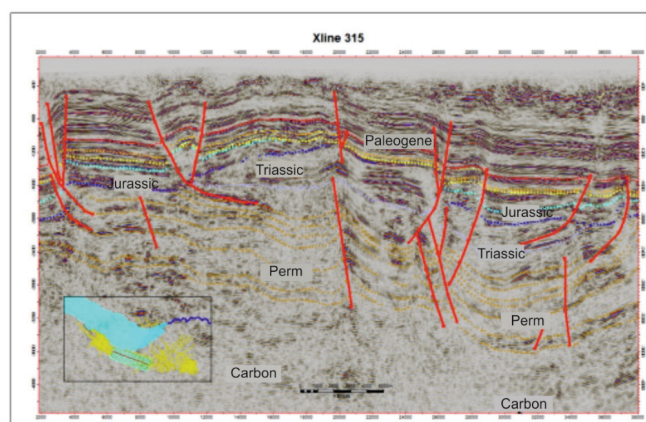


Figure 11. Seismic profile along line 315.

Сурет 11. 315 сызығы бойындағы сейсмикалық профиль.

Рис. 11. Сейсмический профиль по линии 315.

remain within the accumulations, while lighter components could have been lost.

During the final tectonic stage, gas accumulations were formed within Jurassic and Paleogene deposits. These traps resulted from late-stage hydrocarbon migration and subsequent sealing by effective cap rocks [11].

Thus, the structure of hydrocarbon accumulations in the region represents a multi-stage system of migration and accumulation, in which oil and gas are distributed across strati-

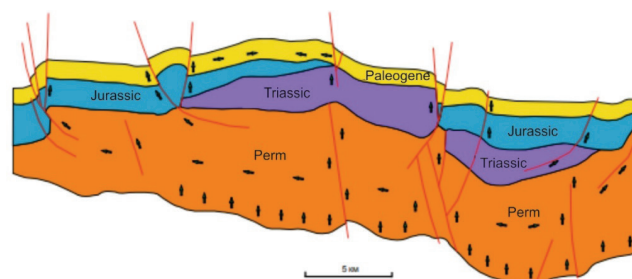


Figure 12. Schematic model of hydrocarbon migration pathways based on profile 315.

Сурет 12. 315 профиль негізінде көмірсутектердің миграция жолдарының сызбалық моделі.

Рис. 12. Схематическая модель путей миграции углеводородов на основе профиля 315.

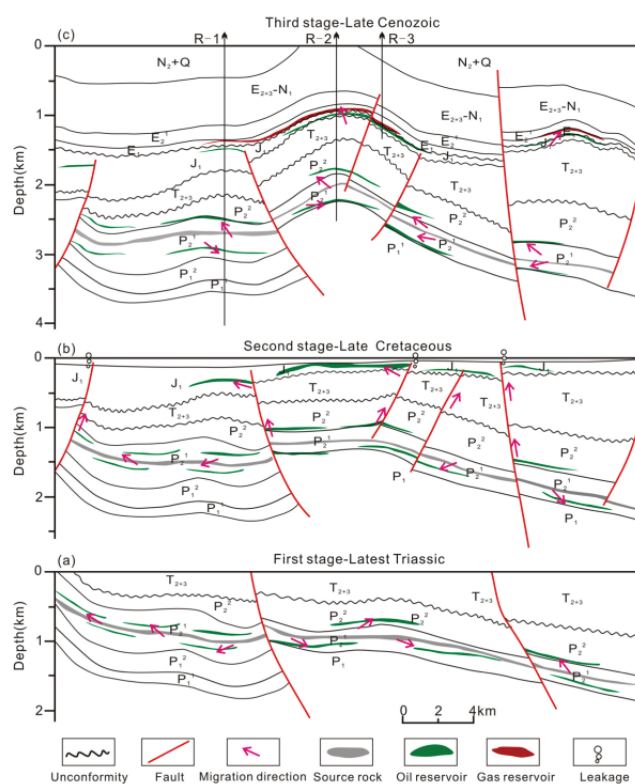


Figure 13. The model of multi-stage hydrocarbon migration and accumulation history.

Сурет 13. Көмірсутектердің көпсатылы миграциясы мен шөгу (жинақталу) тарихының моделі.

Рис. 13. Модель многоэтапной миграции и истории аккумуляции углеводородов.

graphically different complexes ranging from the Permian to the Paleogene (Figure 13).

Conclusion

Comprehensive geological studies of the Zaysan Depression have demonstrated that Permian deposits (the Taranchin, Maichat, and Akkolkan formations) represent the primary source rocks of the region. Their greatest development and maximum burial depth are observed in the central part of the

depression, where the most favorable conditions for hydrocarbon generation are established.

Seismic surveys, drilling data, and structural analysis have revealed the presence of pinch-out zones, tectonic discontinuities, and fault-sealed traps that facilitate both primary and secondary migration of oil and gas.

The central part of the Zaysan Depression is the most prospective area in terms of hydrocarbon generation, migration, and accumulation. The results obtained may serve as a basis for further petroleum potential assessment and for planning future exploration activities in the region.

REFERENCES

1. *Geologicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti osadochnykh basseinov Vostochnogo Kazakhstana* [Geological structure and hydrocarbon potential prospects of sedimentary basins of Eastern Kazakhstan]. E. S. Votsalevsky, V. P. Kolomiets, V. M. Pilifosov et al. – Almaty – San Ramon, 1995. – P. 56–60 (in Russian)
2. Akchulakov U. A. *Novaia resursnaia baza uglevodorodov Respubliki Kazakhstan i puti vozmozhnoi ikh realizatsii* [New hydrocarbon resource base of the Republic of Kazakhstan and possible ways of its implementation]. *Neftegazonosnye basseiny Kazakhstana i perspektivy ikh osvoeniia* [Oil and gas bearing basins of Kazakhstan and prospects for their development]. – 2015. – P. 21–29 (in Russian)
3. *Final'nyi otchet po spetsial'nomu analizu kerna. Mestorozhdenie Sarybulak, skvazhina 305* [Final Report on Special Core Analysis. Sarybulak Field, Well 305]. Aktau: Weatherford, 2018. – 41 p. (in Russian)
4. Ozdov S. M., Popov V. A., Tleuberdi N. *Geologiya i perspektivy neftegazonosnosti vostochnykh i iugo-vostochnykh vpadin Kazakhstana* [Geology and hydrocarbon potential prospects of eastern and southeastern depressions of Kazakhstan]. Kazanskii tekhnicheskii universitet [Kazan Technical University]. – 2020. – P. 157 (in Russian)
5. *Proekt podscheta zapasov nefti i rastvorennogo gaza permskikh otlozhenii mestorozhdeniya Sarybulak* [Project for Estimation of Oil and Dissolved Gas Reserves of Permian Deposits of the Sarybulak Field] / LLP «AktobeNIGRI»; as of 01.04.2023. Aktoke, 2023. – 87 p. (in Russian)
6. *Proekt razrabotki permskikh neftyanykh zalezhei mestorozhdeniya Sarybulak* [Development Project of Permian Oil Reservoirs of the Sarybulak Field] / JSC «NIPIneftegaz»; as of 01.04.2023. Aktau, 2023. – 110 p. (in Russian)
7. Study of geodynamic and hydrogeological criteria for assessing the hydrocarbon potential of the Alakol depression / M. E. Sanatbekov et al. // *Scientific Bulletin of the National Mining University*. – 2024. – P. 5–10 (in English)
8. Late Carboniferous seismic and volcanic record in the northwestern margin of the Junggar Basin: Implication for the tectonic setting of the West Junggar / Yin Liu et al. // *Gondwana Research*. – 2019. – Vol. 71. – P. 49–75 (in English)
9. Multi-Stage Hydrocarbon Migration and Accumulation of Permian Petroleum System in the Zaysan Basin / X. Zhu et al. // *Journal of Petroleum Sciences and Engineering*. – 2022. – Vol. 208. – Article 109291 (in English)
10. *Gruppoi rabochii proekt razvedochnykh skvazhin na strukturakh Sarybulak, Karabulak i Khlebnikovskaya v Zaisanskoi vpadine Vostochno-Kazakhstanskoi oblasti Respubliki Kazakhstan* [Group Working Project of Exploration Wells on the Sarybulak, Karabulak and Khlebnikovskaya Structures in the Zaysan Depression of the East Kazakhstan Region of the Republic of Kazakhstan] / LLP «MunaigazgeolSERVICE». Nefteraazvedka settlement, 2005 (in Russian)
11. Zhu X. F., Shen C. B., Zhao B. Comparison of Permian petroleum accumulation conditions between the Zaysan Basin and the northwestern margin of Junggar Basin // *Earth*. – 2017. – No. 42 (3). – P. 435–446 (in English)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Шығыс Қазақстанның шөгінді бассейндерінің геологиялық құрылысы және мұнай-газдылық перспективалары / Э. С. Воцалевский, В. П. Коломиец, В. М. Пилифосов [және т. б.]. – Алматы – Сан-Рамон, 1995. – Б. 56–60 (орыс тілінде)
2. Акчулаков У. А. Қазақстан Республикасының көмірсутек ресурстарының жаңа базасы және оларды мүмкін іске асыру жолдары // Қазақстанның мұнай-газды бассейндері және оларды игеру перспективалары. – 2015. – Б. 21–29 (орыс тілінде)
3. Кернді арнайы талдау бойынша қорытынды есеп. Сарыбұлақ кен орны, 305-ұңғыма. – Ақтау: Везерфорд, 2018. – 41 б. (орыс тілінде)
4. Оздоев С. М., Попов В. А., Тлеуберди Н. Қазақстанның шығыс және оңтүстік-шығыс ойыстарының геологиясы және мұнай-газдылық перспективалары // Қазан техникалық университеті. – 2020. – Б. 157 (орыс тілінде)
5. «Сарыбұлақ» кен орнының пермь шөгінділеріндегі мұнай және еріген газ қорларын есептеу жобасы / «АқтүбНИГРИ» ЖШС; 01.04.2023 ж. зерттелу жағдайы бойынша. – Ақтөбе, 2023. – 87 б. (орыс тілінде)
6. Сарыбұлақ кен орнының пермь мұнай кен орындарын игеру жобасы / «НИПИнефтегаз» АҚ; 01.04.2023 ж. жағдай бойынша. – Ақтау, 2023. – 110 б. (орыс тілінде)
7. Алакөл ойысының көмірсутек әлеуетін бағалаудың геодинамикалық және гидрогеологиялық критерийлерін зерттеу / М. Е. Санатбеков [және т. б.] // *Scientific Bulletin of the National Mining University*. – 2024. – Б. 5–10 (ағылшын тілінде)
8. Жоңғар бассейнінің солтүстік-батыс шетінде кеш карбон кезеңіндегі сейсмикалық және жанартаулық жазба: Батыс Жоңғардың тектоникалық жағдайына әсері / Yin Liu [және т. б.] // *Gondwana Research*. – 2019. – Т. 71. – Б. 49–75 (ағылшын тілінде)
9. Пермь мұнай жүйесінде Зайсан бассейніндегі көмірсутектердің көпсатылы миграциясы және жинақталуы / X. Zhu [және т. б.] // *Journal of Petroleum Sciences and Engineering*. – 2022. – Т. 208. – 109291 (ағылшын тілінде)
10. Қазақстан Республикасының Шығыс Қазақстан облысындағы Зайсан ойысындағы Сарыбұлақ, Қарабұлақ және Хлебниковская құрылымдарында барлау ұңғымаларын бұрғылау бойынша топтық жұмыс жобасы / «Мұнайгазгеолсервис» ЖШС. – Нефтеразведка кенті, 2005 (орыс тілінде)
11. Zhu X. F., Shen C. B., Zhao B. Зайсан бассейні мен Жоңғар бассейнінің солтүстік-батыс шетінде пермь мұнайының жинақталу жағдайларын салыстыру // *Earth*. – 2017. – № 42 (3). – Б. 435–446 (ағылшын тілінде)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Восточного Казахстана / Э. С. Воцалевский, В. П. Коломиец, В. М. Пилифосов [и др.]. – Алматы – Сан-Рамон, 1995. – С. 56–60 (на русском языке)
2. Акчулаков У. А. Новая ресурсная база углеводородов Республики Казахстан и пути возможной их реализации // Нефтегазоносные бассейны Казахстана и перспективы их освоения. – 2015. – С. 21–29 (на русском языке)
3. Финальный отчет по специальному анализу керн. Месторождение Сарыбулак, скважина 305. – Актау: Везерфорд, 2018. – 41 с. (на русском языке)
4. Оздоев С. М., Попов В. А., Тлеуберди Н. Геология и перспективы нефтегазоносности восточных и юго-восточных впадин Казахстана // Казанский технический университет. – 2020. – С. 157 (на русском языке)
5. Проект подсчета запасов нефти и растворенного газа пермских отложений месторождения «Сарыбулак» / ТОО «АктюбНИГРИ»; по состоянию изученности на 01.04.2023 г. – Актюбе, 2023. – 87 с. (на русском языке)
6. Проект разработки пермских нефтяных залежей месторождения «Сарыбулак» / АО «НИПИнефтегаз»; по состоянию на 01.04.2023 г. – Актау, 2023. – 110 с. (на русском языке)
7. Исследование геодинамических и гидрогеологических критериев оценки углеводородного потенциала Алакольской впадины / М. Е. Sanatbekov [и др.] // Scientific Bulletin of the National Mining University. – 2024. – С. 5–10 (на английском языке)
8. Позднекаменноугольные сейсмические и вулканические записи на северо-западной окраине Джунгарского бассейна: значение для тектонической обстановки Западной Джунгарии / Yin Liu [и др.] // Gondwana Research. – 2019. – Т. 71. – С. 49–75 (на английском языке)
9. Многостадийная миграция и накопление углеводородов в пермской нефтегазовой системе Зайсанского бассейна / X. Zhu [и др.] // Journal of Petroleum Sciences and Engineering. – 2022. – Т. 208. – Ст. 109291 (на английском языке)
10. Групповой рабочий проект разведочных скважин на структурах Сарыбулак, Карабулак и Хлебниковская в Зайсанской впадине Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан / ТОО «Мунайгазгеолсервис». – п. Нефтеразведка, 2005 (на русском языке)
11. Zhu X. F., Shen C. B., Zhao B. Сравнение условий накопления пермских углеводородов между Зайсанским бассейном и северо-западной окраиной Джунгарского бассейна // Earth. – 2017. – № 42 (3). – С. 435–446 (на английском языке)

Information about the authors:

Sanatbekov M. E., Ph.D, Senior Lecturer of the Department of Hydrogeology, Engineering and Petroleum Geology, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), miras.sanatbekov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8005-6324>

Muratova S. K., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydrogeology, Engineering and Petroleum Geology, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), s.muratova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-6805-334X>

Smabaeva R. K., Ph.D, Senior Lecturer of the Department of Hydrogeology, Engineering and Petroleum Geology, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), r.smabayeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-0772-4602>

Omirezakova E. Zh., Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Hydrogeology, Engineering and Petroleum Geology, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), eomirezakova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2612-125X>

Авторлар туралы мәліметтер:

Санатбеков М. Е., Ph.D докторы, «Гидрогеология, инженерлік және мұнай-газ геология» кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Мұратова С. К., т. ғ. к., «Гидрогеология, инженерлік және мұнай-газ геология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Смабаева Р. К., Ph.D докторы, «Гидрогеология, инженерлік және мұнай-газ геология» кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Өмірзақова Э. Ж., т. ғ. к., «Гидрогеология, инженерлік және мұнай-газ геология» кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Сведения об авторах:

Санатбеков М. Е., доктор Ph.D, ст. преподаватель кафедры «Гидрогеология, инженерная и нефтегазовая геология», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Муратова С. К., к. т. н., ассоц. профессор кафедры «Гидрогеология, инженерная и нефтегазовая геология», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Смабаева Р. К., доктор Ph.D, ст. преподаватель кафедры «Гидрогеология, инженерная и нефтегазовая геология», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Омирзакова Э. Ж., к. т. н., ст. преподаватель кафедры «Гидрогеология, инженерная и нефтегазовая геология», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

miningmetals
UZBEKISTAN



20-я юбилейная
Международная выставка
**Горное дело, металлургия
и металлообработка**

**27-29
ОКТАБРЯ
2026**

Ташкент
Узбекистан



Iteca Exhibitions
Тел.: +998 71 205 18 18

E-mail: mining@iteca.uz
Web: www.mining.uz

Код МРНТИ 38.33.15

Ж. С. Кенжетаев¹, *К. С. Тогизов², Қ. А. Жапабаев¹¹ТОО «Аскоре» (г. Алматы, Республика Казахстан),²Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Республика Казахстан)

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ТИПИЗАЦИИ УРАНОВЫХ РУД КАЗАХСТАНА

Аннотация. В статье рассмотрено распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в урановых рудах песчаникового типа Казахстана и их значение для геохимической типизации уранового сырья. Исследование основано на определении содержаний РЗЭ методом ИСП-МС после микроволнового разложения керновых материалов. Для сопоставления использованы сертифицированные сравнительные материалы OREAS 120, OREAS 100a и OREAS 105. Показано, что песчаниковые урановые руды Казахстана характеризуются накоплением легких РЗЭ, слабой отрицательной европиевой аномалией и сглаженным распределением средних и тяжелых лантаноидов. Отношения La/Yb , Gd/Yb , Eu/Eu^* и Ce/Ce^* могут применяться как дополнительные геохимические критерии для типизации урановых руд, реконструкции условий рудообразования и оценки источников вещества.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, урановые руды, геохимическая типизация, песчаниковые месторождения, ИСП-МС, хондрит-нормированные спектры, европиевая аномалия.

Сирекжер элементтері Қазақстанның уран кендерін типтеудің геохимиялық индикаторлары ретінде

Аңдатпа. Мақалада Қазақстанның құмтасты типтегі уран кендеріндегі сирекжер элементтерінің таралуы және олардың уран шикізатын геохимиялық типтеудегі маңызы қарастырылды. Зерттеу керндік материалдарды микротолқынды ыдыратудан кейін сирекжер элементтерін ИБП-МС әдісімен анықтауға негізделген. Салыстыру үшін OREAS 120, OREAS 100a және OREAS 105 сертифициталған салыстырмалы материалдары қолданылды. Қазақстанның құмтасты уран кендері жеңіл сирекжер элементтерінің жинақталуымен, әлсіз теріс европий аномалиясымен және орташа әрі ауыр лантаноидтардың тігістелген таралуымен сипатталатыны көрсетілді. La/Yb , Gd/Yb , Eu/Eu^* және Ce/Ce^* қатынастары уран кендерін типтеу, кен түзілу жағдайларын қайта құру және зат көздерін бағалау үшін қосымша геохимиялық критерийлер ретінде қолданылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: сирекжер элементтері, уран кендері, геохимиялық типтеу, құмтасты кен орындары, ИБП-МС, хондрит бойынша нормаланған спектрлер, европий аномалиясы.

Rare earth elements as geochemical indicators for the typification of uranium ores in Kazakhstan

Abstract. The article examines the distribution of rare earth elements (REE) in sandstone-type uranium ores of Kazakhstan and their role in the geochemical typification of uranium raw materials. The study is based on ICP-MS determination of REE contents after microwave digestion of core samples. Certified reference materials OREAS 120, OREAS 100a and OREAS 105 were used for comparison. It is shown that sandstone-type uranium ores of Kazakhstan are characterized by enrichment in light REEs, a weak negative europium anomaly, and a smoothed distribution of middle and heavy lanthanides. The ratios La/Yb , Gd/Yb , Eu/Eu^* and Ce/Ce^* may be used as additional geochemical criteria for uranium ore typification, reconstruction of ore-forming conditions and assessment of material sources.

Key words: rare earth elements, uranium ores, geochemical typification, sandstone deposits, ICP-MS, chondrite-normalized patterns, europium anomaly.

Введение

Редкоземельные элементы (РЗЭ) широко используются в геохимических исследованиях как индикаторы состава исходных пород, условий минералообразования и последующих преобразований рудного вещества. Их распределение в урановых рудах отражает особенности миграции минерализующих растворов, окислительно-восстановительный режим среды и участие различных минеральных фаз. Благодаря устойчивости относительных соотношений РЗЭ к вторичным изменениям они могут рассматриваться как геохимическая «сигнатура» уранового сырья [1].

Для Казахстана изучение РЗЭ в урановых рудах имеет особое значение, поскольку значительная часть промышленных запасов связана с песчаниковыми пластово-инфильтрационными месторождениями. Формирование таких месторождений происходит при переносе урана кислородсодержащими подземными водами и его осаждении на восстановительных геохимических барьерах [2, 3]. Минералогический состав урановых руд, включая настуран, коффинит и сопутствующие акцессорные минералы, влияет на накопление и перераспределение РЗЭ [4].

Распределение РЗЭ позволяет различать песчаниковые, гранитные и гидротермально измененные типы урановой минерализации. Для осадочных систем характерны более сглаженные спектры РЗЭ, связанные с составом областей сноса и сорбционными процессами [5], тогда как гранитные и гидротермальные руды часто демонстрируют более выраженное фракционирование и Eu -аномалию. В связи с этим РЗЭ-сигнатуры могут использоваться как допол-

нительные критерии геохимической типизации урановых руд.

Целью работы является оценка информативности распределения редкоземельных элементов как геохимических индикаторов типизации урановых руд Казахстана на основе хондрит-нормированных спектров РЗЭ, отношений La/Yb и Gd/Yb , а также аномалий Eu и Ce .

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись керновые материалы урановых месторождений песчаникового типа Казахстана. Для сравнительной оценки использованы сертифицированные материалы урановых руд OREAS 120, OREAS 100a и OREAS 105, представляющие различные геолого-генетические типы урановой минерализации.

Определение редкоземельных элементов проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой после микроволнового разложения образцов в системе MARS-6. Пробоподготовка включала кислотное разложение навески руды смесью HNO_3 , HCl и HF с последующим связыванием остаточной фтороводородной кислоты борной кислотой. Данный подход обеспечивает перевод силикатной матрицы и труднорастворимых минеральных фаз в раствор, пригодный для ИСП-МС анализа [6, 7].

Для геохимической интерпретации использовали хондрит-нормированные содержания РЗЭ [8]. В качестве диагностических параметров рассматривались отношения $(La/Yb)_N$ и $(Gd/Yb)_N$, характеризующие степень фракцио-

нирования легких и тяжелых лантаноидов, а также европиевая и цериевая аномалии.

Аномалии *Eu* и *Ce* рассчитывали по формулам:

$$Eu/Eu^* = \frac{Eu_N}{\sqrt{Sm_N \times Gd_N}}$$

$$Ce/Ce^* = \frac{2Ce_N}{La_N + Pr_N},$$

где индекс *N* – содержание элемента, нормированное на хондрит.

Результаты и обсуждение

Аналитическая оценка определения РЗЭ в урановых рудах

Использование сертифицированного материала OREAS 120 позволило оценить корректность пробоподготовки и определения РЗЭ методом ИСП-МС. Полученные значения по большинству элементов согласуются с аттестованными данными в пределах допустимых интервалов, что подтверждает полноту разложения урановой руды песчаникового типа и применимость выбранной схемы анализа для керновых материалов.

Стадийное кислотное разложение обеспечивает перевод силикатной матрицы и труднорастворимых минеральных фаз в раствор. Применение борной кислоты на завершающей стадии снижает риск образования труднорастворимых фторидов, что особенно важно при определении РЗЭ, поскольку их потери могут исказить форму хондрит-нормированных спектров.

Геохимические особенности песчаниковых урановых руд Казахстана

Хондрит-нормированные спектры РЗЭ керновых материалов урановых месторождений Казахстана характеризуются преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми. Для большинства изученных проб отношение $(La/Yb)_N$ находится в интервале примерно от 3 до 6, что указывает на умеренное фракционирование легких и тяжелых РЗЭ. Отношение $(Gd/Yb)_N$ изменяется в пределах около 1,0–1,9, что свидетельствует об отсутствии резкой дифференциации средних и тяжелых РЗЭ.

Характер распределения редкоземельных элементов в керновых материалах урановых месторождений Казахстана представлен на рис. 1.

Такая форма спектров типична для осадочных и переотложенных систем, где состав РЗЭ определяется не только первичным источником вещества, но и процессами переноса, сорбции и осаждения. В условиях песчаниковых урановых месторождений Казахстана РЗЭ могут быть связаны с глинистыми минералами, фосфатами, акцессорными минералами, органическим веществом и тонкодисперсными урановыми фазами. При этом низкотемпературные подземные воды не создают условий для столь выраженного фракционирования РЗЭ, как в магматических и высокотемпературных гидротермальных системах.

Важным признаком исследованных песчаниковых руд является слабая отрицательная европиевая аномалия. Значения Eu/Eu^* в среднем близки к 0,7 условных единиц, что указывает на умеренное обеднение европием. Такая

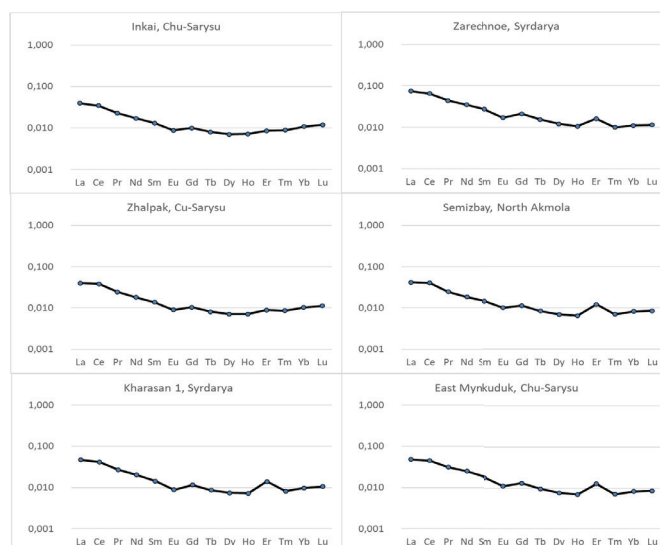


Рис. 1. Хондрит-нормированные спектры распределения РЗЭ в керновых материалах урановых месторождений Казахстана.

Сурет 1. Қазақстанның уран кен орындарының кердік материалдарындағы сирекжер элементтері таралуының хондрит бойынша нормаланған спектрлері.

Figure 1. Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns in core materials from uranium deposits of Kazakhstan.

аномалия может отражать участие кислых пород в области сноса, а также наследование особенностей исходного обломочного материала. В отличие от гранитных систем, где отрицательная *Eu*-аномалия часто связана с активной кристаллизацией плагиоклаза, в песчаниковых рудах она выражена слабее и имеет более сглаженный характер.

Отсутствие выраженной дифференциации средних и тяжелых РЗЭ также согласуется с моделью пластово-инфильтрационного рудообразования. Урановая минерализация в таких системах формируется при переносе урана окислительными водами и его осаждении на восстановительном геохимическом барьере. РЗЭ при этом могут мигрировать в виде комплексов, сорбироваться на поверхности минералов или фиксироваться в составе вторичных фаз, однако их распределение в целом сохраняет признаки осадочного источника.

Сравнение с урановыми рудами гранитного и гидротермального типов

Сравнение с материалами OREAS 100a и OREAS 105 показывает, что урановые руды различного генетического типа имеют заметно отличающиеся РЗЭ-сигнатуры. Для сопоставления песчаникового и гранитного типов урановой минерализации использованы хондрит-нормированные спектры сертифицированных материалов OREAS 120, OREAS 100a и OREAS 105, представленные на рис. 2.

Стандарт OREAS 120, относящийся к песчаниковому типу, демонстрирует выраженное накопление легких РЗЭ и постепенное снижение содержаний от *La* к *Lu*. При этом отношение $(La/Yb)_N$ для него выше, чем для большинства казахстанских песчаниковых проб, что может отражать

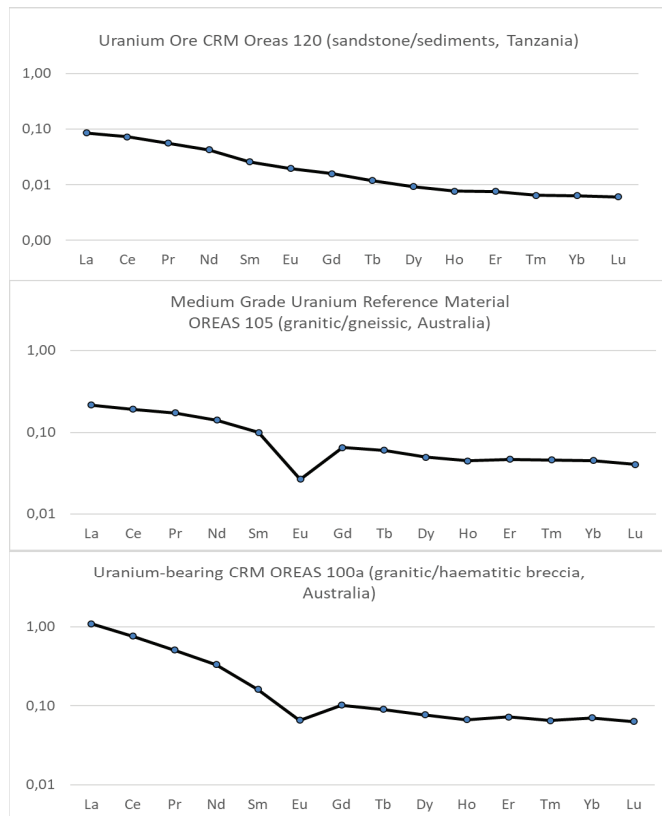


Рис. 2. Хондрит-нормированные спектры распределения РЗЭ в сертифицированных материалах урановых руд OREAS 120, OREAS 100a и OREAS 105.

Сурет 2. OREAS 120, OREAS 100a және OREAS 105 уран кендерінің сертификатталған материалдарындағы сирекжер элементтері таралуының хондрит бойынша нормаланған спектрлері.

Figure 2. Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns in certified uranium ore materials OREAS 120, OREAS 100a and OREAS 105.

особенности состава исходного материала и условий формирования конкретного месторождения.

Материалы OREAS 100a и OREAS 105, связанные с гранитными и гидротермально измененными породами Австралии, характеризуются более отчетливой отрицательной *Eu*-аномалией. Это объясняется поведением европия в магматических системах. В восстановительных условиях *Eu* может существовать в двухвалентной форме и изоморфно замещать *Sa* в кристаллической решетке плагиоклаза. В результате ранняя кристаллизация плагиоклаза приводит к обеднению остаточного расплава европием, что затем фиксируется в РЗЭ-спектрах гранитных и связанных с ними урановых руд.

Для гранитных урановых руд также характерно участие акцессорных минералов, таких как монацит, ксенотим, апатит, алланит, циркон и браннерит. Эти минералы способны концентрировать различные группы редкоземельных элементов, что приводит к более сложным профилям распределения РЗЭ. В урановых минералах и связанных с ними фазах могут преимущественно накапливаться элементы, имеющие

ионные радиусы, близкие к U^{4+} , что дополнительно влияет на распределение средних и тяжелых лантаноидов [9].

Таким образом, различия между песчаниковыми и гранитными урановыми рудами проявляются не только в абсолютных содержаниях РЗЭ, но и в форме хондрит-нормированных спектров, степени фракционирования легких и тяжелых лантаноидов, выраженности *Eu*-аномалии и характере корреляций между ураном и отдельными группами РЗЭ.

Диагностическое значение отношений La/Yb , Gd/Yb , Eu/Eu^* и Ce/Ce^*

Для типизации урановых руд наиболее информативными являются не только абсолютные концентрации РЗЭ, но и их относительные соотношения. Отношение $(La/Yb)_N$ отражает степень обогащения легкими редкоземельными элементами относительно тяжелых. Повышенные значения этого показателя указывают на преобладание легких РЗЭ (LREE) и могут быть связаны с участием кислого обломочного материала, а также с особенностями сорбции и осаждения РЗЭ в осадочной среде.

Отношение $(Gd/Yb)_N$ характеризует распределение средних и тяжелых РЗЭ. Небольшие значения этого показателя в казахстанских песчаниковых рудах свидетельствуют о слабой дифференциации средних и тяжелых РЗЭ (MREE и HREE). Это отличает их от некоторых гидротермальных и метаморфогенных систем, где средние редкоземельные элементы могут концентрироваться в результате структурного контроля минералов или изменения физико-химических параметров флюида.

Европиевая аномалия Eu/Eu^* является одним из наиболее важных индикаторов магматической предыстории вещества. Выраженная отрицательная *Eu*-аномалия часто указывает на фракционирование плагиоклаза, тогда как слабая или сглаженная *Eu*-аномалия характерна для осадочных систем и руд, сформированных при низкотемпературном гидрогенном переносе.

Цериевая аномалия Ce/Ce^* может использоваться для оценки окислительно-восстановительных условий, поскольку церий способен переходить из трехвалентного в четырехвалентное состояние. При окислительных условиях Ce^{4+} может фиксироваться в минеральных фазах иначе, чем соседние лантаноиды *La* и *Pr*. Поэтому поведение церия имеет значение при интерпретации условий формирования урановой минерализации и процессов вторичного преобразования руд.

Для обобщения диагностических признаков РЗЭ, применяемых при типизации урановых руд, основные геохимические показатели представлены в таблице 1.

РЗЭ-сигнатуры как инструмент геохимической типизации

Распределение редкоземельных элементов может рассматриваться как один из критериев геохимической типизации урановых руд. В отличие от главных элементов, концентрации которых могут существенно изменяться при выветривании, переработке или технологическом воздействии, относительные соотношения РЗЭ часто сохраняют информацию о геологическом источнике вещества и условиях формирования минерализации [10].

Для песчаниковых урановых руд Казахстана характерны следующие признаки: умеренное обогащение легкими

Таблица 1

Диагностическое значение геохимических показателей РЗЭ при типизации урановых руд

Кесте 1

Уран кендерін типтеу кезіндегі сирекжер элементтері геохимиялық көрсеткіштерінің диагностикалық маңызы

Table 1

Diagnostic significance of REE geochemical indicators in the typification of uranium ores

Геохимический показатель	Диагностическое значение	Возможная интерпретация для урановых руд
$(La/Yb)_N$	Соотношение легких и тяжелых РЗЭ	Степень фракционирования легких РЗЭ (LREE) и тяжелых РЗЭ (HREE), состав источника вещества
$(Gd/Yb)_N$	Соотношение средних и тяжелых РЗЭ	Наличие или отсутствие дифференциации средних РЗЭ (MREE) и тяжелых РЗЭ (HREE)
Eu/Eu^*	Европиевая аномалия	Магматическая предыстория, кристаллизация плагиоклаза, участие кислых пород
Ce/Ce^*	Цериевая аномалия	Окислительно-восстановительные условия и поведение Ce в системе

Примечание:

LREE – легкие редкоземельные элементы (Light Rare Earth Elements), MREE – средние редкоземельные элементы (Middle Rare Earth Elements), HREE – тяжелые редкоземельные элементы (Heavy Rare Earth Elements)

РЗЭ, слабая отрицательная **Eu**-аномалия, сглаженное распределение средних и тяжелых лантаноидов и отсутствие резких локальных максимумов на хондрит-нормированных спектрах. Эти признаки указывают на осадочный характер рудовмещающих пород, участие обломочного материала преимущественно кислого состава и низкотемпературные условия миграции урана и сопутствующих элементов.

Для гранитных и гидротермально измененных урановых руд характерны более выраженные геохимические контрасты: сильная отрицательная **Eu**-аномалия, более сложное распределение средних и тяжелых РЗЭ, а также влияние акцессорных минералов гранитоидов. Такие различия позволяют использовать РЗЭ-сигнатуры для сопоставления руд разных типов и определения вероятной геолого-генетической принадлежности неизвестных образцов.

Дополнительное значение данный подход имеет для ядерной криминалистики. В комплексе с изотопным составом урана, содержанием следовых элементов, фазовым составом и морфологией частиц РЗЭ-профили могут использоваться для формирования ядерно-криминалистического «отпечатка» материала [11]. Создание региональных баз данных по распределению РЗЭ в урановых рудах Казахстана может повысить точность идентификации происхождения уранового сырья и способствовать развитию систем ядерной безопасности [12].

Заключение

Распределение редкоземельных элементов является информативным геохимическим критерием для типизации урановых руд Казахстана. Хондрит-нормированные спектры РЗЭ позволяют выявлять различия между песчаниковыми, гранитными и гидротермально измененными типами урановой минерализации, а также оценивать вклад исходных пород, условий переноса и процессов осаждения.

Урановые руды песчаникового типа Казахстана характеризуются умеренным накоплением легких РЗЭ, слабой отрицательной европиевой аномалией и относительно сглаженным распределением средних и тяжелых лантаноидов. Эти признаки отражают осадочное происхождение рудовмещающих пород, участие кислого обломочного материала и формирование урановой минерализации в условиях низкотемпературного гидрогенного переноса.

Сравнение с сертифицированными материалами OREAS 100a и OREAS 105 показывает, что гранитные и гидротермально измененные урановые руды отличаются более выраженным фракционированием РЗЭ и заметной отрицательной **Eu**-аномалией, связанной с магматической дифференциацией и кристаллизацией плагиоклаза.

Отношения $(La/Yb)_N$, $(Gd/Yb)_N$, Eu/Eu^* и Ce/Ce^* могут использоваться как дополнительные диагностические показатели при геохимической типизации урановых руд, реконструкции условий рудообразования и идентификации источников вещества. Полученные закономерности имеют значение не только для геологии урановых месторождений, но и для формирования референсных баз данных, применимых в аналитическом контроле и ядерной криминалистике.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение базы данных РЗЭ-профилей урановых руд Казахстана, включение большего числа месторождений и сопоставление РЗЭ-сигнатур с изотопными, минералогическими и технологическими характеристиками уранового сырья.

Благодарность

Данная статья финансировалась Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме AP22785533 «Разработка эффективной технологии извлечения скандия из технологических растворов скважинной добычи».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Происхождение урановых месторождений, выявленное по их сигнатуре редкоземельных элементов / J. Mercadier [и др.] // *Terra Nova*. – 2011. – Т. 23. – № 4. – С. 264–269 (на английском языке)
2. Строение и история ураноносных палеоцен-эоценовых отложений, сформированных на восточной окраине Перу-Тетиса (Чу-Сарысувский бассейн, Южный Казахстан) / A. Dillinger [и др.] // *Sedimentary Geology*. – 2024. – Т. 468. – Ст. 106677 (на английском языке)
3. Афанасьев Г. В., Миронов Ю. Б., Пинский Э. М. Новые аспекты формирования урановых месторождений песчаникового типа // *Региональная геология и металлогения*. – 2014. – № 59. – С. 89–96 (на русском языке)
4. Язиков Е. Г. Минералогия урана: учебное пособие. – Томск: Томский политехнический университет, 2010. – 143 с. (на русском языке)
5. Медведева С. А. Характер распределения редкоземельных элементов в мезозойских осадочных породах Нижнего Приамурья // *Региональные проблемы*. – 2021. – Т. 24. – № 4. – С. 25–34 (на русском языке)
6. Пат. на полезную модель № 4046 Респ. Казахстан. Способ подготовки проб урановых руд и керновых материалов песчаникового типа для спектрометрического анализа / Б. Ж. Токсанбаев, А. К. Торебеков; заявитель и патентообладатель ТОО «Институт высоких технологий». – № 2019/0191.2; заявл. 28.02.2019; опубл. 07.06.2019, Бюл. № 23 (на русском языке)
7. Метод микроволнового разложения для анализа редкоземельных элементов, тория и урана в геохимических сертифицированных стандартных образцах и почвах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой / S. Kasar [и др.] // *Molecules*. – 2020. – Т. 25. – № 21. – Ст. 5178 (на английском языке)
8. Bau M., Möller P. Фракционирование редкоземельных элементов в метаморфогенных гидротермальных кальците, магнезитах и сидеритах // *Mineralogy and Petrology*. – 1992. – Т. 45. – С. 231–246 (на английском языке)
9. Finch R., Murakami T. Систематика и парагенезис минералов урана // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 1999. – Т. 38. – С. 91–180 (на английском языке)
10. Новый инструмент ядерной криминалистики, основанный на нормализованных по типу месторождения сигнатурах редкоземельных элементов / T. L. Spano [и др.] // *Terra Nova*. – 2017. – Т. 29. – № 5. – С. 294–305 (на английском языке)
11. Zheltova G. A., Glushchenko V. N., Kips R., Krasnopyorova M. V., Zheltov D. A., Milts O. S., Silachyov I. Yu., Panova E. N., Toksanbayev B. Zh., Baltabayev A. Zh., Blynskiy P. A. Комплекс методов аналитического исследования ураносодержащего сырья для целей ядерной криминалистики // *Сборник тезисов 2-й Международной конференции по радиоаналитической и ядерной химии*. – Будапешт, Венгрия, 2019. – С. 141 (на английском языке)
12. Токсанбаев Б. Ж., Жапабаев Қ. А., Төребеков А. Қ. Изучение методов идентификации сигнатур урановых концентратов // *Труды XI Международной научно-практической конференции «Развитие урановой и редкометалльной промышленности»*. – Алматы, 2024. – С. 82–85 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Уран кен орындарының шығу тегін олардың сиреккер элементтері сигнатуралары бойынша анықтау / J. Mercadier [және т. б.] // *Terra Nova*. – 2011. – Т. 23. – № 4. – Б. 264–269 (ағылшын тілінде)
2. Перу-Тетистің шығыс жиегінде қалыптасқан уранды палеоцен-эоцен шөгінділерінің құрылысы мен даму тарихы (Шу-Сарысу бассейні, Оңтүстік Қазақстан) / A. Dillinger [және т. б.] // *Sedimentary Geology*. – 2024. – Т. 468. – 106677 (ағылшын тілінде)
3. Афанасьев Г. В., Миронов Ю. Б., Пинский Э. М. Құмтасты типтегі уран кен орындарының қалыптасуының жаңа аспектілері // *Өңірлік геология және металлогения*. – 2014. – № 59. – Б. 89–96 (орыс тілінде)
4. Язиков Е. Г. Уран минералогиясы: оқу құралы. – Томск: Томск политехникалық университеті, 2010. – 143 б. (орыс тілінде)
5. Медведева С. А. Төменгі Амур маңының мезозойлық шөгінді жыныстарындағы сиреккер элементтерінің таралу сипаты // *Өңірлік мәселелер*. – 2021. – Т. 24. – № 4. – Б. 25–34 (орыс тілінде)
6. Пайдалы модельге пат. № 4046 Қазақстан Республикасы. Құмтасты типтегі уран кендері мен керндік материалдарының үлгілерін спектрометриялық талдауға дайындау тәсілі / Б. Ж. Токсанбаев, А. Қ. Төребеков; өтінім беруші және патент иесі: «Жоғары технологиялар институты» ЖШС (KZ). – № 2019/0191.2; өтінім берілген 28.02.2019; жарияланған 07.06.2019, Бюл. № 23 (орыс тілінде)
7. Геохимиялық сертификатталған стандартты үлгілер мен топырақтардағы сиреккер элементтерін, торий мен уранды индуктивті байланысқан плазмалы масс-спектрометрия әдісімен талдауға арналған микротолқынды ыдырату әдісі / S. Kasar [және т. б.] // *Molecules*. – 2020. – Т. 25. – № 21. – 5178 (ағылшын тілінде)
8. Bau M., Möller P. Метаморфогендік гидротермалдық кальцитте, магнезитте және сидеритте сиреккер элементтерінің фракциялануы // *Mineralogy and Petrology*. – 1992. – Т. 45. – Б. 231–246 (ағылшын тілінде)
9. Finch R., Murakami T. Уран минералдарының жүйеленуі мен парагенезисі // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 1999. – Т. 38. – Б. 91–180 (ағылшын тілінде)
10. Кен орнының типі бойынша нормаланған сиреккер элементтері сигнатураларына негізделген ядролық криминалистиканың жаңа құралы / T. L. Spano [және т. б.] // *Terra Nova*. – 2017. – Т. 29. – № 5. – Б. 294–305 (ағылшын тілінде)
11. Zheltova G. A., Glushchenko V. N., Kips R., Krasnopyorova M. V., Zheltov D. A., Milts O. S., Silachyov I. Yu., Panova E. N., Toksanbayev B. Zh., Baltabayev A. Zh., Blynskiy P. A. Ядролық криминастика мақсатында құрамында уран бар шикізатты аналитикалық зерттеу әдістерінің кеңені // *Радиоаналитикалық және ядролық химия бойынша 2-ші халықаралық конференцияның тезистер жинағы*. – Будапешт, Венгрия, 2019. – 141 б. (ағылшын тілінде)

12. Токсанбаев Б. Ж., Жапабаев Қ. А., Төребеков А. Қ. Уран концентраттарының сигнатураларын сәйкестендіру әдістерін зерттеу // «Уран және сирекметалл өнеркәсібін дамыту» XI халықаралық ғылыми-практикалық конференциясының еңбектері. – Алматы, 2024. – Б. 82–85 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. *Origin of Uranium Deposits Revealed by Their Rare Earth Element Signature* / J. Mercadier et al. // *Terra Nova*. – 2011. – Vol. 23. – No. 4. – P. 264–269 (in English)
2. *Architecture and History of Uranium-Bearing Palaeocene-Eocene Strata Deposited on the Eastern Margin of the Peri-Tethys (Chu-Sarysu Basin, South Kazakhstan)* / A. Dillinger et al. // *Sedimentary Geology*. – 2024. – Vol. 468. – Article 106677 (in English)
3. Afanasyev G. V., Mironov Yu. B., Pinsky E. M. *Novye aspekty formirovaniya uranovykh mestorozhdenii peschannikovogo tipa* [New Aspects of the Formation of Sandstone-Type Uranium Deposits]. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metallogeny]. – 2014. – No. 59. – P. 89–96 (in Russian)
4. Yazikov E. G. *Mineralogiya urana: uchebnoe posobie* [Mineralogy of Uranium: Textbook]. – Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2010. – 143 p. (in Russian)
5. Medvedeva S. A. *Kharakter raspredeleniya redkozemelnykh elementov v mezozoiskikh osadochnykh porodakh Nizhnego Priamuria* [Distribution Pattern of Rare Earth Elements in Mesozoic Sedimentary Rocks of the Lower Amur Region]. *Regionalnye problemy* [Regional Problems]. – 2021. – Vol. 24. – No. 4. – P. 25–34 (in Russian)
6. *Pat. for Utility Model No. 4046, Republic of Kazakhstan. Sposob podgotovki prob uranovykh rud i kernovykh materialov peschanikovogo tipa dlia spektrometricheskogo analiza* [Method for Preparing Sandstone-Type Uranium Ore and Core Samples for Spectrometric Analysis] / B. Zh. Toksanbaev, A. K. Torebekov; applicant and patent holder: Institute of High Technologies LLP (KZ). – No. 2019/0191.2; appl. 28.02.2019; publ. 07.06.2019, Bull. No. 23 (in Russian)
7. *A Microwave Digestion Technique for the Analysis of Rare Earth Elements, Thorium and Uranium in Geochemical Certified Reference Materials and Soils by ICP-MS* / S. Kasar et al. // *Molecules*. – 2020. – Vol. 25. – No. 21. – Article 5178 (in English)
8. Bau M., Möller P. *Rare Earth Element Fractionation in Metamorphogenic Hydrothermal Calcite, Magnesite and Siderite* // *Mineralogy and Petrology*. – 1992. – Vol. 45. – P. 231–246 (in English)
9. Finch R., Murakami T. *Systematics and Paragenesis of Uranium Minerals* // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 1999. – Vol. 38. – P. 91–180 (in English)
10. *A Novel Nuclear Forensic Tool Involving Deposit Type Normalized Rare Earth Element Signatures* / T. L. Spano et al. // *Terra Nova*. – 2017. – Vol. 29. – No. 5. – P. 294–305 (in English)
11. Zheltova G. A., Glushchenko V. N., Kips R., Krasnopyorova M. V., Zheltov D. A., Miltz O. S., Silachyov I. Yu., Panova E. N., Toksanbaev B. Zh., Baltabayev A. Zh., Blynskiy P. A. *Complex of Methods for Analytical Study of Uranium-Containing Raw Materials for Nuclear Forensics Purposes* // In: *Book of Abstracts of the 2nd International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – Budapest, Hungary, 2019. – P. 141 (in English)
12. Toksanbaev B. Zh., Zhapabaev K. A., Torebekov A. K. *Izucheniye metodov identifikatsii signatur uranovykh kontsentratsiy* [Study of Methods for Identifying Signatures of Uranium Concentrates] // In: *Trudy XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitiye uranovoi i redkometall'noi promyshlennosti»* [Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference «Development of the Uranium and Rare-Metal Industry»]. – Almaty, 2024. – P. 82–85 (in Russian)

Сведения об авторах:

Кенжетаяев Ж. С., Ph.D, руководитель проекта, ТОО «АСКОРЕ» (г. Алматы, Казахстан), kzhiger@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0003-2009-6655>
Тогизов К. С., Ph.D, ассоциированный профессор, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), k.togizov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-4830-405X>

Жапабаев Қ. А., научный сотрудник, ТОО «АСКОРЕ» (г. Алматы, Казахстан), zhapabaev.kudaibergen@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8285-9545>

Авторлар туралы мәліметтер:

Кенжетаяев Ж. С., Ph.D, жоба жетекшісі, «АСКОРЕ» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

Тогизов К. С., Сәтбаев университетінің Ph.D докторы, қауымдастық профессоры (Алматы қ., Қазақстан)

Жапабаев Қ. А., ғылыми қызметкер, «АСКОРЕ» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Kenzhetayev Zh. S., Ph.D, Project Manager, AScore LLP (Almaty, Kazakhstan)

Togizov K. S., Ph.D, associate professor, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Zhapabayev K. A., research associate, AScore LLP (Almaty, Kazakhstan)

Код МРНТИ 36.23.25

M. Amirkhanov¹, *Y. Zhakypbek¹, N. Mukhambetzhanova², Sun Hao³

¹Satbayev University (Almaty, Kazakhstan),

²L. N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan),

³China University of Mining and Technology (Beijing, China)

SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF SURFACE WATER CHANGES IN MAKAT AND ZHYLYOI DISTRICTS

Abstract. This study investigates long-term surface water dynamics in Makat and Zhylyoi districts (Western Kazakhstan) from 1994 to 2024 using multi-temporal Landsat imagery and NDWI, MNDWI, and WRI indices. The results reveal pronounced spatial and temporal variability, with maximum surface water extent in the late 1990s-early 2000s followed by progressive decline after 2010 and severe depletion in recent years. Western floodplain zones remained the most persistent water features, while inland basins experienced substantial contraction. The combined indices indicate increasing water stress driven by climatic variability and anthropogenic pressure, highlighting the need for continuous remote sensing-based monitoring and sustainable water resource management in semi-arid environments.

Key words: remote sensing, NDWI, MNDWI, WRI, surface water dynamics, land degradation, Pre-Caspian region.

Мақат және Жылыой аудандарының жер үсті суларының өзгеру динамикасын кеңістіктік-уақыттық талдау
Аннотация. Бұл зерттеу 1994 жылдан 2024 жылға дейін Мақат және Жылыой аудандарындағы (Батыс Қазақстан облысы) жер үсті суларының ұзақ мерзімді динамикасын Көп уақыттық Landsat кескіндерін және NDWI, MNDWI және WRI индекстерін пайдалана отырып зерттейді. Нәтижелер 1990-шы жылдардың аяғы мен 2000-шы жылдардың басындағы жер үсті суларының максималды көлемімен айқын кеңістіктік және уақыттық өзгерістікті көрсетеді, содан кейін 2010 жылдан кейінгі үдемелі төмендеу және соңғы жылдары қатты сарқылу байқалады. Батыс жайылма аймақтары ең тұрақты су объектілері болып қала берді, ал ішкі бассейндер айтарлықтай қысқарды. Біріктірілген индекстер климаттың өзгермелілігі мен антропогендік қысымға байланысты су кернеуінің жоғарылауын көрсетеді, бұл қашықтықтан зондтауға негізделген үздіксіз бақылау және жартылай құрғақ ортада су ресурстарын тұрақты басқару қажеттілігін көрсетеді.

Түйінді сөздер: қашықтықтан зондтау, NDWI, MNDWI, WRI, жер үсті суларының динамикасы, жердің деградациясы, Каспийге дейінгі аймақ.

Пространственно-временной анализ динамики изменения поверхностных вод Макацкого и Жылыойского районов

Аннотация. В этой работе исследуется долгосрочная динамика поверхностных вод в Макацком и Жылыойском районах (Западный Казахстан) с 1994 по 2024 годы с использованием разновременных изображений Landsat и индексов NDWI, MNDWI и WRI. Результаты показывают выраженную пространственную и временную изменчивость: максимальный объем поверхностных вод был достигнут в конце 1990-х – начале 2000-х годов, за которым последовал постепенный спад после 2010 года и серьезное истощение в последние годы. Западные пойменные зоны оставались наиболее устойчивыми водными объектами, в то время как внутренние бассейны испытывали значительное сокращение. Объединенные индексы указывают на растущий дефицит водных ресурсов, вызванный изменчивостью климата и антропогенным воздействием, подчеркивая необходимость постоянного мониторинга на основе дистанционного зондирования и устойчивого управления водными ресурсами в полусухих районах.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, NDWI, MNDWI, WRI, динамика поверхностных вод, деградация почв, Прикаспийский регион.

Introduction

Surface water resources play a critical role in sustaining ecosystems, agriculture, and socio-economic development, particularly in arid and semi-arid regions where water availability is highly variable and sensitive to climatic fluctuations. Accurate and timely assessment of surface water dynamics is therefore essential for effective water resource management and environmental planning [1]. Traditional field-based monitoring methods are often limited by sparse spatial coverage and high operational costs, making satellite remote sensing an increasingly important tool for large-scale and long-term hydrological studies [2].

In recent decades, spectral indices derived from multispectral satellite imagery have been widely applied to detect and monitor surface water bodies. Among these, the Normalized Difference Water Index (NDWI), Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), and Water Retention Index (WRI) have proven particularly effective for identifying open water, distinguishing water from built-up and vegetated areas, and evaluating moisture retention characteristics [3].

NDWI may misclassify moist soil and dense vegetation as water under certain environmental conditions, while MNDWI can be sensitive to sediment-laden waters and variations in land surface reflectance. Similarly, WRI is often affected by seasonal fluctuations in vegetation cover and soil moisture, which may reduce classification accuracy in heterogeneous landscapes.

Although remote sensing techniques have been successfully applied in many regions, comprehensive long-term as-

sessments integrating multiple water indices remain relatively scarce in arid and semi-arid environments. Existing research has largely concentrated on major river basins and large lakes, whereas smaller floodplain systems and regionally important water bodies often receive less attention. In the case of Makat and Zhylyoi districts, studies addressing long-term surface water dynamics are particularly limited despite the region's vulnerability to climate variability, land-use changes, and increasing anthropogenic pressure on water resources [4,5]. Consequently, there remains a need for an integrated approach capable of improving the reliability of water body detection and providing a more comprehensive understanding of spatio-temporal changes in surface water distribution.

The objective of this study is to analyze spatiotemporal changes in surface water distribution and water basin dynamics in Makat and Zhylyoi districts from 1994 to 2024 using multi-temporal satellite data and NDWI, MNDWI, and WRI indices. By combining these indicators with change detection analysis, this research aims to identify long-term trends in water availability, characterize spatial patterns of water basin transformation, and provide scientific support for sustainable water resource management in arid and semi-arid environments.

Materials and Methods

Study Area

The general landscape of the study area Makat district (47°38'20" N to 53°16'46" E) and Zhylyoi district (46°59'46"

to 54°36'18" E) is located in the western part of the Kazakhstan, Atyrau region (oblast). The studied region covers a 4900 km² area of Makat district and 29 400 km² area of Zhylyoi district. According to Figure 1, the elevation of the Makat and Zhylyoi districts (Atyrau region, western Kazakhstan) ranges approximately from -25 to 80 m above sea level, reflecting the lowland geomorphology of the Caspian Depression. The region is characterized by an arid continental climate with low annual precipitation and high evapotranspiration rates. Land use is dominated by extensive pastoral systems, while crop production is limited and largely dependent on moisture availability [6]. The prevailing soils are saline and sandy loams with weak structural stability and sparse vegetation cover. In recent decades, accelerated land degradation has been observed, manifested by secondary salinization, wind erosion, and surface crusting. These processes are further exacerbated by prolonged drought events and anthropogenic pressures associated with oil and gas development. Overall, desertification and soil degradation constitute the primary environmental constraints in the Makat and Zhylyoi districts, significantly limiting agricultural potential and ecosystem resilience [7].

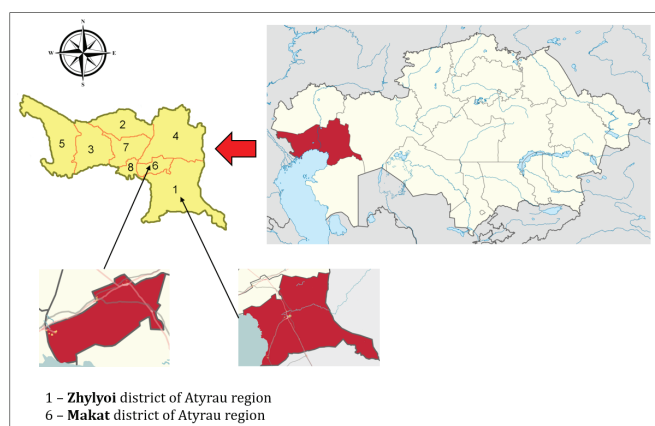


Figure 1. Location of study area in the Atyrau region (Western Kazakhstan).

Сурет 1. Зерттеу аймағының Атырау облысында орналасқан жері (Батыс Қазақстан).

Рис. 1. Расположение района исследования в Атырауской области (Западный Казахстан).

Climatic Factors

The precipitation and temperature data for selected years (1994, 1998, 2002, 2013, 2015, 2017, 2021 and 2024) for the region under study were obtained from the global climate reanalysis of ERA5-Land, created by the European Center for Medium-term Weather Forecasts (ECMWF) as part of the Copernicus program (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets> (accessed December 11–2025)). Precipitation and monthly temperature in the Makat district are shown for the study area for the period from 1994 to 2024 in Figure 2 and Figure 3, and for the Zhylyoi district in Figures 4 and 5.

Monthly air temperatures range from approximately -9 °C in winter (January – February) to over +30 °C in summer (June – July), resulting in an annual amplitude exceeding 35 °C. Analysis of multi-year data (1994–2024) reveals a clear

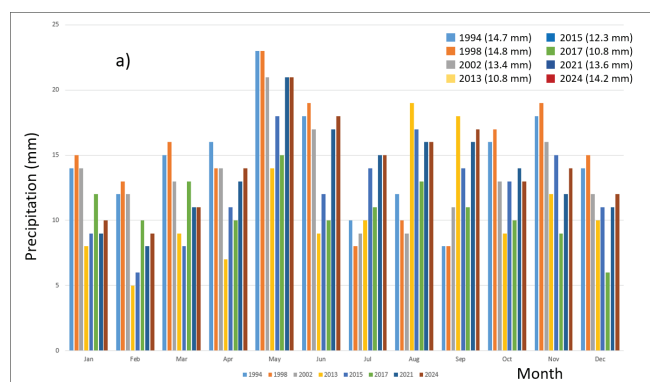


Figure 2. Average monthly precipitation from 1994 to 2024 in Makat district.

Сурет 2. Мақат ауданы 1994–2024 ж жауын-шашынның орташа айлық мөлшері.

Рис. 2. Среднемесячное количество осадков в Мака́тском районе с 1994 по 2024 гг.

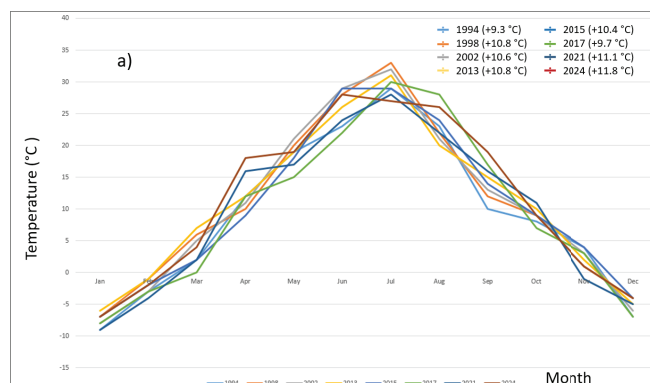


Figure 3. Average monthly temperature from 1994 to 2024 in Makat district.

Сурет 3. Мақат ауданы 1994–2024 ж. орташа айлық ауа температура көрсеткіші.

Рис. 3. Среднемесячная температура воздуха в Мака́тском районе с 1994 по 2024 гг.

warming trend, with mean annual temperature increasing from about 9.3 °C in 1994 to 11.8 °C in 2024.

In contrast, precipitation remains persistently low and highly variable, with annual totals ranging approximately from 108 to 148 mm and no evident increasing trend. Monthly precipitation is unevenly distributed throughout the year, with relative maxima in spring and late summer and minimal values during winter. The divergence between rising air temperatures and stable low precipitation leads to a growing moisture deficit, intensifying arid conditions in the region.

Multi-year analysis (1994–2024) indicates a consistent warming tendency, with mean annual temperatures increasing from approximately 8.7 °C in 1994 to 11.1 °C in 2024. The most recent years (2015–2024) show persistently higher temperatures compared to the 1990s, confirming ongoing regional climate warming in the eastern Caspian lowland.

Despite interannual fluctuations, no long-term increasing trend in precipitation is observed. The combination of rising air temperatures and persistently low rainfall leads to an in-

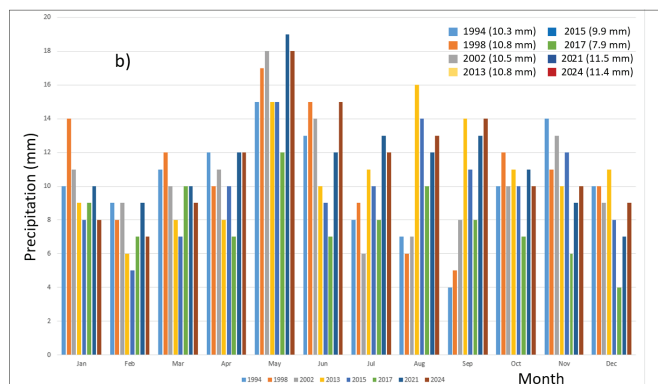


Figure 4. Average monthly precipitation from 1994 to 2024 in Zhylyoi district.

Сурет 4. Жылыой ауданы 1994–2024 ж жауын-шашынның орташа айлық мөлшері.

Рис. 4. Среднемесячное количество осадков в Жылыойском районе с 1994 по 2024 гг.

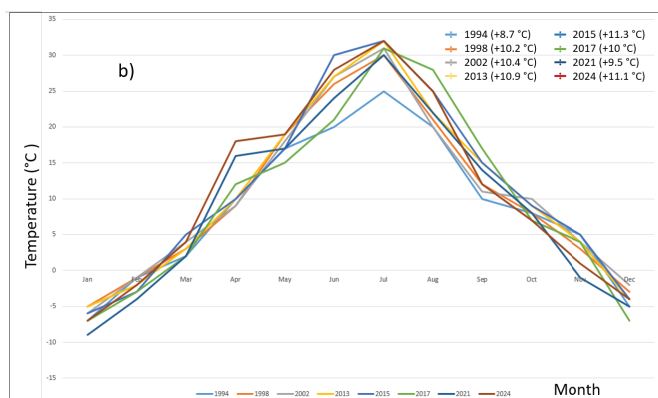


Figure 5. Average monthly temperature from 1994 to 2024 in Zhylyoi district.

Сурет 5. Жылыой ауданы 1994–2024 ж. орташа айлық ауа температура көрсеткіші.

Рис. 5. Среднемесячная температура воздуха в Жылыойском районе с 1994 по 2024 гг.

creasing moisture deficit, enhancing aridity and intensifying stress on vegetation cover. These climatic conditions represent a major driving force behind land degradation and desertification processes in the Zhylyoi district.

More than 70% of precipitation in the Makat and Zhylyoi districts falls between the end of March and May. The total amount of precipitation for the selected periods (1994, 1998, 2002, 2013, 2015, 2017, 2021 and 2024) ranged from 7.9 mm to 14.8 mm shown in Figure 2 and Figure 4. The precipitation distribution in this area is uneven. In addition, according to Figures 3 and 5, the average annual temperature in the studied region for the selected periods is (1994, 1998, 2002, 2013, 2015, 2017, 2021 and 2024) ranged from +8.7 °C to +11.8 °C. These areas, like the entire Atyrau region, are classified as a region with a cold and semi-arid climate [8].

Satellite Image Processing

The Landsat 8 Level-1 images for the months of April–October were acquired for the years 1994–2024 from the USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) open-access

geospatial data portal developed by the United States Geological Survey. The path/row was 29/30. The cloud cover in the applied images was less than 5%. The OLI sensor onboard Landsat 8 captures data in several spectral bands, with a resolution of 30 m, as presented in Table 1 [9].

Table 1
Wavelengths and spatial resolutions for Landsat 8 OLI data
Кесте 1
Landsat 8 OLI деректері үшін толқын ұзындығы және кеңістіктік ажыратымдылықтар

Таблица 1
Длины волн и пространственное разрешение для данных Landsat 8 OLI

Band	Abbreviation	Spectral range (μm)	Spatial Resolution (m)
Coastal/Aerosol	Band 1	0.435–0.451	30
Blue	Band 2	0.452–0.512	30
Green	Band 3	0.533–0.590	30
Red	Band 4	0.636–0.673	30
NIR	Band 5	0.851–0.879	30
SWIR-1	Band 6	1.566–1.651	30
TIR-1	Band 10	10.60–11.19	100
TIR-2	Band 11	11.50–12.51	100
SWIR-2	Band 7	2.107–2.294	30
Pan	Band 8	0.503–0.676	15
Cirrus	Band 9	1.363–1.384	30

Image Preprocessing

First, radiometric calibration was performed using the radiance calibrating method in the Radiometric Calibration toolkit, and atmospheric correction was performed using the fast method in the ArcToolbox toolkit in ArcMap (ArcGIS Desktop 10.3). The reflection coefficient was then calculated from the numerical values of the bands $\times 0.0001$ via the Environments tab. Spectral indices such as the Normalized Difference Water index (NDWI), the modified normalized difference water index (MNDWI), and the water index used to estimate the moisture content in vegetation (WRI) were calculated using a suite of tools in the ArcGIS Desktop.

The methodological framework consisted of five main stages. First, multi-temporal Landsat imagery (1994–2024) and ERA5-Land climate data were collected for the study area. Second, radiometric calibration and atmospheric correction were applied to obtain surface reflectance values. Third, NDWI, MNDWI, and WRI indices were calculated using the corresponding spectral bands. Fourth, water and non-water areas were classified based on index threshold values and converted into water masks. Finally, change detection analysis was performed to identify temporal variations in surface water distribution and basin dynamics and to evaluate long-term hydrological trends in relation to climatic variability.

Surface Water Index

NDWI, an important spectral water index, was employed to remote-sense surface water based on Equation (1):

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR). \quad (1)$$

For calculating this spectral index, B3 and B5, i. e., Green and near-infrared reflectance (defined in Table 1), respectively, were used. The principle behind NDWI is simple: water reflects green light relatively well but strongly absorbs near-infrared radiation. Typical NDWI range values: (+0.3 to 1.0 is clear or open water), (+0.0 to +0.3 is wet soil, shallow water, mixed pixels), (-0.1 to +0.0 is bare ground or dry surfaces) and (-0.1 is vegetation, urban areas, or other non-water features)¹.

Modified values of Surface Water Index

MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) is a remote sensing index used to detect surface water on satellite imagery, with improved performance in urban and built-up areas compared to NDWI. It is calculated using the green and shortwave infrared (SWIR) bands (2):

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR). \quad (2)$$

The method works because water strongly absorbs SWIR radiation while reflecting green light, whereas dry soil and urban surfaces reflect SWIR much more. This contrast makes water appear with higher (positive) values and non-water features with lower or negative values. Typical MNDWI values range from about 0.3 to 1.0 for open water, 0.0 to 0.3 for shallow water or wet soil, -0.1 to 0.0 for dry bare ground, and below -0.1 for vegetation and built-up areas. In many applications, a simple threshold of $MNDWI > 0$ is used to extract water bodies. MNDWI is widely applied for mapping rivers and lakes, flood monitoring, urban water analysis, shoreline change detection, and environmental studies. One key advantage of MNDWI is that it reduces confusion between water and buildings or asphalt, making it especially useful in cities [10].

Modified values of Surface Water Index

WRI (Water Ratio Index) is a spectral index used in remote sensing to identify surface water on satellite imagery. It is calculated using visible and infrared bands, most commonly as

$$WRI = (Green + RED) / (NIR + SWIR). \quad (3)$$

The index is based on the fact that water reflects visible light (green and red) relatively well, while strongly absorbing near-infrared (NIR) and shortwave infrared (SWIR) radiation. Because of this contrast, water pixels usually produce values greater than 1, while vegetation, soil, and urban surfaces tend to have values below 1. In practical applications, a threshold of $WRI > 1$ is often used to extract water bodies. WRI is applied for mapping rivers and lakes, flood detection, wetland studies, and general water monitoring. Compared to NDWI and MNDWI, WRI relies on band ratios rather than differences and can be sensitive to atmospheric effects and bright surfaces, but it remains a simple and useful index for rapid water detection [11].

¹Бюро национальной статистики Республики Казахстан. Национальный статистический портал. 2021. – URL: <https://stat.gov.kz/en/national/2021/> (дата обращения: 07.09.2025).

Results and Discussion

The NDWI maps of Makat District reveal clear temporal changes in surface water from 1994 to 2024. Water bodies are widespread in 1994–2002, especially in the south, with scattered patches inland, indicating higher availability. By 2013, surface water becomes reduced and fragmented, with minimal presence in 2015 and 2021. These patterns indicate a significant long-term decline in surface water, likely driven by drier conditions, reduced inflow, and climatic variability.

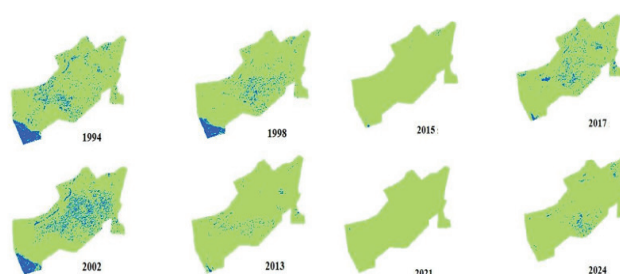


Figure 6. Multi-temporal NDWI analysis for assessing surface moisture changes in the Pre-Caspian region (Makat district).

Сурет 6. Каспий аймағы жер бетіндегі ылғалдың өзгеруін бағалау үшін NDWI көп уақыттық талдауы.

Рис. 6. Многовременной анализ NDWI для оценки изменений поверхностной влажности в Прикаспийском регионе.

Overall, the NDWI results suggest a long-term reduction and increased instability of surface water resources in Makat-district, with peak water coverage in the 1990s-early 2000s, followed by a marked decline after 2010 and only partial recovery in recent years. This pattern may reflect combined impacts of climate change, hydrological alterations, and human activities, emphasizing the need for continuous monitoring and sustainable water management.

The NDWI maps for Zhylyoi district reveal pronounced temporal variability in surface water distribution from 1994 to 2024. Marked parts with different colors indicate surface water, while green areas represent vegetation and non-water surfaces. In the early years (1994, 1998, and 2002), extensive and continuous water bodies are clearly visible along the western part of the district, forming a prominent north-south water corridor. By 2013, although the main western water feature remains visible, its extent becomes more fragmented, and the number of small inland water patches decreases. A dramatic reduction is observed in 2015, when surface water is limited to narrow segments of the western corridor and sparse isolated pixels elsewhere. This decline becomes even more pronounced in 2021, when detectable water bodies are nearly absent across the entire district. In 2017, a partial recovery is evident, with the western water corridor reappearing more distinctly and scattered water pixels returning in central areas. However, by 2024, surface water coverage again drops sharply, leaving only minimal residual water signals.

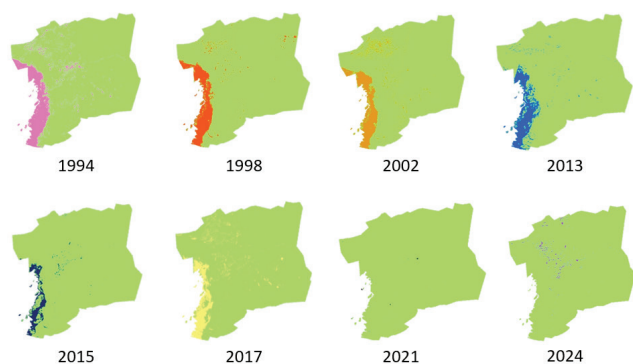


Figure 7. Multi-temporal NDWI analysis for assessing surface moisture changes in the Pre-Caspian region (Zhylyoi district).

Сурет 7. Каспий аймағы жер бетіндегі ылғалдың өзгеруін бағалау үшін NDWI көп уақыттық талдауы (Жылыой ауданы).

Рис. 7. Многовременной анализ NDWI для оценки изменений поверхностной влажности в Прикаспийском регионе (Жылыойский район).

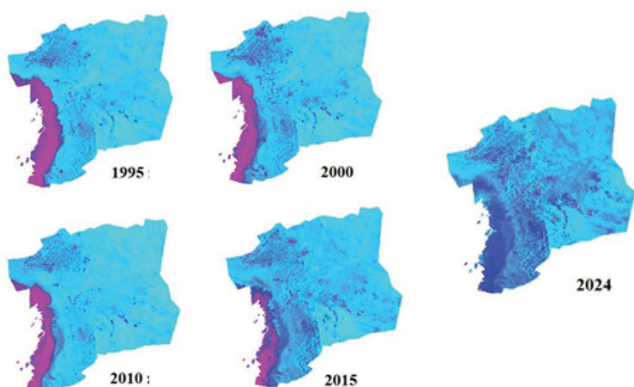


Figure 8. Multi-temporal MNDWI analysis of surface water and moisture variability in the Pre-Caspian region (Zhylyoi district).

Сурет 8. Каспий аймағы жер үсті суларының және ылғалдың өзгергіштігінің көп уақыттық MNDWI талдауы (Жылыой ауданы).

Рис. 8. Разновременный MNDWI-анализ изменчивости поверхностных вод и влажности в Прикаспийском регионе (Жылыойский район).

The MNDWI maps for Makat District show clear temporal changes in surface water distribution from 1995 to 2024. High MNDWI values in 1995–2000 form a wide, continuous western corridor associated with the main river or floodplain, with scattered inland water patches indicating relatively wet conditions. By 2010, water extent slightly decreases, and after 2015 the western water body becomes narrower and fragmented. In 2024, high MNDWI values are largely confined to a narrow southwestern strip, with minimal water signals elsewhere. Overall, the results indicate a long-term decline in surface water availability, consistent with NDWI and WRI analyses, highlighting increasing water stress and the need for continuous monitoring and sustainable water management.

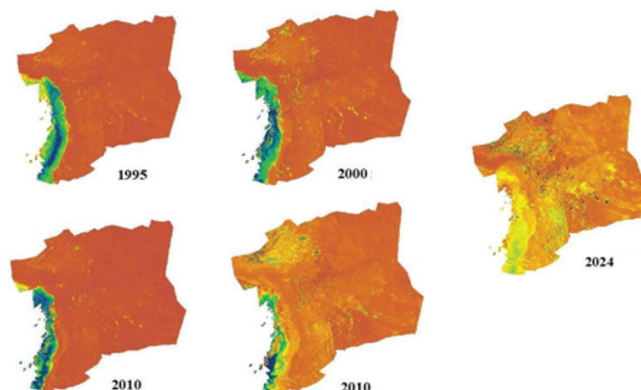


Figure 9. Multi-temporal WRI mapping to support environmental remediation planning in the Pre-Caspian region (Zhylyoi district).

Сурет 9. Каспий аймағы жер үсті суларының және ылғалдың өзгергіштігінің көп уақыттық mndwi талдауы (Жылыой ауданы).

Рис. 9. Разновременный MNDWI-анализ изменчивости поверхностных вод и влажности в Прикаспийском регионе (Жылыойский район).

The WRI maps for Makat District reveal pronounced spatial and temporal variations in water retention between 1995 and 2024. High WRI values in 1995–2000 are concentrated along the western floodplain, with scattered moderate values inland, indicating relatively favorable moisture conditions. By 2010, these high-retention zones become narrower and fragmented, while inland moisture decreases. In 2024, high WRI values are limited to a small southwestern strip, and most of the district exhibits low WRI, reflecting widespread drying. Overall, the results indicate long-term deterioration of water retention, consistent with NDWI and MNDWI analyses, highlighting increasing water stress and the need for continuous monitoring and sustainable water management.

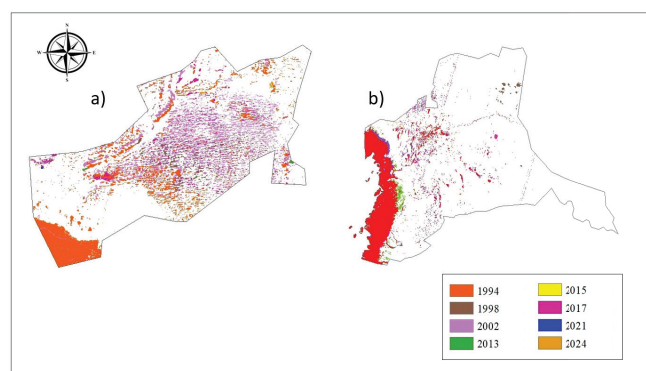


Figure 9. Spatial distribution and temporal evolution of water basin changes in (a) Makat and (b) Zhylyoi districts during 1994–2024.

Сурет 9. 1994–2024 жылдар аралығында Мақат (а) және Жылыой (б) аудандарындағы су қоймаларының кеңістіктік таралуы және уақытша эволюциясы.

Рис. 9. Пространственно-временная динамика изменений водных бассейнов в (а) Мақатском и (б) Жылыойском районах за период 1994–2024 гг.

The maps illustrating water basin dynamics in Zhylyoi and Makat Districts from 1994 to 2024 reveal pronounced spatial and temporal variability in surface water systems, reflecting long-term hydrological transformation across both areas. Different colors represent water basin changes detected in specific years, highlighting zones of water appearance, disappearance, and persistence over the three-decade period. In both districts, the most intensive changes occurred during the early period (1994, 1998, and 2002), with dense clusters concentrated mainly along western floodplain zones and extending toward central areas. These patterns indicate highly dynamic hydrological conditions in the late 1990s and early 2000s, characterized by frequent expansion and contraction of surface water bodies. Additional scattered inland patches suggest fluctuating shallow waters and seasonal wetlands. In Makat District, strong early changes are particularly evident in central and southern regions, while Zhylyoi District shows pronounced activity along its western margin.

During the mid-period (2013 and 2015), the number of detected changes decreases substantially in both districts, indicating reduced surface water activity and increasing drying conditions. Although localized changes reappear in 2017, they remain spatially fragmented and limited in extent. The most recent years (2021 and especially 2024) exhibit very sparse change signals, reflecting minimal water basin dynamics and a pronounced contraction of surface water features across both districts.

Overall, the results demonstrate a clear long-term decline in both the extent and variability of surface water systems. The highest level of hydrological dynamics occurred in the 1990s-early 2000s, followed by progressive reduction after 2010 and severe depletion in recent years. These trends are consistent with NDWI, MNDWI, and WRI analyses, confirming increasing water stress and degradation of surface water resources. The observed patterns likely result from the combined effects of climate variability, altered river inflows, and anthropogenic pressures. Together, they indicate growing hydrological instability and highlight the urgent need for continuous remote sensing-based monitoring and sustainable water resource management to support environmental remediation and land restoration efforts in both districts.

Conclusions

This study employed NDWI, MNDWI, and WRI indices derived from multi-temporal Landsat imagery to evaluate long-term changes in surface water dynamics in the Makat and Zhylyoi districts during 1994–2024. The analysis revealed substantial spatial and temporal variability in water distribu-

tion, with the greatest extent of surface water observed during the late 1990s and early 2000s and a pronounced decline after 2010. The years 2021 and 2024 were characterized by the lowest levels of detectable surface water and the most limited basin dynamics.

Quantitative analysis revealed a substantial decline in surface water resources during the study period. In Makat district, the maximum surface water extent was recorded in 2002, reaching 519.46 km², whereas the minimum value was observed in 2021, when water coverage decreased to only 1.03 km². Similarly, in Zhylyoi district, the largest water extent was detected in 1994 (749.91 km²), while the minimum value occurred in 2021 (14.00 km²). These results indicate a dramatic long-term contraction of surface water resources and confirm the increasing vulnerability of the study area to climatic and anthropogenic pressures. The dynamics of water resources were consistently identified and visually verified through the combined application of NDWI, MNDWI, and WRI indices together with multi-temporal satellite imagery.

From a practical perspective, the generated water dynamics maps can support regional water resource management, environmental monitoring, drought assessment, land degradation control, and ecosystem conservation programs in the Atyrau region. The proposed methodology demonstrates the potential of aerial photogrammetry, geodesy, and remote sensing (RS) technologies for operational monitoring of surface water resources and environmental changes. The approach can be applied to other arid and semi-arid regions of Kazakhstan for sustainable water resource assessment and decision-making. Future research should focus on quantitative estimation of water surface area changes, integration of higher-resolution satellite imagery and UAV data, and assessment of the relationship between hydrological changes, land-use dynamics, and climate variability.

Overall, the findings indicate increasing water stress in both districts and underscore the urgent need for continuous satellite-based monitoring, improved water resource management, and adaptive strategies to mitigate the impacts of ongoing environmental change. The methodological framework applied in this study provides a valuable basis for regional-scale water assessment and can support evidence-based planning for sustainable development in arid and semi-arid regions.

Acknowledgments/Appreciation

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the framework of the program (Grant No. BR24993218).

REFERENCES

1. *Comparative analysis of the state of desertification of the lands of West and East Kazakhstan / M. Amirkhanov et al. // Engineering Journal of Satbayev University. – 2025. – Vol. 147 (2). – P. 40–49 (in English)*
2. *Gibbs H., Salmon J. M. Mapping the World's Degraded Lands // Applied Geography. – 2015. – Vol. 57. – P. 12–21 (in English)*
3. *Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone / N. Gorelick et al. // Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 202. – P. 18–27 (in English)*
4. *Gaur M. K., Squires V. R. Geographic Extent and Characteristics of the World's Arid Zones and Their Peoples // Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands / ed. by M. K. Gaur, V. R. Squires. – Cham: Springer, 2018. – Vol. 1. – P. 3–20 (in English)*

5. *Soil Erosion Prediction in Western Kazakhstan Through Deep Learning with a Neural Network Approach to LS-Factor Analysis* / M. Seitkazy et al. // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. – 2025. – Vol. 53. – P. 1215–1226 (in English)
6. *Analysis of Agricultural Land Condition in Western Kazakhstan from 1991 to 2023: The Impact of Climate Change* / A. Tokbergenova et al. // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2025. – Vol. 197. – Article 186 (in English)
7. *Ecological Vulnerability of Lands of Western Kazakhstan: Analysis Based on MEDALUS Model and Remote Sensing* / R. Salmurzauly et al. // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17. – Article 9990 (in English)
8. *Assessing groundwater and soil quality in West Kazakhstan amid climate impacts and oil industry contamination risks* / D. Adenova et al. // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – Article 6663 (in English)
9. *Landsat Analysis Ready Data for Global Land Cover and Land Cover Change Mapping* / P. Potapov et al. // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12. – Article 426 (in English)
10. *Mapping Urban Land Use by Using Landsat Images and Open Social Data* / T. Hu et al. // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8. – Article 151 (in English)
11. *Saline soils and identification of salt accumulation provinces in Kazakhstan* / G. T. Issanova et al. // *Arid Ecosystems*. – 2017. – Vol. 7. – P. 243–250 (in English)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Батыс және Шығыс Қазақстан жерлерінің шөлейттену жағдайына салыстырмалы талдау / М. Amirkhanov [және т. б.] // *Engineering Journal of Satbayev University*. – 2025. – Т. 147 (2). – Б. 40–49 (ағылшын тілінде)
2. Gibbs H., Salmon J. M. Әлемнің топырақ деградациясына ұшыраған жерлерінің картасын жасау // *Applied Geography*. – 2015. – Т. 57. – Б. 12–21 (ағылшын тілінде)
3. Google Earth Engine: барлығына арналған планетарлық масштабтағы геокеңістіктік талдау / N. Gorelick [және т. б.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – Т. 202. – Б. 18–27 (ағылшын тілінде)
4. Gaur M. K., Squires V. R. Дүние жүзіндегі құрғақ аймақтар мен олардың халықтарының географиялық ауқымы мен сипаттамалары // *Климаттың өзгермелілігінің құрғақ жерлердегі жерді пайдалану мен күнкөріске әсері* / ред. М. К. Gaur, V. R. Squires. – Cham: Springer, 2018. – Т. 1. – Б. 3–20 (ағылшын тілінде)
5. *LS-факторлық талдауға нейрондық желілік тәсілмен терең оқыту арқылы Батыс Қазақстандағы топырақ эрозиясын болжау* / М. Seitkazy [және т. б.] // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. – 2025. – Т. 53. – Б. 1215–1226 (ағылшын тілінде)
6. *1991–2023 жылдар аралығында Батыс Қазақстандағы ауылшаруашылық жерлерінің жай-күйін талдау: климаттың өзгеруінің әсері* / А. Tokbergenova [және т. б.] // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2025. – Т. 197. – 186 (ағылшын тілінде)
7. *Батыс Қазақстан жерінің экологиялық осалдығы: MEDALUS моделі және қашықтықтан зондау негізінде талдау* / R. Salmurzauly [және т. б.] // *Sustainability*. – 2025. – Т. 17. – 9990 (ағылшын тілінде)
8. *Батыс Қазақстандағы жер асты сулары мен топырақтың сапасын климаттың әсері мен мұнай өнеркәсібінің ласлану қаупі жағдайында бағалау* / D. Adenova [және т. б.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Т. 15. – 6663 (ағылшын тілінде)
9. *Landsat талдауы жаһандық жер жамылғысы мен жер жамылғысының өзгеруін картаға түсіру үшін дайын деректерді ұсынады* / P. Potapov [және т. б.] // *Remote Sensing*. – 2020. – Т. 12. – 426 (ағылшын тілінде)
10. *Landsat кескіндерін және ашық әлеуметтік деректерді пайдалану арқылы қалалық жерді пайдалануды картаға түсіру* / T. Hu [және т. б.] // *Remote Sensing*. – 2016. – Т. 8. – Б. 151 (ағылшын тілінде)
11. *Тұзды топырақтар және Қазақстандағы тұз жиналатын аймақтарды анықтау* / G. T. Issanova [және т. б.] // *Arid Ecosystems*. – 2017. – Т. 7. – Б. 243–250 (ағылшын тілінде)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Сравнительный анализ состояния опустынивания земель Западного и Восточного Казахстана* / М. Amirkhanov [и др.] // *Engineering Journal of Satbayev University*. – 2025. – Т. 147 (2). – С. 40–49 (на английском языке)
2. Gibbs H., Salmon J. M. *Составление карты деградированных земель мира* // *Applied Geography*. – 2015. – Т. 57. – С. 12–21 (на английском языке)
3. *Google Earth Engine: Геопространственный анализ планетарного масштаба для всех. Дистанционное зондирование* / N. Gorelick [и др.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – Т. 202. – С. 18–27 (на английском языке)
4. Gaur M. K., Squires V. R. *Географическая протяженность и характеристики засушливых зон мира и населяющих их людей* // *Влияние изменчивости климата на землепользование и источники средств к существованию в засушливых районах* / под ред. М. К. Gaur, V. R. Squires. – Cham: Springer, 2018. – Т. 1. – С. 3–20 (на английском языке)
5. *Прогнозирование эрозии почв в Западном Казахстане с помощью глубокого обучения с использованием нейросетевого подхода к LS-факторному анализу* / М. Seitkazy [и др.] // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. – 2025. – Т. 53. – С. 1215–1226 (на английском языке)
6. *Анализ состояния сельскохозяйственных угодий в Западном Казахстане с 1991 по 2023 год: влияние изменения климата* / А. Tokbergenova [и др.] // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2025. – Т. 197. – Ст. 186 (на английском языке)
7. *Экологическая уязвимость земель Западного Казахстана: анализ на основе модели MEDALUS и дистанционного зондирования* / R. Salmurzauly [и др.] // *Sustainability*. – 2025. – Т. 17. – Ст. 9990 (на английском языке)
8. *Оценка качества подземных вод и почв в Западном Казахстане в условиях воздействия климата и рисков загрязнения нефтедобывающей промышленностью* / D. Adenova [и др.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Т. 15. – Ст. 6663 (на английском языке)
9. *Анализ данных Landsat позволяет получить готовые данные для глобального картографирования растительного покрова и его изменений* / P. Potapov [и др.] // *Remote Sensing*. – 2020. – Т. 12. – Ст. 426 (на английском языке)
10. *Составление карты городского землепользования с использованием изображений Landsat и открытых социальных данных* / T. Hu [и др.] // *Remote Sensing*. – 2016. – Т. 8. – Ст. 151 (на английском языке)
11. *Засоленные почвы и выявление провинций соленакпления в Казахстане* / G. T. Issanova [и др.] // *Arid Ecosystems*. – 2017. – Т. 7. – С. 243–250 (на английском языке)

Information about the authors:

Amirkhanov M., Ph.D student at the Department of Mine Surveying and Geodesy of the Mining and Metallurgical Institute named after O. A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), mirasamirkhanov@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-3378-2778>

Zhakyrbek Y., Ph.D, Professor at the Department of Mine Surveying and Geodesy of the Mining and Metallurgical Institute named after O. A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), y.zhakyrbek@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-2474-9927>

Mukhambetzhanova N., master's student of the Department of Geodesy and Cartography, Faculty of Architecture and Civil Engineering, L. N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan), nurai19112003@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-9793-6600>

Sun Hao, Ph.D, Professor at China University of Mining and Technology (Beijing, China), sunhao@cumt.edu.cn; <https://orcid.org/0000-0002-6315-4838>

Авторлар туралы мәліметтер:

Амирханов М. Е., О. А. Байқоңыров атындағы Тау-кен және металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының докторанты, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Жақыпбек Ы., Ph.D, О. А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Мұхамбетжанова Н. Е., «Сәулет-құрылыс» факультеті, «Геодезия және картография» кафедрасының магистранты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана қ., Қазақстан)

Сун Хао, Ph.D, Қытай Тау-кен және технология университеті профессоры, China University of Mining and Technology (Бейжің қ., Қытай)

Сведения об авторах:

Амирханов М. Е., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Жақыпбек Ы., Ph.D, профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Мухамбетжанова Н. Е., магистрант кафедры «Геодезия и картография», факультета «Архитектура и гражданское строительство», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева (г. Астана, Казахстан)

Сун Хао, Ph.D, профессор Китайского университета горного дела и технологий, China University of Mining and Technology (г. Пекин, Китай)



ГОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РОССИЯ

www.techmining.ru

8-Я СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА СТРОИТЕЛЬСТВО, МОДЕРНИЗАЦИЯ И ЦИФРОВИЗАЦИЯ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

15

сентября
2026

Москва

Swissôtel Красные Холмы Москва



Код МРНТИ 89.57.35

*Ж. М. Нукарбекова¹, Ш. К. Айтказинова¹, А. А. Бек¹, Н. А. Милетенко²

¹ Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан),

²Федералдық мемлекеттік бюджеттік ғылыми мекеме «Ресей Ғылым академиясының академигі Н. В. Мельников атындағы Жер қойнауын кешенді игеру мәселелері институты» (РФА ИПКОН) (Мәскеу қ., Ресей)

ЗАМАНАУИ ГЕОТЕХНИКА ӘДІСТЕРІ – ЖЕР ҚОЙНАУЫН ИГЕРУ ҚАУІПСІЗДІГІН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУДІҢ ТИІМДІ БАҒЫТЫ

Аннотация. Мақалада ҚазҰТЗУ қызметкерлерінің геомеханикалық процестерді зерттеу бойынша көпжылдық ғылыми зерттеулерінің нәтижелері келтірілген. Геомеханикалық процестерді тиімді басқару тау жыныстары массивінің жай-күйін геомониторингтеудің кешенді жүйесі негізінде жүзеге асырылатыны көрсетілген. Бұл жүйе табиғи және техногендік факторларды есепке алуды, сондай-ақ авторлар әзірлеген бақылау құралдарын қолдануды қамтиды. Геомониторинг жүргізу кезінде жоғары дәлдіктегі геодезиялық аспаптарды орнатуға арналған жер үсті және жерасты тұрақты мәжбүрлі центрлеу пункттері ұсынылған. Өнер-кәсіптік қауіпсіздікті арттыру мақсатында карьерлер мен жерасты қазбаларында жарықшақты тау жыныстарын бекітуге арналған арнайы құрам әзірленген. Аталған құрам тау-кен өндірісі қалдықтарын кәдеге жаратуға мүмкіндік береді, жоғары ақшашылық және жеткілікті беріктікке ие.

Түйінді сөздер: рудалы кен орындары, жарықшақтылық, деформация, геомеханикалық мониторинг, инновациялық әдістер, массивтің жай-күйін бағалау, беріктігіш ертінімі.

Modern geotechnical methods – an effective approach to ensuring the safety of subsurface development

Abstract. The article presents the results of many years of research by KazNITU staff devoted to the study of geomechanical processes in rock formations. It is shown that effective management of these processes is possible on the basis of an integrated geomonitoring system that takes into account a combination of natural and man-made factors and the use of controls developed by the authors. For the installation of high-precision geodetic instruments, ground and underground permanent forced centering points have been developed to ensure the accuracy and efficiency of measurements without the use of tripods. In order to improve industrial safety, a composition has been proposed for strengthening fractured rocks, pillars and ceilings in mining workings, which makes it possible to dispose of mining waste. The hardening solution is characterized by high fluidity, adhesion and strength.

Key words: ore deposits, fracturing, deformation, geomechanical monitoring, innovative methods, rock mass condition assessment, reinforcing grout.

Современные методы геотехники – эффективное направление обеспечения безопасности освоения недр

Аннотация. В статье представлены результаты многолетних исследований сотрудников КазННТУ, посвященных изучению геомеханических процессов в массивах горных пород. Показано, что эффективное управление этими процессами осуществляется на основе комплексной системы геомониторинга, учитывающей совокупность природных и техногенных факторов, а также использование разработанных авторами средств контроля. Для установки высокоточных геодезических приборов разработаны наземные и подземные постоянные пункты принудительного центрирования, обеспечивающие высокую точность и оперативность измерений без применения штативов. С целью повышения промышленной безопасности предложен состав для упрочнения трещиноватых пород, целиков и потолочин в горных выработках, позволяющий утилизировать отходы горного производства. Упрочняющий раствор отличается высокой текучестью, адгезией и прочностью.

Ключевые слова: рудные месторождения, трещиноватость, деформации, геомеханический мониторинг, инновационные методы, оценка состояния массива, укрепляющий раствор.

Кіріспе

Ауқымды тау-кен жұмыстарын жоғары кернеулі жартасты тау жыныстары массивтерінде жүргізу – тек техникалық-экономикалық апаттарға (техногендік жер сілкіністер, кен сокқысы, опырыла құлаулар, жылжулар және т. б.) ғана емес, кей уақытта адам өмірін жоюға әкеліп соғатын қауіпті техногендік апаттарға әкеліп соғады. Мұның барлығы геологиялық ортаның геодинамикалық режимінің ауқымды тау-кен жұмыстарының әсерінен өзгеруінің тікелей салдары болып табылады, бұл Қазақстан Республикасының әртүрлі өңірлерінде орналасқан Жезқазған, Ақбақай, Майқайың және Жыланды кен орындары тобының мысалында жүргізілген ғылыми зерттеулердің нәтижелерімен айқын дәлелденеді.

Техногендік апаттар мәселесіне қазіргі уақытта барлық жерде үлкен көңіл бөлінуде, бұған осы тақырып бойынша жарияланымдар санының айтарлықтай артуы дәлел бола алады [1, 2]. Соңғы уақытта техногендік процестерді мониторингтеу кезінде Жерді ғарыштық зондтау арқылы спутниктік радарлық интерферометрия деректері кеңінен қолданылуда. Бұл әдістің негізгі артықшылығы – елеулі аудандарды қамту мүмкіндігімен ерекшеленеді. Нұсқаулыққа сәйкес жердегі бақылаулар жылына екі рет, 6 ай аралықпен жүргізіледі. Осы уақыт ішінде тау жыныстары мен жер беті жылжуы, опырыла құлау орын алуы мүмкін, оны алдын ала болжау мүмкін емес. Көптеген зерттеулерге қарамастан, кен орында-

рының тау-геологиялық ерекшеліктерінің күрделілігі мен әртүрлілігіне байланысты техногендік апаттардың алдын алу және тәуекелді басқару мәселесі әлі толық шешілмеген.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу нысаны – бүгінде ірге тасы қаланып жатқан «Балхаш» АЭС-на көршілес орналасқан және құрамында жетінші қабатын игеріп жатқан 1 кеніші, бірнеше карьері, тау-тау болып үйіліп жатқан үйінділері, байыту фабрикасы, құрамында алтыны бар концентраттарды өңдейтін зауыты, өзіндік инфрокұрылымы бар және қоршаған орта мен жер қойнауына антропогендік әсерін тигізіп, жан-жақты зерттеуді қажет ететін бірден бір алқапқа айналып отырған Ақбақай техногендік жүйесі.

Зерттеудің мақсаты – тау жыныстары массивінің жағдайын геомониторинг арқылы қадағалау, онда барлық табиғи және техногендік факторларды кешенді есепке алу мен талдау қарастырылып, сонымен қатар авторлар әзірлеген бақылау әдістері мен құралдарын пайдалану.

Зерттеудің әдістемесі. Жұмыста кешенді тәсіл қолданылған, оған мыналар кіреді: тау-геологиялық жағдайларды зерттеу, кен орындарындағы тау жыныстарының құрылымдық ерекшеліктерін анықтау және авторлар әзірлеген инновациялық геомониторинг әдістері мен құралдары негізінде рудниктерде маркшейдерлік бақылаулар жүргізу.

Нәтижелер және талқылау

Кен-геологиялық жағдайы. Ақбақай алтынкенді алқап Қазақстан Республикасының Жамбыл облысы, Мойынқұм ауданында орналасқан. Ақбақай кенді алқаптың координаталары: $47^{\circ}07'25''$ солтүстік ендік, $72^{\circ}40'36''$ шығыс бойлық. Ақбақай алқабы Қазақстанның алғашқы АЭС-ның батыс жағында орналасқан және 20-дан астам кен орнын қамтиды. Олардың қатарына Ақбақай, Кенжем, Светинское, Ақсақал, Бескембір, Самородное, Карьерное және басқа да кен орындары жатады (1-сурет). Бұл кен орындарының рудасы Ақбақай алтын өндіретін фабрикада өңделеді, онда өте сапалы Доре алтын қоспасы шығарылады [3].

Әрі қарай осы алқапта орналасқан, игеріліп жатқан кен орындарына тоқталамыз.

Ақбақай кен орны Ащысай свитасы мен Шубалхаш интеруивтерінің түзілімдерінен тұратын жоғары кернреулі бірыңғай қатпарлы жүйеге кіретін, қалыңдықтары 0,2–4,0 м және ұзындықтары 100–680 метр аралығындағы: Главная, Фроловская, Юбилейная, Пологая, Глубинная деп аталатын бірнеше рудалық денелерден тұрады желілерден тұрады.



Сурет 1. Ақбақай алтын кенді алқап.

Figure 1. Akbakai gold-bearing area.

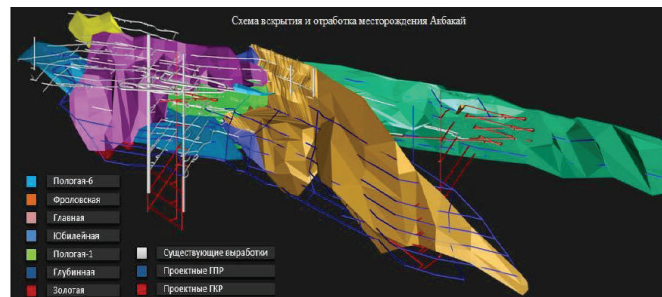
Рис. 1. Акбакайская золоторудная зона.

Ақбақай кен орнын игерудің бір ерекшелігі кендердің жер бетіне шығып жатқандықтан, оны 60–80 м тереңдікке дейін ашық әдіспен, ал қазір кен орны жерасты әдісімен игерілуде. Кеніш кен орнының орталығында «Главная» шахтасы орналасқан. Бұл оқпан адамдарды түсіру және көтеру үшін, сондай-ақ тау жыныстарын жер бетіне шығару үшін арналған. Кен орнында кен өндіруде екі түрлі 2-суретте көрсетілген қазу жүйесі пайдаланылады: күрт құламалы кварц желілері үшін кенді қоймалау арқылы игеру жүйесі; көлбеу денелер үшін руда жарылыс күшімен жеткізілетін қабатаралық-камералық қазу жүйесі.

Бескембір кен орнын Ақбақай кенішінің шығысына қарай 3 шақырым жерде орналасқан және вертикаль оқпан арқылы шахта о, 180 м тереңдікке дейін вертикаль оқпан арқылы 180 м горизонттына дейін ашылған. Тау-кен жұмыстары 180 м және 260 м горизонттарында жүргізілуде. Жобаға сәйкес 390 м қабатқа дейін игеріледі.

Карьерное кен орны Ақбақай рудалы алқабының шегінде, Желтау массивіне жататын гранодиориттер арасында, құмтастарымен жанасу аймағына жақын орналасқан және ашық әдіспен игерілуде. Кен орны құлау бағыты бойынша 200 м тереңдікке дейін барланған. Рудалар желілеріндегі

алтынның 80%-ы табиғи, қалған бөлігі сульфидтермен байланысқан.



Сурет 2. Ақбақай кен орнын ашу және қазу жүйесінің сұлбасы.

Figure 2. Schematic of the opening and mining system of the Akbakai deposit.

Рис. 2. Схема вскрытия и системы разработки месторождения Акбакай.

Светинск кен орны үш штокверкті рудалы аймақты (Солтүстік, Орталық, Оңтүстік) қамтиды. Тек Солтүстік аймақтың өзінде әрқайсысының ұзындығы 480 м болатын, 300–630 м тереңдікке дейінгі 4 рудалы денелер айқындалған.

Ақсақал кен орны Ақбақай рудалы алқабының шегінде орналасқан, қор көлемі бойынша орташа. Кен орны қолданыстағы «Басты» шахта оқпаны арқылы 120 м горизонттына дейін ашылған. Жоба бойынша «Басты» шахта оқпанын тереңдетіп, қорларды 500 м терең қабатқа дейін игеру көзделген.

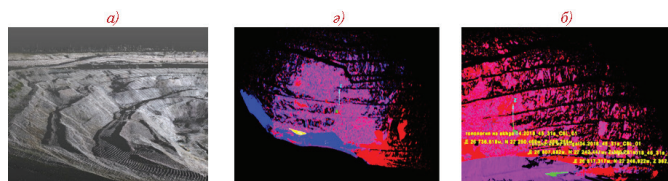
Кенжем кен орны Ақбақайдың оңтүстігі жағында: қалыңдығы 2–3 м ден 10 м аралығында, ұзындығы 1500 м және 200 м тереңдікте орналасқан. Кенжем кен орнында 300 м тереңдікке дейін ұңғымалар бұрғыланып, тау-кен жұмыстары жүргізіліп жатыр.

Аталған алқап үшін геодинамикалық процестерді зерттеуге бағытталған кешенді зерттеулер жүргізу өте маңызды. Өйткені кен қазу жұмыстарының әсерінен туындайтын геомеханикалық процестер, карьерлерде де, жерасты қазбаларында пайда болады. Жерасты қазбаларының төбесіндегі (әсіресе тазалау қазбалары төңірегінде) тау жыныстарының тұтастығы бұзылып, біртіндеп массивтен ажырап, опырыла бастайды.

Мұндай жылжу процессін зерттеу, тау-кен жұмыстары қарқынды жүргізілетін аймақтарда жер қыртысының жылжу процесінің сипаты мен параметрлерін дәлірек бағалауға, сондай-ақ өңірдің өнеркәсіптік және экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ету бойынша негізделген шаралар қабылдауға мүмкіндік береді. Осындай құрама тәлімен игеріліп жатқан Ақбақай кенорнында Satbayev University «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы 2003 жылдан бастап тау жыныстары мен жер бетінің жылжуы мәселесі бойынша ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізіп келеді

Тау жыныстары массивтің құрылымдық ерекшеліктері аршылған карьер беткейлерінде зерттелінді. Кендерді игеру кезінде тау жыныстарының жыжуы, карьер беткейдері-

нің орнықтылығы таужыныстары массивінің тектоникасы және құрылымдық ерекшеліктеріне тікелей байланысты. Тау жыныстарының жарықшақтылығын түсірімдеудің тиімділігін арттыру мақсатында Leica ScanStation 3D сканері қолданылды, ол жарықшақтардың жатыс элементтерін жеткілікті түрде жан-жақты зерттеуге мүмкіндік берді. Лазерлік сканерлеу нәтижелерін 3-суретте көрсетілгендей өңдеу барысында «Maptek I-Site Studio» бағдарламалық кешені пайдаланылды, онда жарықшақтардың жатыс элементтерінің мәндері (созылу азимуты, құлау бұрыштары және блоктардың өлшемдері) анықталды [4].



Сурет 3. Тау жыныстарының жарықшақтылығын түсірімдеу және түсіріс нәтижелері:

(a) – тұрақты реперге орнатылған лазерлік сканермен түсіру, (б) – беткейдің цифрлық моделі, (в) – компьютер экранындағы жарықшақтардың жатыс элементтері.

Figure 3. Surveying of rock mass fracturing and the survey results: (a) – scanning with a laser scanner installed on a fixed reference point, (b) – a digital model of the slope, (c) – fracture orientation elements displayed on a computer screen.

Рис. 3. Съёмка трещиноватости горных пород и результаты съёмки:

(a) – съёмка лазерным сканером, установленным на постоянном грунтовым репере, (б) – цифровая модель борта, (в) – элементы залегания трещин на экране компьютера.

Тау жыныстары массивінің физика-механикалық қасиеттері (ФМК) зерттеліп, олардың нәтижелері жыныс массивінің беріктік қасиеттерінің жату тереңдігіне байланысты графо-аналитикалық тәуелділіктерін анықтауға және тау қазбаларының орнықтылығын қабаттар бойынша есептеулерге жедел түрде өзгерістер енгізуге мүмкіндік берді [5]. Тау жыныстары массивінің ең маңызды геомеханикалық сипаттамасы оның кернеулі-деформациялық күйі (КДК) болып табылады. Қазіргі уақытта жыныс массивінің КДК-сын бақылаудың әртүрлі әдістерін талдай отыра Ақбақай кенішіндегі тау жыныстары массивінің кернеулі күйін зерттеу үшін, авторлар «Тау жыныстары массивінің КДК-сын болжаудың сейсмоакустикалық әдісін» әзірледі [6].

Геомониторинг жүргізу. Үлкен аумақты алып жатқан, бірнеше кен шоғырларынан тұратын және әртүрлі терең горизонттарда орналасқан кен орындарын игеру кезінде тау жыныстары массивінің күйін мониторингтеу геодинамикалық полигонды (ГДП) құруды талап етеді. Объект бойынша ГДП құрудың жаңа тәсілі қарастырылып, жоба әзірленді. Әрбір кен орны үшін тірек пункттер мен деформациялық нивелирлік реперлерден тұратын «арнайы» ба-

қылау станциялары құрылды [7]. Барлық тірек пункттер Мемлекеттік геодезиялық торап пункттеріне байланыстырылды.

Ақбақай кен орындарын игерудің күрделі тау-геологиялық және геомеханикалық жағдайлары өндірістік құрылымдар мен қоршаған ортаны кен игерудің зиянды әсерінен қорғау мәселелерін шешу қажеттілігі туындайды [8, 9].

Жербетілік және ғарыштық геодезиялық түсіріс әдістерін кешенді қолдану Ақбақай рудалық аймағындағы барлық кен орындарын мониторингтік бақылаулармен қамтуға, бақылаулардың жеделдігін арттыруға және оларды жүргізуге кететін күрделі шығындарды азайтуға мүмкіндік берді. Ақбақай кен алқабында тірек пункттері торабын дамыту – геодезиялық негіз ретінде қызмет етеді. Геодинамикалық процестерді аймақтық ауқымда бағалауға арналған, базалық (референцтік) пункттер кен орнының шекарасынан және техногендік геомеханикалық процестердің әсер ету аймағынан тыс, тектоникалық жарылым аймақтарынан қашықта орналастырылды. Кен шоғырлары контурының конфигурациясына қарай базалық пункттердің саны есептеледі (кемінде екеу). Олардың координаттары халықаралық тірек геодезиялық желіге кіретін GNSS-станцияларына қатысты анықталады (4-сурет).



Сурет 4. «Ақбақай» (a) және «Карьерное» (б) кен орындары бақылау станциясының пландары.

Figure 4. Plans of the monitoring stations at the Akbakai (a) and Kariyerno (b) deposits.

Рис. 4. План наблюдательных станций месторождения Ақбақай (a) и Карьерное (б).

Мониторинг жүргізу үшін кен орындарын игеру және құрылыстарды астынан қазу кезінде жер бетінің деформацияланған күйін бақылауда жұмыс нивелирлік реперлер мен тірек пункттердің әртүрлі түрлері қолданылады. Көпжылдық аспаптық бақылаулар далалық жұмыстарды жүргізудің қиындығы, әсіресе аспаптарды (аспаптың өзі, штатив, рейкалар және т. б.) бір пункттен екіншісіне тасымалдаудың күрделілігін көрсетті. Осыған байланысты аспаптарды орнату, өлшеу операцияларының жеделдігі мен дәлдігін арттыру мақсатында геомеханикалық мониторинг жүргізу кезінде, аспаптарды орнататын тұрақты жербеті және жерасты мәжбүрлі центрлеу пункттері 5-суретте көрсетілгендей әзірленді. Бұл құрылғы жаңа аспаптар мен сигналдарды орнатуға арналған геодезиялық центрлерге жатады. Жаңа құрылғы штативтер болмаған жағдайда тұру және бақылау пункттерінде центрлеу дәлдігін, сондай-ақ өлшеулердің жеделдігін арттыруға мүмкіндік береді [10, 11].



Сурет 5. Жербеті (а, ә) және жерасты (б) тұрақты пункттерінің конструкциялары.

Figure 5. Structures of surface (a, b) and underground (c) permanent control points.

Рис. 5. Конструкции наземных (а, б) и подземных (в) постоянных пунктов.

Карьерлер беткейлерінің абсолют деформацияларын бақылау, жобаға сәйкес салынған бақылау станциясының қысқа профильдерде жүргізілді, бақылау нәтижелері өңделіп, жылу графиктері алынды.

Осылайша, Ақбақай рудалық алқапта геодинамикалық полигонының құралдарын қолдана отырып жүргізілген геомеханикалық зерттеулер өз тиімділігін көрсетті. Кен орындарында жүргізілген кешенді геодинамикалық мониторинг нәтижелері бойынша ықтимал қауіпті учаскелер алдын ала анықталды. Осы учаскелер шегінде тау жыныстары массивінің жай-күйін кешенді бақылау әдістерімен қосымша бағалау жүргізілгеннен кейін массивті нығайту бойынша қажетті іс-шаралар жүзеге асырылады.

Барлық геомеханикалық зерттеулердің түпкі мақсаты өнеркәсіптік қауіпсіздікті қамтамасыз ету болғандықтан, «Карьерное» кен орны беткейлерін еңістерін нығайтудың әдісін әзірледік, оның техникалық жаңалығы Қазақстан Республикасы патентімен расталған [12].

Қорытынды

Жер қойнауын игерудің өнеркәсіптік және экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ету мақсатында Ақбақай рудалық алқап кен орындарының жай-күйіне кешенді мониторинг жүргізіліп, өндіріске төмендегілер енгізілді:

- Ақбақай рудалық алқап кен орындары бойынша геокеңістіктік деректер базасы құрылды, кеніштің төменгі қабаттарындағы тау жыныстары массивінің физика-механикалық қасиеттері (ФМС) мен кернеулі-деформацияланған күйі (КДК) зерттелді, бұл жер қойнауын игеру үдерісінде олардың өзгерістерін ескере отырып, кен-геологиялық объектілердің үшөлшемді модельдерін жасауға мүмкіндік берді;

- алқаптың әр кенорындары үшін «арнайы» геодинамикалық полигон әзірленді;

- бақылаулардың өнімділігі мен дәлдігін арттыруға мүмкіндік беретін мәжбүрлеп центрлеудің тұрақты жербеті және жерасты пункттерінің конструкциялары жасалды;

- карьер беткейлерінің жарықшақталып бұзылған учаскелерінің орнықтылығын арттыру мақсатында тау-кен өндірісі қалдықтарынан тұратын беріктегіш ерітінді құрамы әзірленді.

Әзірленген әдістер мен құралдардың жаңалығы Derwent халықаралық патенттер базасына енгізілген Қазақстан Республикасы өнертабыс патенттерімен расталған.

Алғыс

Зерттеулер Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің гранттық қаржыландыруы шеңберінде жүргізілді (AP26100471), жоба жетекшісі, т. г. д., профессор М. Б. Нурпейсова.

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Трубецкой К. Н. Жер қойнауы ресурстарын кешенді игеру мен сақтаудың қазіргі жай-күйі және негізгі бағыттары // Жер қойнауы ресурстарын кешенді игеру мен сақтаудың мәселелері мен перспективалары: конференция материалдары. – Мәскеу: ИПКОН РАН, 2020. – Б. 5–11 (орыс тілінде)
2. Кен орындарының баланстық қорлары сарқылған жағдайда жер қойнауын кешенді игерудің жаңа технологиялық укладының қалыптасуы / Д. Р. Каплунов [және т. б.] // Тау-кен журналы. – 2019. – № 4. – Б. 11–15 (орыс тілінде)
3. Ваулин О. В. Жамбыл облысы. Алтын: анықтамалық. – Тараз – Бішкек: «РОКИЗОЛ», 2016. – Б. 94 (орыс тілінде)
4. Нурпейсова М. Б., Қырғызбаева Г. М., Нукарбекова Ж. М. Тау жыныстарының жарықшақтылығын диагностикалаудың инновациялық әдістері: авторлық құқықпен қорғалатын объектілердің мемлекеттік тізіліміне енгізілгені туралы куәлік № 62699, 06.12.2025 ж. (орыс тілінде)
5. Қырғызбаева Г. М., Нурпейсова М. Б. Массивтің ФМС және НДС болжау тәсілі: авторлық құқықпен қорғалатын объектілердің мемлекеттік тізіліміне енгізілгені туралы куәлік № 19300, 12.07.2021 ж. (орыс тілінде)
6. Нурпейсова М. Б., Битімбаев М. Ж., Рысбеков К. Б., Қырғызбаева Г. М. Массивтің НДС-ін болжаудың сейсμοакустикалық тәсілі: патент RZ35898-B. – Құқық иесі: UNIV KAZA NAT RES TECH. – Derwent тіркеу нөмірі: 2024-B08861 (орыс тілінде)
7. Қырғызбаева Г. М., Нурпейсова М. Б. ГДП жасаудың жаңа тәсілі: авторлық құқықпен қорғалатын объектілердің мемлекеттік тізіліміне енгізілгені туралы куәлік № 19300, 12.07.2021 ж. (орыс тілінде)
8. Нурпейсова М. Б., Айтқазынова Ш. К., Қырғызбаева Г. М. Кен орындарын біріктіріп игеру жағдайында тау жыныстары массивінің геомеханикалық мониторингі // Геодезия және маркшейдерлік іс: 14-ші Халықаралық көпсалалы ғылыми геоконференция SGEM материалдары. – Альбена, Болгария, 2014. – Б. 279–292 (ағылшын тілінде)
9. Жер қойнауын ірі ауқымда игеру кезінде тау жыныстары массивінің жай-күйін интеграцияланған мониторингтеу / О. Bazarlik [және т. б.] // Қоршаған ортаны қорғау ғылымындағы шекаралар. – 2022. – Т. 10. – Б. 1–12 (ағылшын тілінде)

10. Нурпейісова М. Б., Рысбеков К. Б., Айтқазінова Ш. К., Доненбаева Н. С., Нукарбекова Ж. М., Дербісов К. Н. Аспаптарды мәжбүрлі центрлеуге арналған жерүсті тұрақты геодезиялық пункт: патент RZ35798. – Құқық иесі: UNIV KAZA NAT RES TECH. – Derwent тіркеу нөмірі: 2022-C4343S (орыс тілінде)
11. Айтқазінова Ш. К., Нурпейісова М. Б., Нукарбекова Ж. М., Дербісов К. Н. Аспаптарды мәжбүрлі центрлеуге арналған жерасты пункті: патент KZ35900-B. – Құқық иесі: UNIV KAZA NAT RES TECH. – Derwent тіркеу нөмірі: 2024-B08862 (орыс тілінде)
12. Бек А. А., Доненбаева Н. С., Нурпейісова М. Б., Айтқазінова Ш. К., Нукарбекова Ж. М., Дербісов К. Н. Карьер откосын бекіту тәсілі: патент KZ36246-B. – Құқық иесі: UNIV KAZA NAT RES TECH. – Derwent тіркеу нөмірі: 2024-C48648 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Trubetskoy K. N. Sostoyanie i osnovnye napravleniya kompleksnogo osvoeniya i sokhraneniya resursov zemnykh neдр [State and Main Directions of Integrated Development and Conservation of Subsurface Resources]. Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sokhraneniya zemnykh neдр [Problems and Prospects of Integrated Development and Conservation of Subsurface Resources]: conference proceedings. – Moscow: IPKON RAN, 2020. – P. 5–11 (in Russian)
2. Stanovlenie novogo tekhnologicheskogo uklada kompleksnogo osvoeniya neдр pri istoshchenii balansovykh zapasov mestorozhdeniy [Formation of a new technological paradigm for integrated subsoil development under depletion of balance reserves of deposits] D. R. Kaplunov et al. Gornyy zhurnal [Mining Journal]. – 2019. – No. 4. – P. 11–15 (in Russian)
3. Vaulin O. V. Zhambylskaya oblast'. Zoloto: spravochnik [Zhambyl Region. Gold: Reference Book]. – Taraz–Bishkek: ROKIZOL, 2016. – 94 p. (in Russian)
4. Nurpeisova M. B., Kyrgyzbaeva G. M., Nukarbekova Zh. M. Innovatsionnye sposoby diagnostiki treshchinovatosti gornyykh porod [Innovative Methods for Diagnosing Rock Fracturing]. – Svidetel'stvo o vnesenii svedeniy v gosudarstvennyy reestr prav na ob"ekty, okhranyaemye avtorskim pravom No. 62699 ot 06.12.2025 (in Russian)
5. Kyrgyzbaeva G. M., Nurpeisova M. B. Sposob prognozirovaniya FMS i NDS massiva [Method for Forecasting the Stress–Strain State of the Rock Mass]. – Svidetel'stvo o vnesenii svedeniy v gosudarstvennyy reestr prav na ob"ekty, okhranyaemye avtorskim pravom No. 19300 ot 12 iyulya 2021 (in Russian)
6. Nurpeisova M. B., Bitimbaev M. Zh., Rysbekov K. B., Kyrgyzbaeva G. M. Seismoakusticheskiy sposob prognozirovaniya NDS massiva [Seismoacoustic Method for Forecasting the Stress–Strain State of the Rock Mass]: patent RZ35898-B. – Pravoobladatel': UNIV KAZA NAT RES TECH. – Registratsionnyy nomer Derwent: 2024-B08861 (in Russian)
7. Kyrgyzbaeva G. M., Nurpeisova M. B. Novyy podkhod k sozdaniyu GDP [A New Approach to GDP Creation]. – Svidetel'stvo o vnesenii svedeniy v gosudarstvennyy reestr prav na ob"ekty, okhranyaemye avtorskim pravom No. 19300 ot 12 iyulya 2021 (in Russian)
8. Nurpeisova M. B., Aitkazinova Sh. K., Kyrgyzbaeva G. M. Ken oryndaryn biriktirip igeru zhagdaiynda tau zhinystry massivning geomekhanikalyq monitoringi [Geomechanical Monitoring of the Rock Mass under Combined Field Development]. In: Geodeziya zhane marksheiderlik is [Geodesy and Mine Surveying]: Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – Albena, Bulgaria, 2014. – P. 279–292 (in English)
9. Integrated monitoring of the rock mass state during large-scale subsoil development / O. Bazaluk et al. // Frontiers in Environmental Science. – 2022. – Vol. 10. – P. 1–12 (in English)
10. Nurpeisova M. B., Rysbekov K. B., Aitkazinova Sh. K., Donenbaeva N. S., Nukarbekova Zh. M., Derbisov K. N. Nazemnyy postoyanny geodezicheskiy punkt prinuditel'nogo tsentrirovaniya priborov [Permanent Ground Geodetic Point for Forced Instrument Centering]: patent RZ35798. – Pravoobladatel': UNIV KAZA NAT RES TECH. – Registratsionnyy nomer Derwent: 2022-C4343S (in Russian)
11. Aitkazinova Sh. K., Nurpeisova M. B., Nukarbekova Zh. M., Derbisov K. N. Podzemnyy punkt prinuditel'nogo tsentrirovaniya priborov [Underground Point for Forced Instrument Centering]: patent KZ35900-B. – Pravoobladatel': UNIV KAZA NAT RES TECH. – Registratsionnyy nomer Derwent: 2024-B08862 (in Russian)
12. Bek A. A., Donenbaeva N. S., Nurpeisova M. B., Aitkazinova Sh. K., Nukarbekova Zh. M., Derbisov K. N. Sposob ukrepleniya otkosov kar'era [Method for Strengthening Quarry Slopes]: patent KZ36246-B, Republic of Kazakhstan. – Pravoobladatel': UNIV KAZA NAT RES TECH. – Registratsionnyy nomer Derwent: 2024-C48648 (in Russian)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трубецкой К. Н. Состояние и основные направления комплексного освоения и сохранения ресурсов земных недр // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы конференции. – М.: ИПКОН РАН, 2020. – С. 5–11 (на русском языке)
2. Становление нового технологического уклада комплексного освоения недр при истощении балансовых запасов месторождений / Д. Р. Каплунов [и др.] // Горный журнал. – 2019. – № 4. – С. 11–15 (на русском языке)
3. Ваулин О. В. Жамбылская область. Золото: справочник. – Тараз – Бишкек: «РОКИЗОЛ», 2016. – 94 с. (на русском языке)
4. Нурпейісова М. Б., Кыргызбаева Г. М., Нукарбекова Ж. М. Инновационные способы диагностики трещиноватости горных пород: свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом № 62699 от 06.12.2025 (на русском языке)
5. Кыргызбаева Г. М., Нурпейісова М. Б. Способ прогнозирования ФМС и НДС массива: свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом № 19300 от 12 июля 2021 г. (на русском языке)

6. Нурпеисова М. Б., Битимбаев М. Ж., Рысбеков К. Б., Кыргызбаева Г. М. Сейсмоакустический способ прогнозирования НДС массива: патент RZ35898-Б. – Правопреемник: UNIV KAZA NAT RES TECH, 2024. – Регистрационный номер Derwent: 2024-B08861 (на русском языке)
7. Кыргызбаева Г. М., Нурпеисова М. Б. Новый подход к созданию ГДП: свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом № 19300 от 12 июля 2021 г. (на русском языке)
8. Нурпеисова М. Б., Айтказинова Ш. К., Кыргызбаева Г. М. Геомеханический мониторинг массива горных пород при комбинированном способе разработки месторождений // Геодезия и горная съемка: материалы 14-й Международной междисциплинарной научной конференции SGEM. – Албена, Болгария, 2014. – С. 279–292 (на английском языке)
9. Интегрированный мониторинг состояния массива горных пород при крупномасштабной разработке недр / О. Bazaluk [и др.] // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Т. 10. – С. 1–12 (на английском языке)
10. Нурпеисова М. Б., Рысбеков К. Б., Айтказинова Ш. К., Доненбаева Н. С., Нукарбекова Ж. М., Дербисов К. Н. Наземный постоянный геодезический пункт принудительного центрирования приборов: патент RZ35798. – Правопреемник: UNIV KAZA NAT RES TECH. – Регистрационный номер Derwent: 2022-C4343S (на русском языке)
11. Айтказинова Ш. К., Нурпеисова М. Б., Нукарбекова Ж. М., Дербисов К. Н. Подземный пункт принудительного центрирования приборов: патент KZ35900-В. – Правопреемник: UNIV KAZA NAT RES TECH. – Регистрационный номер Derwent: 2024-B08862 (на русском языке)
12. Бек А. А., Доненбаева Н. С., Нурпеисова М. Б., Айтказинова Ш. К., Нукарбекова Ж. М., Дербисов К. Н. Способ укрепления откосов карьера: патент KZ36246-В. – Правопреемник: UNIV KAZA NAT RES TECH. – Регистрационный номер Derwent: 2024-C48648 (на русском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Нукарбекова Ж. М., докторант, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан), zh.nukarbekova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-1605-8907>

Айтказинова Ш. К., доктор Ph.D, қауымдастырылған профессор, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан), sh.aitkazinova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-0964-3008>

Бек А. А., доктор Ph.D, аға оқытушысы, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан), a.bek@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-1671-297X>

Милетенко Н. А., т. ф. к., аға ғылыми қызметкер, Федералдық мемлекеттік бюджеттік ғылыми мекеме «Ресей Ғылым академиясының академигі Н. В. Мельников атындағы Жер қойнауын кешенді игеру мәселелері институты» (РФА ИПКОН) (Мәскеу қ., Ресей), nmilet@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5594-3036>

Information about the authors:

Nukarbekova Zh. M., Ph.D Doctoral Student, Department of Mine Surveying and Geodesy, Satbayev University (Kazakh National Research Technical University) (Almaty, Kazakhstan)

Aitkazinova Sh. K., Ph.D, Associate Professor, Department of Mine Surveying and Geodesy, Satbayev University (Kazakh National Research Technical University) (Almaty, Kazakhstan)

Bek A. A., Ph.D, Senior Lecturer, Department of Mine Surveying and Geodesy, Satbayev University (Kazakh National Research Technical University) (Almaty, Kazakhstan)

Miletenko N. A., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution of Science, academician N.V. Melnikov Institute of Problems of Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPCON RAS) (Moscow, Russia)

Сведения об авторах:

Нукарбекова Ж. М., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный технический исследовательский университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)

Айтказинова Ш. К., доктор Ph.D, ассоциированный профессор, кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный технический исследовательский университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)

Бек А. А., доктор Ph.D, ст. преподаватель кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный технический исследовательский университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)

Милетенко Н. А., к. т. н., ст. научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) (г. Москва, Россия)

Код МРНТИ 52.31.47

Ж. С. Саркулова¹, *Н. В. Матвиенко², К. Т. Зикирова², А. Г. Гусманова³¹Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова (г. Актобе, Казахстан),²ТОО «Expert Pro» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан),³Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова (г. Актау, Казахстан)

ОЦЕНКА ПРИРОДНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД СУЗДАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА

Аннотация. В статье представлены результаты исследования природного поля напряжений массива горных пород Суздальского месторождения с использованием метода измерительного гидроразрыва. Выполнен анализ геолого-структурных особенностей месторождения и обоснован выбор мест размещения замерных станций с учетом горнотехнических условий и перспектив развития очистных работ. Рассмотрены методика проведения натурных испытаний, конструкция измерительного комплекса и порядок определения главных горизонтальных напряжений по результатам гидравлических тестов. Получены количественные характеристики напряженно-деформированного состояния массива на различных горизонтах, позволившие выявить особенности распределения природных напряжений и влияние тектонических нарушений. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании систем разработки, выборе параметров крепления горных выработок и повышении безопасности ведения подземных горных работ.

Ключевые слова: измерительный гидроразрыв, природное поле напряжений, напряженно-деформированное состояние, горный массив, главные напряжения, геомеханика.

Суздаль кен орнының тау жыныстары массивінің табиғи кернеу өрісін өлшеу гидрожарылыс әдісімен бағалау
Аннотация. Мақалада Суздаль кен орнының тау жыныстары массивінің табиғи кернеу өрісін өлшеу гидрожарылыс әдісі арқылы зерттеу нәтижелері ұсынылған. Кен орнының геологиялық-құрылымдық ерекшеліктеріне талдау жүргізіліп, тау-кен техникалық жағдайлар мен тазарту жұмыстарының даму перспективаларын ескере отырып, өлшеу станцияларын орналастыру орындары негізделді. Далалық сынақтарды жүргізу әдістемесі, өлшеу кешенінің құрылымы және гидравликалық сынақтардың нәтижелері бойынша басты горизонталь кернеулерді анықтау тәртібі қарастырылды. Өртүрлі горизонттардағы тау жыныстары массивінің кернеулі-деформацияланған күйінің сандық сипаттамалары алынып, табиғи кернеулердің таралу ерекшеліктері мен тектоникалық бұзылыстардың әсері анықталды. Зерттеу нәтижелері кен орындарын игеру жүйелерін жобалау, тау-кен қазбаларын бекіту параметрлерін таңдау және жерасты тау-кен жұмыстарын жүргізу қауіпсіздігін арттыру кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: өлшеу гидрожарылыс әдісі, табиғи кернеу өрісі, кернеулі-деформацияланған күй, тау жыныстары массиві, басты кернеулер, геомеханика.

Assessment of the in-situ stress field of the Suzdal deposit rock mass using the hydraulic fracturing method

Abstract. The article presents the results of investigating the in-situ stress field of the Suzdal deposit rock mass using the hydraulic fracturing method. An analysis of the geological and structural features of the deposit was carried out, and the locations of monitoring stations were substantiated considering mining conditions and the prospects for further mine development. The methodology of field testing, the design of the measuring system, and the procedure for determining the principal horizontal stresses from hydraulic fracturing tests are described. Quantitative characteristics of the stress-strain state of the rock mass at different mining levels were obtained, making it possible to identify the distribution patterns of in-situ stresses and the influence of tectonic structures. The obtained results can be applied to the design of mining systems, the selection of underground support parameters, and the improvement of safety during underground mining operations.

Key words: hydraulic fracturing, in-situ stress field, stress-strain state, rock mass, principal stresses, geomechanics.

Введение

Диагностика исходного поля напряжений породных массивов, как важнейшее условие правильных проектных решений, необходима при выборе и обосновании рациональной технологии добычи полезных ископаемых, обеспечивающей безопасность горных работ на шахтах и рудниках, при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений, других объектов технического назначения, находящихся во взаимодействии с прилегающим (вмещающим) массивом [1].

Рудная зона 1–3 прослежена геологоразведочными выработками и скважинами по простиранию на 1400 м, имеет крутое (70–65°) юго-восточное падение (рис. 1 и 2) [2].

Морфология зоны сложная, обусловлена резкими раздвухами (50–90 м) и пережимами. Минерализованные брекчии имеют различную природу. Выделяются конседиментационные, тектонические и меланжевые брекчии. Брекчии тектонического происхождения характеризуются остроугольной формой обломков близким литологическим составом и цементируются кварц-карбонатной жильной массой. В интенсивно дислоцированных разностях таких брекчий отмечается парагенезис золото-пирротин-рутил. На востоке месторождения, где в рудовмещающем разрезе широко представлены известняки, встречаются полимиктовые существенно известковистые брекчии. Они состоят из слабоокатанных разного размера обломков ор-

ганогенных известняков, углеродистых кремнистых сланцев и руд. Цементирующий материал в них представлен кварцем, железистым карбонатом, хлоритом и серицитом. Местами они имеют белесую светло-зеленую окраску за счет приповерхностных процессов каолинизации. Рудные обломки сложены тонкокристаллическим или фрамбоидальным пиритом, игольчатым арсенопиритом и содержат вкрапления видимого золота. Вокруг них в цементирующем кварц-карбонат-слюдистом агрегате встречаются более крупнокристаллические сульфиды и золото [3].

Рассматриваемая зона 1–3 представлена основными пятью рудными телами. Наиболее крупными из них являются рудные тела 1–1 и 1–4.

Рудное тело 1–1 прослежено буровыми скважинами по простиранию на 660 м, по падению на 122 м, мощность от 1 до 30 м, средний угол падения 57°. Рудная минерализация представлена в основном пиритом.

Рудное тело 1–4 локализуется в лежащем боку рудного тела 1–1, прослежено по простиранию на 500 м, по падению на 170 м, средняя мощность 2,8 м, средний угол падения 60°. Минерализация представлена пиритом, арсенопиритом, пирротинном, содержащими тонкодисперсную вкрапленность золота.

Рудное тело 1–5 расположено в лежащем боку рудного тела 1–4, прослежено по простиранию на 200 м, по падению – на 130 м, мощность 1,7 м, средний угол падения 67°.

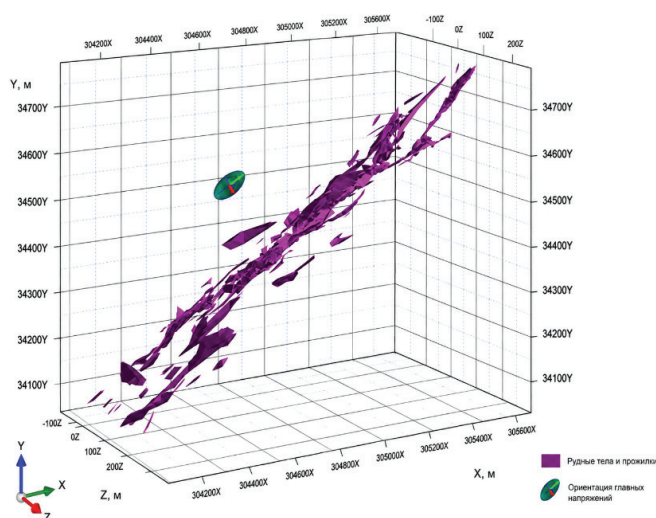


Рис. 1. Аксонометрическая проекция рудной зоны 1–3.
Сурет 1. 1–3 кен аймағының аксонометриялық проекциясы.

Figure 1. Axonometric projection of ore zone 1–3.

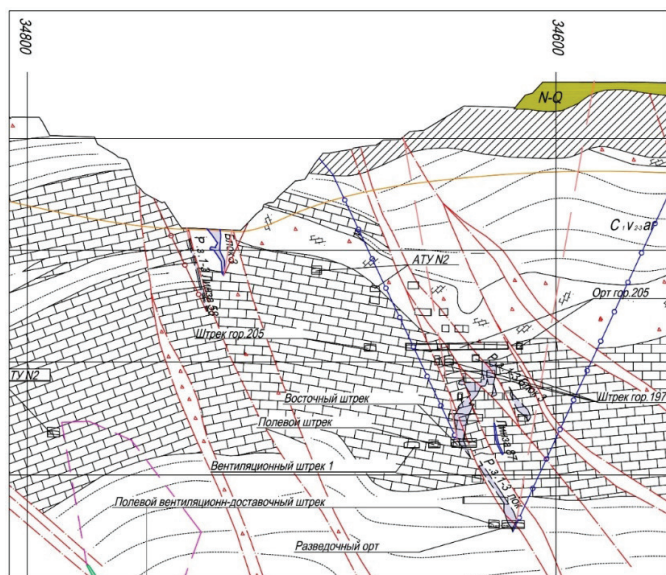


Рис. 2. Геологический разрез по линии 18 р.з. 1–3, 2.
Сурет 2. 1–3 және 2 кен аймақтарының 18 сызығы бойынша геологиялық қимасы.

Figure 2. Geological cross-section along line 18 of ore zones 1–3 and 2.

Рудная зона 1–3 непосредственно привязана к Суздальскому разлому. Рудные тела занимают секующее положение по отношению к вмещающим породам, которые представлены в основном:

- известняками, от массивных до тонкослоистых или их брекчиями, которые цементированы карбонатом;
- раздробленными известковисто-углистыми алевролитами на восточном фланге рудной зоны.

Вследствие того, что рудные тела приурочены к зоне разлома, руды по литологическому признаку представлены этими же породами, только с повышенным содержа-

нием сульфидных минералов. Поэтому в зависимости от литологической разновидности породы и руды рудной зоны 1–3 можно отнести большей частью к устойчивым и средней устойчивости, в местах интенсивного дробления, которые приурочены к тектоническим швам – к неустойчивым. Примерное соотношение устойчивых, среднеустойчивых и неустойчивых пород и руд выглядит как $40 \times 40 \times 20\%$. Объемный вес вмещающих пород от 2,64 до 2,73 т/м³ (средний 2,7 т/м³) [4–6].

Методология

Участок скважины изолируют двухпакерным зондом и нагружают путем нагнетания жидкости в межпакерное пространство до достижения критических растягивающих напряжений, вызывающих разрыв породы. Метод измерительного гидроразрыва основан на зависимости критических давлений от прочности пород и действующих в массиве напряжений. По диаграммам «давление – время» определяют давление разрыва, раскрытия и закрытия трещины, которые используются для оценки напряженного состояния массива. Поскольку давление и напряжение имеют одинаковую размерность, определение деформационных характеристик пород не требуется. Для контроля напряжений выбирают участки, максимально удаленные от зоны очистных работ, где оборудуют замерные станции с тремя скважинами диаметром 76 мм и глубиной до 12 м.

На замерной станции бурят контрольные скважины и проводят их обследование. В выбранном интервале устанавливают измерительный зонд и выполняют испытания методом гидроразрыва с регистрацией давления разрыва и стабилизации, которое фиксируют в течение 5 минут. Испытания повторяют 2–3 раза, после чего зонд последовательно перемещают по длине скважины с шагом 1,0–1,5 м для проведения дополнительных измерений. По результатам гидравлических тестов определяют меньшую и рассчитывают большую горизонтальные компоненты напряжений, после чего зонд извлекают [7].

Замерная станция включает четыре скважины глубиной до 12 м: одну горизонтальную в грудь забоя, две по бортам и одну вертикальную. Места их расположения выбирают с учетом горнотехнических условий, удаленности от очистных работ, отсутствия влияния подработки или надработки и возможности выполнения алмазного бурения диаметром 76 мм.

Для проведения измерений используют переносной измерительно-вычислительный комплекс «Гидроразрыв» (рис. 3), включающий двухпакерный зонд, насос, манометр, напорные трубопроводы, систему регистрации давления с прессметром и датчиком, а также персональный компьютер. Комплекс обеспечивает регистрацию, передачу и автоматическую обработку данных в подземных условиях [8].

В натурных экспериментах применяются измерительные зонды двух конструкций (рис. 4 и 5). В зонде с четырьмя пакерующими элементами предусмотрено два гидроцилиндра, с помощью которых производится их осевое сжатие. Имелась возможность изменять протяженность межпакерного пространства путем замены центральной части несущего стержня. При выполнении тестов гидро-



Рис. 3. Фотографии оборудования для замера природного поля напряжений на замерной станции рудника Суздальский.

Сурет 3. Суздаль кенішінің өлшеу станциясында табиғи кернеу өрісін өлшеуге арналған жабдықтың фотосуреттері.

Figure 3. Photographs of the equipment used for in situ natural stress field measurements at the measurement station of the Suzdal Mine.

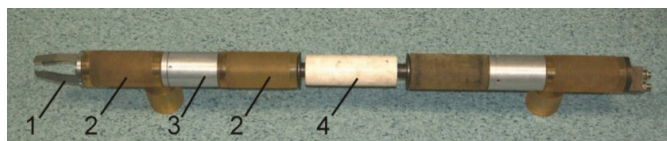


Рис. 4. Общий вид измерительного зонда с четырьмя пакерами: 1 – направляющие пластины; 2 – полиуретановые пакеры; 3 – гидроцилиндры; 4 – втулка для заполнения межпакерного пространства.

Сурет 4. Төрт пакерлі өлшеу зондтарының жалпы көрінісі: 1 – бағыттаушы пластиналар; 2 – полиуретанды пакерлер; 3 – гидроцилиндрлер; 4 – пакераралық кеңістікті толтыруға арналған төлке.

Figure 4. General view of the measuring probe with four packers: 1 – guide plates; 2 – polyurethane packers; 3 – hydraulic cylinders; 4 – sleeve for filling the inter-packer space.

разрыва размер межпакерного пространства составлял 5–6 диаметров. Для беспрепятственной досылки устройства в измерительную скважину диаметром 76 мм зонд был оснащен направляющими пластинами [9].

В двухпакерном зонде осевое сжатие пакерирующих элементов производится с помощью гидроцилиндра, расположенного в центральной части. В конструкции было предусмотрено использование пакерирующих элементов, армированных пружинами.

Методика выполнения тестов измерительного гидро-разрыва. Для контроля напряженного состояния массива выбирают участки, удаленные от зоны очистных работ, где бурят скважины диаметром 76 мм и глубиной до 12 м. После обследования стенок скважины устанавливают измерительный зонд и проводят испытания методом гидроразрыва с регистрацией давления разрыва и стабилизации. Испытания повторяют 2–3 раза, последовательно перемещая зонд по длине скважины с шагом 1,0–1,5 м. По

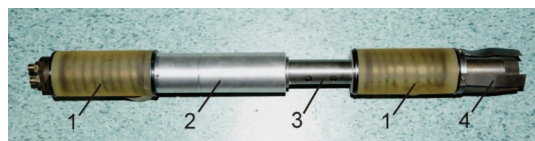


Рис. 5. Общий вид двухпакерного измерительного зонда: 1 – полиуретановые пакеры с пружинами; 2 – гидроцилиндр; 3 – втулка распорная; 4 – направляющие пластины.

Сурет 5. Екі пакерлі өлшеу зондтарының жалпы көрінісі: 1 – серпінделері бар полиуретанды пакерлер; 2 – гидроцилиндр; 3 – аралық төлке; 4 – бағыттаушы пластиналар.

Figure 5. General view of the two-packer measuring probe: 1 – polyurethane packers with springs; 2 – hydraulic cylinder; 3 – spacer sleeve; 4 – guide plates.

результатам испытаний определяют меньшую и рассчитывают большую горизонтальные компоненты напряжений.

Исследования выполняют на пяти замерных станциях, расположенных в рудных зонах 1–3 и Л-7 (восточный участок). Каждая станция включает четыре скважины диаметром 76 мм и глубиной 12 м: одну в грудь забоя, две по бортам и одну вертикальную. Места размещения станций определяют с учетом горнотехнических условий, удаленности от очистных работ и возможности выполнения алмазного бурения [10].

Результаты и обсуждения

За всю историю отработки Суздальского месторождения не проводилось изучения природного поля действующих напряжений [Анализ имеющихся геомеханических и гидро-геологических данных и программа по доизучению месторождения Суздаль / Отчет SRK Consulting (Russia) Ltd., 2020]. В нынешней ситуации, при увеличении глубины отработки и

увеличении фронта работ по площади, необходимо понимание действия природного поля напряжений как величин, так и направления действия главных сжимающих напряжений.

В связи с чем SRK Consulting (Russia) Ltd. совместно с геомеханической службой рудника была предложена концепция размещения замерных станций для выполнения замеров компонентов тензора напряжений методом гидро-разрыва на Суздальском месторождении.

Следует отметить, что Суздальский тектонический блок в структурном отношении представляет собой антиклиналь, пересеченную Горностаевским надвигом, что может свидетельствовать о наличии высоких горизонтальных напряжений, отличающихся по величинам, замеренными в лежащем и висячем крыльях разлома.

В лежащем крыле Горностаевского разлома расположены станции № 3 и № 5, в висячем крыле Горностаевского разлома расположены станции № 2 и № 4.

На рис. 6–9 представлен общий вид мест заложения рекомендуемых станций для изучения тензора напряжений.

Выбор мест заложения замерных станций определен консалтинговой компанией SRK с учетом текущего состояния добычных работ. При этом учитывается удаление зоны экспериментов от фронта очистных работ, отсутствие подработки либо надработки контролируемого участка массива, возможность размещения бурового оборудования. Было выбрано 5 точек замера на горизонтах -40 м, -85 м, -180 м, -280 м и -340 м.

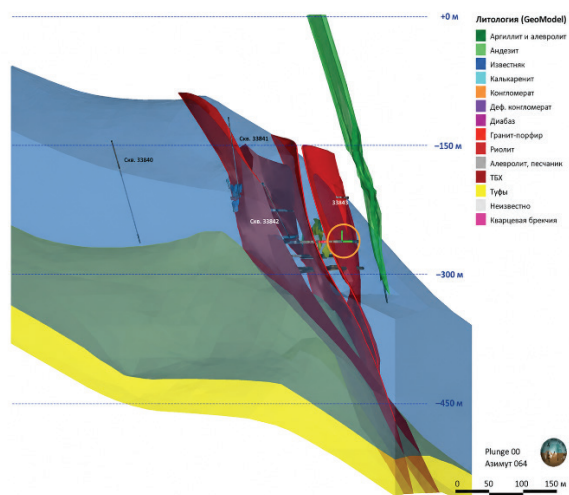


Рис. 6. Заложение замерной станции № 4.
Сурет 6. № 4 өлшеу станциясының орналасуы.
Figure 6. Layout of measurement station No. 4.

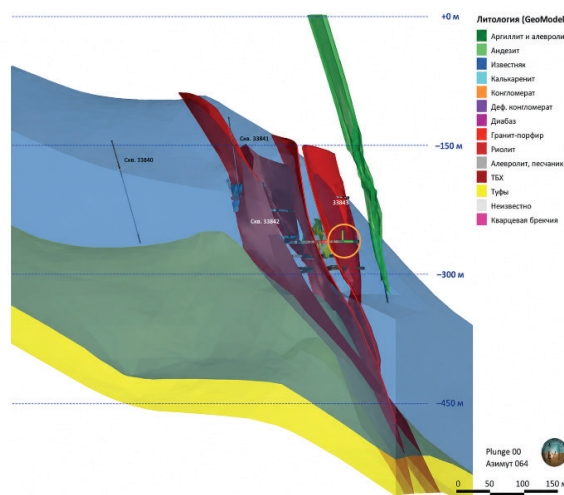


Рис. 7. Заложение замерной станции № 5.
Сурет 7. № 5 өлшеу станциясының орналасуы.
Figure 7. Layout of measurement station No. 5.

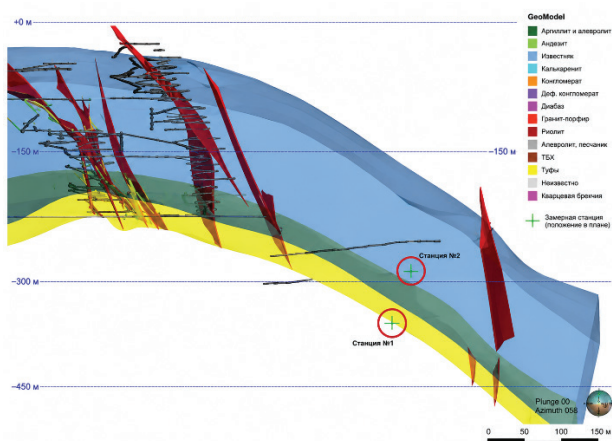


Рис. 8. Заложение замерных станций № 2 и № 3.
Сурет 8. № 2 және № 3 өлшеу станцияларының орналасуы.
Figure 8. Layout of measurement stations No. 2 and No. 3.

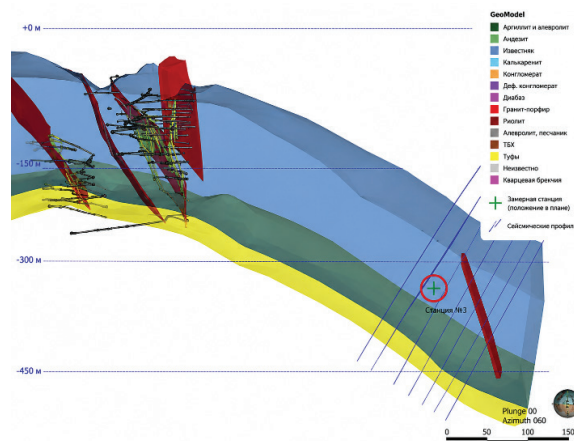


Рис. 9. Заложение замерной станции № 1.
Сурет 9. № 1 өлшеу станциясының орналасуы.
Figure 9. Layout of measurement station No. 1.

Примечание:

желтым цветом выделены туфы в основании которых лежит сместитель Горностаевского разлома; красным цветом обозначены закартированные рудообразующие разломы; голубым известняки

Из-за большой трещиноватости массива расчет главных напряжений произведен по методу «Повторного раскрытия природных трещин». В местах, где указана прочность породы на разрыв произведен расчет по классической схеме. Из прочности на разрыв видно, что во всех этих замерах гидроразрыв проведен по залеченным жилам, а не по самой породе, так как прочность пород на разрыв должна быть на порядок больше чем полученная.

Экспериментальные данные и их анализ

Количественная и качественная оценка НДС массива на руднике Суздальский. Эксперименты выполнены на чуть выше отметки горизонта -40. Замеры проведены в скважинах 1-1 (правый борт выработки) и 1-2 (забой выработки). На рис. 10 представлена замерная станция № 1 (р.з. 1-3 (Л-7), буровая камера 15, профиль 20+50) разведочного штрека горизонта -40 м.

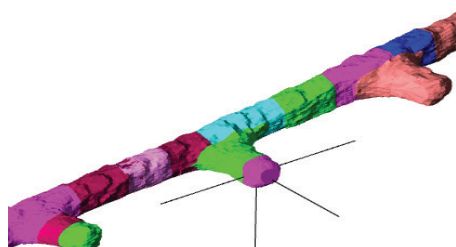


Рис. 10. Замерная станция № 1 (р.з. 1-3 (Л-7), буровой камеры 15 (профиль 20+50) разведочного штрека гор. -40 м, 33850.

Сурет 10. № 1 өлшеу станциясы (1-3 кен аймағы (Л-7), 15-бұрғылау камерасы (20+50 профиль), -40 м барлау штрегі, 33850.

Figure 10. Measurement station No. 1 (ore zone 1-3 (L-7), drill chamber 15 (profile 20+50), exploration drift, -40 m level, 33850.

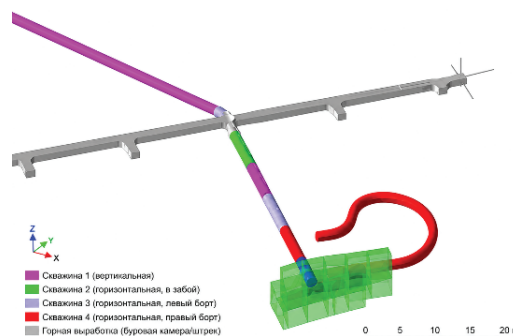


Рис. 11. Замерная станция № 3 (р.з. 1-3 (Л-7), разведочный штрек 1, гор. -180 м (в груди забоя). Сурет 11. № 3 өлшеу станциясы (1-3 кен аймағы (Л-7), 1-барлау штрегі, -180 м горизонт (забойдың кеуде бөлігінде).

Figure 11. Measurement station No. 3 (ore zone 1-3 (L-7), exploration drift No. 1, -180 m level, at the face.

Литостатическое давление ($\sigma_h = \gamma h$) для замерной станции на горизонте -40 м составляет около 8,5 МПа. На замерной станции № 1 выполнено 15 тестов гидроразрыва. В результате обработки $P-t$ диаграмм установлены следующие значения напряжений, действующих в массиве:

$$\sigma_{\min} = 10,86 \div 11,58 \text{ МПа}; \sigma_{\max} = 19,41 \div 21,96 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\text{верт}} = 8,79 \text{ МПа}.$$

Высокое значение горизонтальной составляющей может быть обусловлено близостью к зоне сопряжения или распределением вертикальной составляющей от бортов отработанного карьера (которое снижается с глубиной). Результаты испытаний методом гидроразрыва на замерной станции № 2 приведены в таблице 1. Значения компонент природных напряжений, определенные по результатам экспериментов на горизонте -85 м, приведены в таблице 2.

Таблица 1

Журнал наблюдений при выполнении тестов гидроразрыва на замерной станции № 2 рудника Суздальский (без учета влияния выработки)

Кесте 1

Суздаль кенішінің № 2 өлшеу станциясында гидрожару сынақтарын жүргізу кезіндегі бақылау журналы (қазба әсерін ескермегенде)

Table 1

Observation log of hydraulic fracturing tests conducted at measurement station No. 2 of the Suzdal mine (without considering excavation influence)

Координаты эксперимента		1-ое нагружение		2-е нагружение		3-е нагружение		Прочность породы на разрыв T_c , МПа
Индекс измерительной скважины	Расстояние от контура выработки до места гидроразрыва, м	Давление гидроразрыва P_r , МПа	Давление запираания P'_s , МПа	Давление раскрытия трещины P'_r , МПа	Давление запираания P''_s , МПа	Давление раскрытия трещины P''_r , МПа	Давление запираания P'''_s , МПа	
2-1	10	14,9	10,7	11,8	10,94	11,7	10,7	Трещина
2-1	9	12,4	10,88	12,1	11,2	11,3	10,04	Трещина
2-1	8	13,6	10,52	11,2	11,11	11,2	10,36	Трещина
2-2	10	15,2	11,02	13,8	11,72	13,4	11,05	Трещина
2-2	9	14,3	11,13	13,3	9,8	13,3	9,36	Трещина
2-2	8	14,0	9,68	11,9	9,9	12,0	9,34	Трещина

Таблица 2

Значения компонент напряжений, установленные в экспериментах на горизонте -85 м

Кесте 2

-85 м горизонтта жүргізілген тәжірибелер нәтижесінде анықталған кернеу компоненттерінің мәндері

Table 2

Stress component values determined from experiments conducted at the -85 m level

Индекс измерительной скважины	Расстояние от контура выработки, м	$\sigma_{верт}$, МПа	σ_{min} , МПа	σ_{max} , МПа
2-1	10		10,78	
2-1	9		10,7	
2-1	8		10,66	
2-2	10			11,26
2-2	9	9,58		
2-2	8	9,64		

Примечание:

в таблице приведены осредненные значения полученных напряжений

Эксперименты выполнены на отметке -180 м. Замеры проведены в скважинах 3–1 (левый борт выработки) и 3–2 (забой выработки).

Выводы

В результате выполненных исследований проведена оценка природного поля напряжений массива горных пород Суздальского месторождения методом измерительного гидроразрыва. Обоснованы места размещения замерных станций с учетом геологического строения месторождения, горнотехнических условий и удаленности от фронта очистных работ, что обеспечило получение достоверных экспериментальных данных.

Установлено, что напряженно-деформированное состояние массива характеризуется преобладанием го-

ризонтальных напряжений, величина и направление которых определяются глубиной ведения горных работ и особенностями тектонического строения месторождения, включая влияние Горностаевского разлома. Полученные результаты позволяют объективно оценить напряженное состояние массива на различных горизонтах разработки.

Полученные данные могут быть использованы при уточнении геомеханических моделей месторождения, проектировании параметров крепления горных выработок, выборе рациональных технологических схем разработки и прогнозировании проявлений горного давления, что будет способствовать повышению безопасности и эффективности подземной разработки Суздальского месторождения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Haimson B. C., Cornet F. H. Рекомендуемые методы ISRM по определению напряжений в горных породах. Часть 3. Гидроразрыв и (или) гидравлические испытания ранее существовавших трещин // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2003. – Т. 40. – № 7–8. – С. 1011–1020 (на английском языке)
2. Amadei B., Stephansson O. Напряженное состояние массива горных пород и методы его измерения. – Лондон: Chapman & Hall, 1997. – 490 с. (на английском языке)
3. Zang A., Stephansson O. Поле напряжений земной коры. – Дордрехт: Springer, 2010. – 322 с. (на английском языке)
4. Золото коры выветривания Суздальского месторождения (Казахстан) / Ю. А. Калинин [и др.] // *Геология и геофизика*. – 2009. – Т. 50. – № 3. – С. 241–257 (на русском языке)
5. Суздальское золото-сульфидное месторождение в черносланцевых толщах Восточного Казахстана / Ю. А. Калинин [и др.] // *Геология рудных месторождений*. – 2012. – Т. 54. – № 4. – С. 305–328 (на русском языке)
6. ТОО «Региональное обучение». Вскрытие и отработка запасов глубоких горизонтов Суздальского месторождения рудных зон 1–3, 2 и 4 до горизонта -500 м. Часть технологическая (подземный рудник): проект. – Усть-Каменогорск, 2012 (на русском языке)
7. Haimson B. C., Cornet F. H. Рекомендуемые методы ISRM по определению напряжений в горных породах. Часть 3. Гидроразрыв и (или) гидравлические испытания ранее существовавших трещин // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2003. – Т. 40. – № 7–8. – С. 1011–1020 (на английском языке)
8. Amadei B., Stephansson O. Напряженное состояние массива горных пород и методы его измерения. – Лондон: Chapman & Hall, 1997. – 490 с. (на английском языке)
9. Zang A., Stephansson O. Поле напряжений земной коры. – Дордрехт: Springer, 2010. – 322 с. (на английском языке)
10. SRK Consulting (Russia) Ltd. Анализ имеющихся геомеханических и гидрогеологических данных и программа по доизучению месторождения Суздаль: отчет. – 2020 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Haimson B. C., Cornet F. H. ISRM ұйымының тау жыныстарындағы кернеулерді анықтауға арналған ұсынылатын әдістері. 3-бөлім. Гидрожару және (немесе) бұрыннан бар жарықтарды гидравликалық сынау // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2003. – Т. 40. – № 7–8. – Б. 1011–1020 (ағылшын тілінде)

2. Amadei B., Stephansson O. Тау жыныстары массивінің кернеулік күйі және оны өлшеу әдістері. – Лондон: Chapman & Hall, 1997. – 490 б. (ағылшын тілінде)
3. Zang A., Stephansson O. Жер қыртысының кернеу өрісі. – Дордрехт: Springer, 2010. – 322 б. (ағылшын тілінде)
4. Суздаль кен орнының үгілу қыртысындағы алтын (Қазақстан) / Ю. А. Калинин [және т. б.] // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 3. – Б. 241–257 (орыс тілінде)
5. Шығыс Қазақстанның қара тақтатасты қабаттарындағы Суздаль алтын-сульфидті кен орны / Ю. А. Калинин [және т. б.] // Кен кен орындарының геологиясы. – 2012. – Т. 54. – № 4. – Б. 305–328. (орыс тілінде)
6. «Региональное обучение» ЖШС. Суздаль кен орнының терең горизонттарындағы қорларды ашу және игеру. 1–3, 2 және 4 кен аймақтарын -500 м горизонтқа дейін игеру. Технологиялық бөлім (жерасты кеніші): жоба. – Өскемен, 2012 (орыс тілінде)
7. Haimson B. C., Cornet F. H. ISRM ұйымының тау жыныстарындағы кернеулерді анықтауға арналған ұсынылатын әдістері. 3-бөлім. Гидрожару және (немесе) бұрыннан бар жарықтарды гидравликалық сынау // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2003. – Т. 40. – № 7–8. – Б. 1011–1020 (ағылшын тілінде)
8. Amadei B., Stephansson O. Тау жыныстары массивінің кернеулік күйі және оны өлшеу әдістері. – Лондон: Chapman & Hall, 1997. – 490 б. (ағылшын тілінде)
9. Zang A., Stephansson O. Жер қыртысының кернеу өрісі. – Дордрехт: Springer, 2010. – 322 б. (ағылшын тілінде)
10. SRK Consulting (Russia) Ltd. Қолда бар геомеханикалық және гидрогеологиялық деректерді талдау және Суздаль кен орнын қосымша зерттеу бағдарламасы: есеп. – 2020 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Haimson B. C., Cornet F. H. ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation – Part 3: Hydraulic Fracturing (HF) and/or Hydraulic Testing of Pre-Existing Fractures (HTPF) // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2003. – Vol. 40. – No. 7–8. – P. 1011–1020 (in English)
2. Amadei B., Stephansson O. Rock Stress and Its Measurement. – London: Chapman & Hall, 1997. – 490 p. (in English)
3. Zang A., Stephansson O. Stress Field of the Earth's Crust. – Dordrecht: Springer, 2010. – 322 p. (in English)
4. Zoloto kory vyvetrivaniya Suzdal'skogo mestorozhdeniya (Kazakhstan) [Gold in the Weathering Crust of the Suzdal Deposit (Kazakhstan)] Yu. A. Kalinin et al. Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 2009. – Vol. 50. – No. 3. – P. 241–257 (in Russian)
5. Suzdal'skoe zoloto-sul'fidnoe mestorozhdenie v chernoslantsevykh tolshchakh Vostochnogo Kazakhstana [Suzdal Gold-Sulfide Deposit in Black-Shale Strata of Eastern Kazakhstan] Yu. A. Kalinin et al. Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]. – 2012. – Vol. 54. – No. 4. – P. 305–328 (in Russian)
6. TOO «Regional'noe obucheniye». Vskrytie i otrabotka zapasov glubokikh gorizontov Suzdal'skogo mestorozhdeniya rudnykh zon 1–3, 2 i 4 do gorizonta -500 m. Chast' tekhnologicheskaya (podzemnyi rudnik): proekt [Regional Training LLP. Development and Mining of Deep-Level Reserves of the Suzdal Deposit: Ore Zones 1–3, 2 and 4 to the -500 m Level. Technological Part (Underground Mine): Project]. – Ust-Kamenogorsk, 2012 (in Russian)
7. Haimson B. C., Cornet F. H. ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation – Part 3: Hydraulic Fracturing (HF) and/or Hydraulic Testing of Pre-Existing Fractures (HTPF) // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2003. – Vol. 40. – No. 7–8. – P. 1011–1020 (in English)
8. Amadei B., Stephansson O. Rock Stress and Its Measurement. – London: Chapman & Hall, 1997. – 490 p. (in English)
9. Zang A., Stephansson O. Stress Field of the Earth's Crust. – Dordrecht: Springer, 2010. – 322 p. (in English)
10. SRK Consulting (Russia) Ltd. Analiz imeyushchikhsya geomekhanicheskikh i gidrogeologicheskikh dannykh i programma po doizucheniyu mestorozhdeniya Suzdal': otchet [SRK Consulting (Russia) Ltd. Analysis of Available Geomechanical and Hydrogeological Data and Program for Further Investigation of the Suzdal Deposit: Report]. – 2020 (in Russian)

Сведения об авторах:

Сарқұлова Ж. С., Ph.D, ассоциированный профессор (доцент), кафедра «Нефтегазовое дело», Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова (г. Актөбе, Казахстан), zhadi_0691@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8539-1802>

Матвиенко Н. В., магистр технических наук, Руководитель НИОКР TOO «Expert Pro» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), n.matvienko@expertpro.kz; <https://orcid.org/0009-0006-2622-0732>

Зикирова К. Т., магистр технических наук, инженер-обогащитель TOO «Expert Pro» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), k.zikirova@expertpro.kz; <https://orcid.org/0000-0002-6261-9170>

Гусманова А. Г., к. т. н., Ph.D, профессор, Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова (г. Актау, Казахстан), aigul.gusmanov@yu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-3163-153X>

Авторлар туралы мәліметтер:

Сарқұлова Ж. С., Ph.D, қауымдастырылған профессор (доцент), Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, «Мұнай-газ ісі» кафедрасы (Ақтөбе қ., Қазақстан)

Матвиенко Н. В., техника ғылымдарының магистрі, «Expert Pro» ЖШС ғылыми-зерттеу және тәжірибелік-конструкторлық жұмыстар бөлімінің жетекшісі (Өскемен қ., Қазақстан)

Зикирова К. Т., техника ғылымдарының магистрі, «Expert Pro» ЖШС байыту инженері (Өскемен қ., Қазақстан)

Гусманова А. Г., т. ғ. к., Ph.D доктор, профессор, Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инженерия университеті (Ақтау қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Sarkulova Zh. S., Ph.D., Associate Professor, Department of Oil and Gas Engineering, K. Zhubanov Aktobe Regional University (Aktobe, Kazakhstan)

Matvienko N. V., M.Sc. (Tech.), Head of R&D, Expert Pro LLP (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Zikirova K. T., M.Sc. (Tech.), Mineral Processing Engineer, Expert Pro LLP (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Gusmanova A. G., Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Professor, Sh. Yessenov Caspian University of Technology and Engineering (Aktau, Kazakhstan)

Комплексные решения для процессов измельчения и дробления

Полный ассортимент продуктов для процессов дробления и змельчения с акцентом на обеспечение бесперебойной эксплуатации. Футеровки для мельниц, кованые мелющие тела и изнашиваемые части дробилок, материалы и конструкция которых подобраны с учетом условий эксплуатации, и обеспечения высокой производительности, при одновременном сокращении числа незапланированных остановок.



**Широкий спектр
продуктов для процессов
дробления и измельчения**



**Изнашиваемые элементы,
разработанные с учетом
конкретных условий
эксплуатации**



**Специализированные
материалы и различные
габариты**



ME Elecmetal
Тел: +7 914 880 4545
+7 777 247 0787
+1 778 875 7525

Эл.Почта:
mongolia@me-elecmetal.com

Код МРНТИ 52.13.25

Г. Мейрамбек¹, Карел Вах², *Л. Қ. Адильбекова¹, А. Н. Нуржусупова¹¹Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан),²PHEDCS (Прага қ., Чехия)

GB-SAR МОНИТОРИНГІ ДЕРЕКТЕРІ ЖӘНЕ ГЕОМЕХАНИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ НЕГІЗІНДЕ ЖЫНЫС МАССИВІНІҢ ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЫН КЕШЕНДІ ТАЛДАУ

Аннотация. Мақалада терең карьерлердегі тау жыныстары массивінің жасырын әлсіреуін ерте анықтауға арналған интеграцияланған тәсіл қарастырылған. Зерттеу Ұлытау облысындағы «Шығыс-Сарыоба» кен орны карьерінің оңтүстік борттың жүргізілді. Әдістеме GB-SAR мониторингі, GNSS бақылаулары және RS3 бағдарламасындағы үшөлшемді геомеханикалық модельдеу нәтижелерін біріктіруге негізделген. GB-SAR деректері жергілікті деформациялық аномалияны анықтаса, GNSS бақылаулары өңірлік деформацияларды тіркемеді. Геомеханикалық модельдеу аномалияның терең пластикалық деформациялармен байланысты екенін көрсетті. Ұсынылған тәсіл карьер борттарының тұрақтылығын бағалау сенімділігін арттырып, қауіпті аймақтарды ерте анықтауға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: жерүсті радиолокациялық интерферометрия, геомеханикалық модельдеу, тау жыныстары массиві, карьер борттарының тұрақтылығы, деформациялық мониторинг, терең пластикалық деформациялар, кері талдау, ерте диагностика.

Integrated analysis of rock mass deformation based on GB-SAR data and geomechanical modeling

Abstract. The paper presents an integrated approach for the early detection of hidden rock mass weakening processes during deep open-pit mining. The study was conducted at the southern slope of the Vostochny Saryoba open pit located in the Ulytau Region of Kazakhstan. The methodology is based on the integrated analysis of GB-SAR monitoring data, GNSS observations, and three-dimensional geomechanical modeling performed in the RS3 software package. The study identified a local deformation anomaly and confirmed its relationship with deep-seated plastic deformation processes within the rock mass. The proposed approach improves the reliability of slope stability assessment and enhances the effectiveness of early identification of geomechanically hazardous zones.

Key words: ground-based radar interferometry, geomechanical modeling, rock mass, open-pit slope stability, deformation monitoring, deep-seated plastic deformation, back analysis, early diagnosis.

Интегрированный анализ деформационного состояния массива по данным GB-SAR и геомеханического моделирования

Аннотация. В статье рассмотрен интегрированный подход к раннему выявлению скрытых процессов ослабления массива горных пород при разработке глубоких карьеров. Исследование выполнено на примере южного борта карьера месторождения «Восточный Сарыоба» в области Улытау. Методика основана на комплексном анализе данных радиолокационного мониторинга GB-SAR, GNSS-наблюдений и результатов трехмерного геомеханического моделирования в программном комплексе RS3. В ходе исследования выявлена локальная деформационная аномалия и установлена ее связь с развитием глубинных пластических деформаций массива. Предложенный подход позволяет повысить надежность оценки устойчивости бортов карьеров и эффективность раннего выявления геомеханически опасных зон.

Ключевые слова: наземная радиолокационная интерферометрия, геомеханическое моделирование, массив горных пород, устойчивость бортов карьера, деформационный мониторинг, глубинные пластические деформации, обратный анализ, ранняя диагностика.

Кіріспе

Терең карьерлерді игеру тау жыныстары массивіндегі кернеулердің күрделі қайта бөліну үдерістерімен, әлсіреу аймақтарының қалыптасуымен және еңістер деформацияларының біртіндеп дамуымен қатар жүреді. Карьер кемерлерінің тұрақтылығын жоғалту өнеркәсіптік қауіпсіздікке елеулі қауіп төндіреді және өндірістік үдерістердің тоқтауына, инфрақұрылымның зақымдануына және апаттық жағдайлардың туындауына алып келуі мүмкін [1–3].

Қазіргі геомеханиканың ең күрделі міндеттерінің бірі – массив тұрақсыздығының бастапқы кезеңдерін анықтау, өйткені бұл кезеңде массивтің әлсіреу үдерістері әлі де айқын беткі деформациялармен қатар жүрмейді. Тәжірибеде мониторинг жүйелерінің басым бөлігі қалыптасып үлгерген ығысуларды тіркеуге бағытталған, ал тұрақсыздықтың жасырын даму кезеңдері көбінесе анықталмай қалады [4].

Дәстүрлі геодезиялық әдістер, соның ішінде GNSS-бақылаулар мен нивелирлеу, кеңістіктік ығысуларды анықтаудың жоғары дәлдігін қамтамасыз етеді, алайда бірқатар жағдайларда олар еңістердің жергілікті ерте деформацияларын анықтауға жеткілікті сезімтал болмайды [5, 6].

Соңғы жылдары жерүсті радиолокациялық интерферометрия (GB-SAR) әдістері кеңінен қолданылуда, олар жергілікті ығысуларға жоғары сезімталдықты және карьер еңістерін үздіксіз қашықтықтан мониторингтеу

мүмкіндігін қамтамасыз етеді. GB-SAR әдісінің жоғары тиімділігіне қарамастан, жергілікті деформациялық аномалияларды интерпретациялау күрделі міндет болып қала береді, себебі бақыланатын ығысулар олардың қалыптасу механизмдерін әрдайым біркәнді анықтауға мүмкіндік бермейді.

Көптеген зерттеулерде радиолокациялық мониторинг деректері негізінен дамып келе жатқан деформацияларды тіркеу немесе жедел ескерту құралы ретінде пайдаланылады. Сонымен қатар, жергілікті деформациялық аномалиялардың массивтің жасырын терең әлсіреу үдерістерінің индикаторы бола алатындығы мәселесіне айтарлықтай аз көңіл бөлінеді [7].

Осы зерттеуде еңістің локализацияланған деформациялық белсенділігі ауқымды беткі тұрақсыздықтың дамуына дейін пайда болуы мүмкін және массив ішінде терең пластикалық аймақтың қалыптасуын көрсетуі ықтимал деген гипотеза қарастырылады.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы GB-SAR арқылы тіркелетін жергілікті деформациялар мен үшөлшемді геомеханикалық модельдеу әдісі арқылы анықталған терең пластикалық аймақтың дамуы арасындағы өзара байланысты анықтауда болып табылады.

Зерттеудің мақсаты – GB-SAR мониторингі, GNSS-бақылаулар және FEM-модельдеу деректерін бірлесіп талдау негізінде тұрақсыздықтың жасырын аймақтарын ерте анықтаудың интеграцияланған тәсілін әзірлеу.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу нысаны Қазақстан Республикасының Ұлытау облысында орналасқан «Шығыс-Сарыоба» кен орнының карьері болып табылады.

Зерттеу ауданы кен орнын ұзақ уақыт бойы ашық әдіспен игеруге байланысты қарқынды техногендік әсермен сипатталады. Учаскенің геологиялық құрылысы тектоникалық бұзылыстармен, жоғары жарықшақтылық аймақтарымен және тау жыныстарының литологиялық әртектілігімен күрделенген.

Карьердің оңтүстік борты шегінде бұған дейін жергілікті деформациялық белсенділіктің белгілері тіркелген, бұл кешенді геомеханикалық талдау жүргізу қажеттілігін туындатты.

Есептік модельді құру үшін жер бедерінің цифрлық моделі, маркшейдерлік түсірілім деректері, карьер кемерлерінің контурлары және инженерлік-геологиялық материалдар пайдаланылды. Осы деректер негізінде зерттелетін учаскенің карьер бортының геометриясын және массивтің құрылымдық ерекшеліктерін қамтитын интеграцияланған геомеханикалық сұлба қалыптастырылды (1-сурет) [8].



Сурет 1. Интеграцияланған зерттеу әдісінің сұлбасы.

Figure 1. Scheme of the integrated research method.

Рис. 1. Схема интегрированного метода исследования.

Радиолокациялық мониторинг IBIS-FM EVO-C жерүсті интерферометрия жүйесін пайдалану арқылы жүргізілді. Мониторинг карьердің оңтүстік бортының аса қауіпті учаскелерін қамтып, радардың көру сызығы (LOS) бағыты бойынша ығысуларды тіркеуді қамтамасыз етті. Өңдеу нәтижелері бойынша ығысу карталары, деформациялардың уақыттық қатарлары, ығысу жылдамдықтарының таралуы және сигнал сапасының карталары (DQI) алынды. Кейінгі талдау үшін сигналдың тұрақты когеренттілігімен және

радиолокациялық өлшеулердің жоғары сапасымен сипатталатын учаскелер ғана пайдаланылды.



Сурет 2. Мониторинг кезеңіндегі радиолокациялық деректер сапасы индексінің (ДСИ) өзгеру динамикасы.
Figure 2. Dynamics of the radar data quality index (DQI) during the monitoring period.

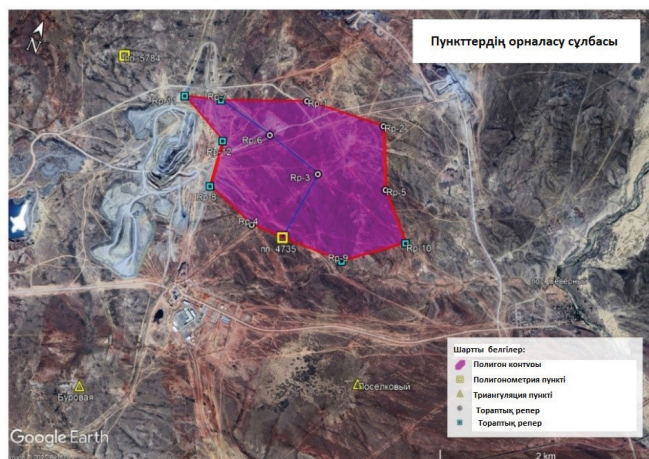
Рис. 2. Динамика изменения индекса качества радиолокационных данных (ДИК) в период мониторинга.

Бақылау кезеңінің бүкіл ұзақтығы бойында деректер сапасы индексінің мәндері 0,9-дан жоғары деңгейде сақталды, бұл интерферометриялық сигналдың жоғары тұрақтылығын және тіркелген деформациялық өлшеулердің сенімділігін көрсетеді. Интерферометриялық когеренттіліктің тұрақтылығы анықталған орын ығысуларды өлшеу артефактілері ретінде емес, нақты геомеханикалық үдерістердің көрінісі ретінде түсіндіруге мүмкіндік береді.

GNSS-бақылаулар статикалық қысқа базистік өлшеулер әдісімен жүргізілді. Деформациялық мониторинг нәтижелерінің кеңістіктік байланысын және әртүрлі бақылау әдістерінен алынған деректердің салыстырмалылығын қамтамасыз ету мақсатында зерттелетін учаскеде әлеуетті техногендік әсер аймағы шегінде орналастырылған GNSS пункттері мен түйіндік реперлерді қамтитын жергілікті бақылау желісі құрылды. Желінің конфигурациясы зерттелетін карьер бортының кеңістіктік қамтылуын қамтамасыз етіп, жергілікті деформациялық көріністерді де, олардың кеңістіктік-уақыттық өзгергіштігін де тіркеуге мүмкіндік берді. Бақылау пункттерін орналастыру карьердің геометриясын, кемерлердің орналасуын және деформациялық үдерістердің болжамды даму бағыттарын ескере отырып жүзеге асырылды.

GNSS-мониторингтің негізгі міндеті зерттелетін учаске шегінде кеңістіктік таралған беткі деформациялардың бар-жоғын анықтау болды.

Анықталған деформациялық үдерістерді интерпретациялау үшін RS3 бағдарламалық кешенінде карьердің геометриясын, жер бедерінің цифрлық моделін, массивтің құрылымдық ерекшеліктерін, жарықшақтылық аймақтарын және гравитациялық жүктемені қамтитын тау жыныстары массивінің үшөлшемді соңғы элементтік моделі әзірленді [9]. Бастапқы кезеңде модельге бұзылмаған тау жыныстарының зертханалық сипаттамалары енгізілді, алайда есептеу нәтижелері деформациялардың іс жүзінде толық дерлік жоқтығын көрсетті, бұл радиолокациялық мониторинг



Сурет 3. Зерттелетін учаске шегіндегі ГНСЖ пункттері мен бақылау желісінің орналасу сұлбасы.
Figure 3. Layout of GNSS Stations and the monitoring network within the study area.

Рис. 3. Схема расположения ГНСС пунктов и сети наблюдений в пределах исследуемого участка.

деректеріне сәйкес келмеді. Осыған байланысты модельге кері талдау әдісі арқылы параметрлік калибрлеу жүргізілді, оның барысында геомеханикалық параметрлерді түзету деформациялық аномалияның локализациясын, ығысулардың таралу сипатын және пластикалық аймақтардың конфигурациясын ескере отырып жүзеге асырылды [10].

Модельдеудің негізгі міндеті локализацияланған деформациялық аймақтың қалыптасу механизмін анықтау болды.

Зерттеу нәтижелері

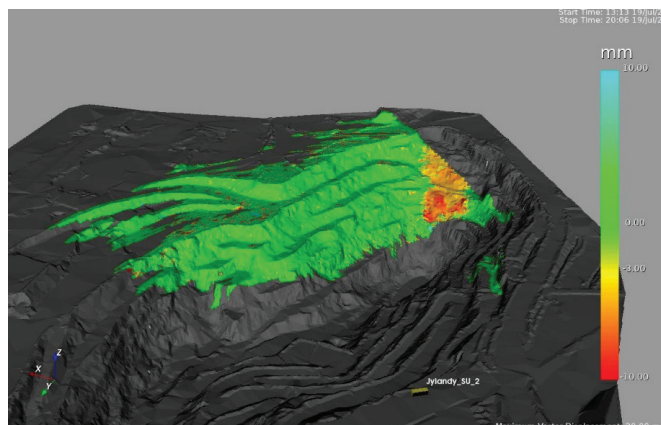
Радиолокациялық мониторинг нәтижелері карьердің оңтүстік бортының төменгі бөлігінде локализацияланған деформациялық аймақтың бар екенін көрсетті.

Ығысулардың кеңістіктік таралуы карьер бортының төменгі бөлігінде деформациялық белсенділіктің айқын локализациясын көрсетеді, бұл массивтің терең әлсіреуінің ықтимал аймағының қалыптасуын білдіреді [11].

Анықталған деформациялық аймақ LOS- ығысулардың тұрақты артуымен, деформациялардың кеңістіктік градиенттерінің шоғырлануымен, ығысулардың таралуының жергілікті сипатымен және радиолокациялық сигналдың жоғары тұрақтылығымен сипатталды. Зерттелетін борттың қалған бөлігі айқын жергілікті белсенділену белгілерінсіз салыстырмалы түрде тұрақты фондық деформациялық режиммен сипатталды.

Ерекше маңыздысы, анықталған жергілікті аномалия GNSS-бақылаулар деректері бойынша айқын беткі шөгулермен қатар жүрмеді. Осылайша, еңістің жергілікті деформациялық белсенділігі ауқымды беткі тұрақсыздықтың айқын белгілері болмаған жағдайда байқалды.

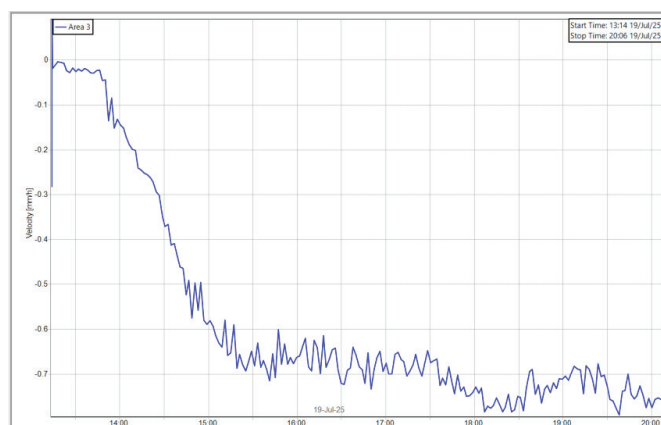
Ығысулардың уақыттық қатарын талдау кездейсоқ шу сипатындағы тербелістер белгілерінсіз локализацияланған деформациялық үдерістің тұрақты дамуын көрсетті. LOS-ығысулардың біртіндеп жинақталуы карьердің оңтүстік борты шегінде деформациялық белсенділіктің тұрақты кинематикалық аймағының қалыптасуын көрсете-



Сурет 4. Карьердің оңтүстік борты шегіндегі GB-SAR деректері бойынша LOS-ығысулардың кеңістіктік таралуы.

Figure 4. Spatial distribution of LOS displacements derived from GB-SAR data within the southern slope of the open-pit mine.

Рис. 4. Пространственное распределение LOS-смещений по данным GB-SAR в пределах южного борта карьера.



Сурет 5. GB-SAR деректері бойынша Area 3 жергілікті деформациялық аймағы үшін ығысу жылдамдықтарының уақыттық қатары.

Figure 5. Time series of displacement velocities for the Area 3 local deformation zone based on GB-SAR data.

Рис. 5. Временной ряд скоростей смещений для локальной деформационной зоны Area 3 по данным GB-SAR.

ді. Алынған нәтижелерді интерпретациялау бақылған жергілікті деформациялық белсенділікті тұрақсыздықтың бастапқы даму кезеңіндегі массивтің квазистационарлық кернеулік-деформациялық күйінің көрінісі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

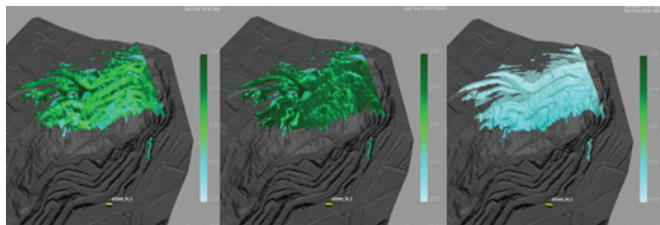
Геомеханикалық модельді калибрлегеннен кейін массивте радиолокациялық аномалия аймағымен кеңістіктік байланысқан айқын терең пластикалық деформациялар аймағы анықталды.

Пластикалық үдерістердің ең қарқынды дамуы GB-SAR арқылы тіркелген локализацияланған ығысулар

участкесінен төмен орналасқан аймақта байқалды, бұл беткі деформациялық белсенділіктің массив ішіндегі кернеулердің терең қайта бөлінуімен байланысты екенін көрсетеді.

Модельдеу сондай-ақ бақылау кезеңінде әлі карьер бортының айқын тұрақсыздығы түрінде байқалмаған ықтимал сырғу бетінің біртіндеп қалыптасуын көрсетті.

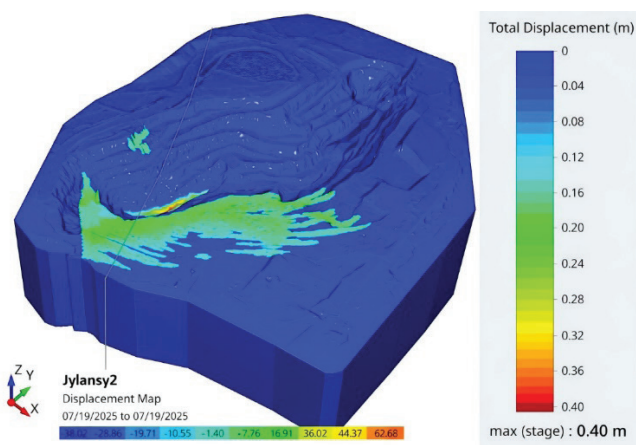
Анықталған деформациялық аномалияның сенімділігін қосымша бағалау мақсатында радиолокациялық жүйенің ығысу векторының әртүрлі компоненттеріне сезімталдығына кеңістіктік талдау жүргізілді.



Сурет 6. Ығысу векторының әртүрлі модельдері үшін IBIS ArcSAR жүйесінің сезімталдық карталары.

Figure 6. Sensitivity maps of the IBIS ArcSAR system for different displacement vector models.

Рис. 6. Карты чувствительности системы IBIS ArcSAR для различных моделей вектора смещения.



Сурет 7. GB-SAR бойынша анықталған жергілікті деформациялық аномалия мен массивтің 3D FEM-модельдеу нәтижелерінің кеңістіктік сәйкестігі.

Figure 7. Spatial correlation between the local deformation anomaly detected by GB-SAR and the results of 3D FEM modeling of the rock mass.

Рис. 7. Пространственное сопоставление локальной деформационной аномалии GB-SAR и результатов 3D FEM-моделирования массива.

Осы кезеңнің негізгі ерекшелігі еңістегі жергілікті деформациялардың қатар байқалуы, массив ішінде терең пластикалық аймақтың дамуы және айқын өңірлік беткі деформациялардың болмауы болып табылады, бұл тұрақсыздықтың қалыптасуының бастапқы кезеңінің жасырын сипатын көрсетеді. Зерттелген жағдайда GB-SAR әдісімен тіркелген жергілікті деформациялық белсенділік өңірлік беткі шөгудің дамуына дейін байқалды, бұл олардың кейіннен жер бетінде көрініс табуымен салыстырғанда массив ішіндегі кернеулердің қайта бөлінуі мен пластикалық аймақтардың қалыптасу үдерістерінің ертерек дамытынын көрсетеді [12].

Алынған деректер GB-SAR әдісінің ерте кезеңдегі жергілікті деформацияларға жоғары сезімталдығын растайды және жергілікті радиолокациялық аномалияларды массивтің жасырын терең әлсіреуінің ақпараттық белгісі ретінде қарастыруға болатынын көрсетеді. Бұл ретте жергілікті ығысуларды анықтау ғана емес, сондай-ақ бақыланатын деформациялар мен терең пластикалық аймақтың дамуы арасындағы байланысты анықтауға мүмкіндік беретін FEM-модельдеу негізіндегі олардың геомеханикалық интерпретациясы да принциптік тұрғыдан маңызды болып табылады. GB-SAR мониторингі мен сандық модельдеуді интеграциялау еңістердің ықтимал тұрақсыздығын ерте диагностикалау мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

Қорытынды

Жұмыста GB-SAR мониторингі, GNSS-бақылаулар және үшөлшемді геомеханикалық модельдеу деректерін бірлесіп талдау негізінде массивтің терең әлсіреуінің жасырын аймақтарын ерте анықтаудың интеграцияланған тәсілі ұсынылды.

GB-SAR әдісімен тіркелетін жергілікті деформациялық аномалиялар айқын өңірлік беткі деформациялар пайда болғанға дейін едәуір ерте туындауы мүмкін және тау жыныстары массиві ішінде терең пластикалық үдерістердің дамуын көрсететіні анықталды.

Зерттеу нәтижелері локализацияланған радиолокациялық деформациялық аномалия мен массивтегі кернеулердің қайта бөлінуінен туындаған жасырын пластикалық деформациялар аймағының қалыптасуы арасындағы кеңістіктік байланысты көрсетті. Жүргізілген зерттеу жергілікті радиолокациялық аномалияларды терең тұрақсыздықтың ерте индикаторы ретінде пайдалану мүмкіндігін растайды және әлеуетті қауіпті аймақтарды диагностикалау үшін GB-SAR мониторингі мен геомеханикалық модельдеуді интеграциялаудың тиімділігін көрсетеді.

Ұсынылған тәсіл тау-кен өндіру кәсіпорындарында геомеханикалық тәуекелдерді ерте ескерту жүйелерін құру кезінде қолданылуы мүмкін.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ірі ауқымды жер қойнауын игеру кезінде тау жыныстары массивінің жай-күйін кешенді мониторингтеу / О. Bazaluk [және т. б.] // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Т. 10. – 852591 (ағылшын тілінде)
2. Карьердің борт маңындағы бөлігіндегі тау жыныстары массивінің жай-күйін зерттеу және оның тұрақтылығын басқару / P. Saik [және т. б.] // *Frontiers in Earth Science*. – 2024. – Т. 12. – 1395418 (ағылшын тілінде)
3. Dossymbek D., Mortazavi A. Қазақстандағы Васильков ашық карьерінің солтүстік бортының тұрақтылығын талдау // *The Evolution of Geotech – 25 Years of Innovation* / ред. R. E. Hammah, T. E. Yacoub, J. Curran, A. McQuillan. – Boca Raton: CRC Press/Balkema, 2022. – Б. 282–288 (ағылшын тілінде)

4. Chen R., Xu J., Li X. Күрделі геологиялық жағдайлардағы терең карьер еңістерінің деформация механизмдерін сандық зерттеу // *Computers and Geotechnics*. – 2025. – Т. 176. – 106102 (ағылшын тілінде)
5. Sun W., Zhang P., Luo Y. Ашық карьерлердегі геотехникалық тәуекелдерді бағалауға арналған GNSS және LiDAR мониторингін біріктіру // *Sensors*. – 2024. – Т. 24. – № 6. – 2145 (ағылшын тілінде)
6. Xu Q., Dong X., Huang R. Спутниктік позициялау технологияларын біріктіру негізіндегі еңіс деформацияларын нақты уақыт режимінде геодезиялық мониторингтеу // *Measurement*. – 2025. – Т. 248. – 115982 (ағылшын тілінде)
7. Pieraccini M. Жерүсті радиолокациялық интерферометрия: библиографиялық шолу // *Remote Sensing*. – 2019. – Т. 11. – № 9. – 1029 (ағылшын тілінде)
8. GB-SAR деректері бойынша еңіс деформацияларын геокодтау және қолдану мәселелеріне шолу / H. Zhang [және т. б.] // *Measurement*. – 2025. – Т. 289. – 114016 (ағылшын тілінде)
9. Kainthola A., Verma D., Gupta S. Тау-кен қазбаларындағы еңістердің тұрақтылығын талдаудың сандық әдістеріне шолу // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2023. – Т. 16. – 455 (ағылшын тілінде)
10. Жыланды кен орындары тобын бірлесіп игеру кезіндегі кернеулі-деформацияланған күйді сандық модельдеу / G. Meirambek [және т. б.] // *ES Energy and Environment*. – 2025. – Т. 31. – 1909 (ағылшын тілінде)
11. Stead D., Eberhardt E. Сандық модельдеу әдістерін қолдану арқылы күрделі жыныс еңістерінің деформациясы мен бұзылуын сипаттаудың заманауи тәсілдері // *Engineering Geology*. – 2023. – Т. 317. – 107012 (ағылшын тілінде)
12. Ығысу аймағын анықтау үшін радиолокациялық бақылаулар негізінде тау жыныстары массивін кешенді геомеханикалық модельдеу / G. Meirambek [және т. б.] // *Engineered Science*. – 2026. – Т. 41. – 2227 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Integrated monitoring for the rock mass state during large-scale subsoil development / O. Bazaluk et al. // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Vol. 10. – Article 852591 (in English)
2. Investigation of the rock mass state in the near-wall part of the quarry and its stability management / P. Saik et al. // *Frontiers in Earth Science*. – 2024. – Vol. 12. – Article 1395418 (in English)
3. Dossymbek, D., Mortazavi, A. North wall stability analysis of Vasilkovskoye open pit Kazakhstan // In: Hammah, R.E., Yacoub, T.E., Curran, J., McQuillan, A. (Eds.). *The Evolution of Geotech – 25 Years of Innovation*. CRC Press/Balkema, 2022. – P. 282–288 (in English)
4. Chen R., Xu J., Li X. Numerical investigation of deformation mechanisms in deep open-pit slopes under complex geological conditions // *Computers and Geotechnics*. – 2025. – Vol. 176. – Article 106102 (in English)
5. Sun W., Zhang P., Luo Y. Integrated GNSS and LiDAR monitoring for geotechnical risk assessment in open-pit mines // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24. – No. 6. – Article 2145 (in English)
6. Xu Q., Dong X., Huang R. Real-time geodetic monitoring of slope deformation using integrated satellite positioning technologies // *Measurement*. – 2025. – Vol. 248. – Article 115982 (in English)
7. Pieraccini M. Ground-Based Radar Interferometry: A Bibliographic Review // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11. – No. 9. – Article 1029 (in English)
8. Research on GB-SAR slope deformation geocoding and application review / H. Zhang et al. // *Measurement*. – 2025. – Vol. 289. – Article 114016 (in English)
9. Kainthola A., Verma D., Gupta S. A review of numerical approaches for slope stability analysis in mining excavations // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2023. – Vol. 16. – Article 455 (in English)
10. Numerical Modelling of Stress-Strain State During Combined Mining of Zhilandy Group of Deposits / G. Meirambek et al. // *ES Energy and Environment*. – 2025. – Vol. 31. – Article 1909 (in English)
11. Stead D., Eberhardt E. Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modeling techniques // *Engineering Geology*. – 2023. – Vol. 317. – Article 107012 (in English)
12. Integrated geomechanical modeling of the rock mass based on radar observations for identifying the displacement zone / G. Meirambek et al. // *Engineered Science*. – 2026. – Vol. 41. – Article 2227 (in English)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Комплексный мониторинг состояния массива горных пород при крупномасштабном освоении недр / О. Bazaluk [и др.] // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Т. 10. – Ст. 852591 (на английском языке)
2. Исследование состояния массива горных пород в прибортовой части карьера и управление его устойчивостью / P. Saik [и др.] // *Frontiers in Earth Science*. – 2024. – Т. 12. – Ст. 1395418 (на английском языке)
3. Dossymbek D., Mortazavi A. Анализ устойчивости северного борта Васильковского карьера (Казахстан) // В кн.: *The Evolution of Geotech – 25 Years of Innovation* / под ред. R. E. Hammah, T. E. Yacoub, J. Curran, A. McQuillan. Boca Raton: CRC Press/Balkema, 2022. – С. 282–288 (на английском языке)
4. Chen R., Xu J., Li X. Численное исследование механизмов деформирования глубоких карьерных откосов в сложных геологических условиях // *Computers and Geotechnics*. – 2025. – Т. 176. – Ст. 106102 (на английском языке)
5. Sun W., Zhang P., Luo Y. Интегрированный мониторинг GNSS и LiDAR для оценки геотехнических рисков на открытых горных работах // *Sensors*. – 2024. – Т. 24. – № 6. – Ст. 2145 (на английском языке)
6. Xu Q., Dong X., Huang R. Геодезический мониторинг деформаций откосов в режиме реального времени с использованием интегрированных спутниковых технологий позиционирования // *Measurement*. – 2025. – Т. 248. – Ст. 115982 (на английском языке)
7. Pieraccini M. Наземная радиолокационная интерферометрия: библиографический обзор // *Remote Sensing*. – 2019. – Т. 11. – № 9. – Ст. 1029 (на английском языке)
8. Обзор методов геокодирования деформаций откосов и практического применения GB-SAR / H. Zhang [и др.] // *Measurement*. – 2025. – Т. 289. – Ст. 114016 (на английском языке)
9. Kainthola A., Verma D., Gupta S. Обзор численных подходов к анализу устойчивости откосов в горных выработках // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2023. – Т. 16. – Ст. 455 (на английском языке)
10. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния при комбинированной разработке месторождений Жиландинской группы / G. Meirambek [и др.] // *ES Energy and Environment*. – 2025. – Т. 31. – Ст. 1909 (на английском языке)

11. Stead D., Eberhardt E. Развитие методов характеристики сложных деформаций и разрушений скальных откосов с использованием численного моделирования // *Engineering Geology*. – 2023. – Т. 317. – Ст. 107012 (на английском языке)
12. Интегрированное геомеханическое моделирование массива горных пород на основе радиолокационных наблюдений для выявления зоны смещений / G. Meirambek [и др.] // *Engineered Science*. – 2026. – Т. 41. – Ст. 2227 (на английском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Мейрамбек Г., т. г. к., профессор, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан), g.meirambek@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-8869-5497>

Карел Вах, Фотограмметриялық білім беру және құрылыс институтының бас директоры (Прага қ., Чехия), vach@eurogv.cz; <https://orcid.org/0009-0001-7575-9105>

Адилбекова Л. Қ., докторант, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан), l.adilbekova@satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0008-8308-0793>

Нуржусупова А. Н., докторант, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Алматы қ., Қазақстан), nurzhussupovaalima@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-1712-3837>

Information about the authors:

Meirambek G., Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Mine Surveying and Geodesy, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University (Almaty, Kazakhstan)

Karel Vach, Chief Executive Officer of the Institute of Photogrammetric Education and Construction (Prague, Czech Republic)

Adilbekova L. K., Ph.D student, Department of Mine Surveying and Geodesy, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University (Almaty, Kazakhstan)

Nurzhussupova A. N., Ph.D student, Department of Mine Surveying and Geodesy, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University (Almaty, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Мейрамбек Г., к. т. н., профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)

Карел Вах, генеральный директор, «Институт фотограмметрического образования и строительства» (г. Прага, Чехия)

Адилбекова Л. Қ., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)

Нуржусупова А. Н., докторант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)

2026

30 сентябрь –
2 октября

Казахстан, Алматы



KIOGE
OIL&GAS KAZAKHSTAN

30 YEARS
OF
SUCCESS



Подробная информация:
www.kioge.kz



[oilgas.events.kz](https://www.instagram.com/oilgas.events.kz)

[oilgas.events.kz](https://www.facebook.com/oilgas.events.kz)



Код МРНТИ 52.13.25

С. Н. Шапошник¹, *Ж. М. Асанова², А. Н. Есендосова², Н. Б. Керімбаева²¹ТОО «Expert Pro» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан),²НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ НАРУШЕННОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ИРТЫШСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты комплексной геомеханической оценки массива горных пород Иртышского месторождения, направленной на обоснование безопасной и эффективной разработки рудных залежей. Исследованы физико-механические свойства пород и руд, выполнен анализ структурной нарушенности массива по данным натурных обследований с использованием метода линейных замеров (Scanline Mapping) и программного комплекса Dips. Выделены основные системы трещин, определены показатели качества массива (RQD), выполнено геомеханическое районирование с выделением трех участков и литологических доменов. Установлены закономерности изменения устойчивости массива в зависимости от литологического состава и степени трещиноватости. Полученные результаты могут быть использованы при геомеханическом моделировании, прогнозировании устойчивости горных выработок и выборе рациональных параметров крепления.

Ключевые слова: Иртышское месторождение, геомеханическая оценка, массив горных пород, трещиноватость, RQD, устойчивость горных выработок.

Ертіс кен орны тау жыныстары массивінің геомеханикалық сипаттамасы және құрылымдық бұзылуын бағалау. Аңдатпа. Мақалада Ертіс кен орнының тау жыныстары массивіне жүргізілген кешенді геомеханикалық бағалау нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің мақсаты – кен денелерін қауіпсіз әрі тиімді игеруді ғылыми тұрғыдан негіздеу. Тау жыныстары мен кендердің физикалық-механикалық қасиеттері зерттеліп, табиғи бақылаулар барысында қолданылған Scanline Mapping сызықтық өлшеу әдісі мен Dips бағдарламалық кешені негізінде массивтің құрылымдық бұзылуы талданды. Нәтижесінде негізгі жарықшақ жүйелері анықталып, массив сапасының көрсеткіштері (RQD) есептелді, үш геомеханикалық аудан және литологиялық домендер бөлінді. Массивтің тұрақтылығының литологиялық құрам мен жарықшақтану дәрежесіне тәуелді өзгеру заңдылықтары айқындалды. Алынған нәтижелер геомеханикалық модельдеу, тау-кен қазбаларының орнықтылығын болжау және бекіту параметрлерін оңтайлы тандауда қолданылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: Ертіс кен орны, геомеханикалық бағалау, тау жыныстары массиві, жарықшақтылық, RQD, тау-кен қазбаларының орнықтылығы.

Geomechanical characterization and assessment of the structural disturbance of the rock mass at the Irtysh deposit

Abstract. The article presents the results of a comprehensive geomechanical assessment of the rock mass at the Irtysh deposit aimed at substantiating the safe and efficient mining of ore bodies. The physical and mechanical properties of rocks and ores were investigated, and the structural disturbance of the rock mass was analyzed based on field observations using the Scanline Mapping method and the Dips software package. The main joint sets were identified, the Rock Quality Designation (RQD) was determined, and geomechanical zoning was performed with the delineation of three zones and lithological domains. The relationships between rock mass stability, lithological composition, and fracture intensity were established. The obtained results can be applied in geomechanical modeling, stability prediction of underground excavations, and the selection of optimal ground support parameters.

Key words: Irtysh deposit, geomechanical assessment, rock mass, fracturing, Rock Quality Designation (RQD), underground excavation stability.

Введение

В работах, выполненных институтом ВНИИцветмет, была установлена крепость скальных пород Иртышского месторождения и разработана классификация горных пород полиметаллических месторождений Рудного Алтая по физико-механическим свойствам, в частности составлена классификация по физико-механическим свойствам горных пород Иртышского месторождения [1, 2].

В геологическом строении месторождения принимают участие рыхлые осадочные отложения четвертичного и неогенового возраста и скальные палеозойские образования [3]. Палеозойские образования представлены алевролитами, песчаниками, кварц-серицитовыми, углистыми и хлоритовыми сланцами, диабазами, диабазовыми порфиритами, кварцитами, кварцевыми порфирами.

Зоны интенсивного расланцевания и трещиноватости являются на месторождении наиболее ослабленными. При вскрытии горными выработками рудной зоны в пределах одного блока отмечаются вывалы до 2580 м³.

В результате отработки рудных тел на месторождении развивается зона сдвижения пород. Для охраны инженерных сооружений оставляются предохранительные целики.

Рудовмещающие породы представлены серицит-кварцевыми сланцами в лежачем боку и углисто-серицит-кварцевыми сланцами и порфиритами в висячем боку. В висячем боку месторождения широко развиты интрузивные образования, представленные диоритовыми порфиритами, кварцевыми альбтофирами и порфирами [4].

Результаты лабораторных исследований приведены в таблице 1.

Анализ акустических диаграмм процесса разрушения показал, что у отдельных разновидностей горных пород, таких как порфириты, порфирииды и сплошные полиметаллические руды, первые импульсы (начало трещинообразования) возникают при нагрузках 60–70% от предельных, что свидетельствует об их способности к накоплению упругой энергии. Перечисленные породы и руды одновременно являются и потенциально удароопасными. Это подтверждается и характером спадающих участков кривых разрушения в запредельной области, что свидетельствует об их склонности к хрупкому разрушению. Проведенные исследования позволили определить ориентировочные величины коэффициента концентрации напряжений для условий Иртышского рудника, что положено в основу прогнозной оценки уровня глубины возможных проявлений горных ударов [5–7].

По мнению Макарова А. Б., теоретически аналогичному разрушению должна подвергаться и почва штреков. Разница с кровлей состоит только в том, что руда, раздавленная горизонтальными напряжениями в почве, не может никуда вывалиться и остается в разрушенном состоянии в почве штрека. За счет разрушения может наблюдаться пучение почвы. Однако это явление трудно заметить, так как почва штреков постоянно зачищается. В настоящее время пучение почвы отмечено на 13 горизонте в сечениях 1351–1363 (рис. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства горных пород и руд Иртышского месторождения

Кесте 1

Ертіс кен орны тау жыныстары мен кендерінің физика-механикалық қасиеттері

Table 1

Physical and mechanical properties of rocks and ores of the Irtysh deposit

Название руд и пород	Модуль упругости E , $\times 10^4$ МПа	Коэффициент Пуассона μ	Плотность, $\times 10^3$ кг/м ³	Прочность на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Прочность на растяжение σ_r , МПа	Угол внутреннего трения φ , °	Сцепление C , МПа
Кварциты (минерализованные, трещиноватые, микрокварциты)	8,0–8,1	0,23	2,58–2,73	62–237	8–29	13–41	20–51
Порфиroidы	2,8–7,6	0,03–0,28	2,57–2,74	26–134	6–19	16–40	14–31
Порфириты	6,9–8,1	0,17–0,27	2,61–2,91	48–220	6–22	8–40	12–42
Сланцы	5,6–9,0	0,03–0,40	2,54–3,29	12–133	6–21	24–33	10–32
Алевrolиты	7,07	0,28	2,61	78	13	–	–
Песчаники	–	–	2,89–2,96	98–108	11–14	–	–
Руда прожилково-вкрапленная	–	–	2,73–4,20	51–182	7–11	–	–
Руда сплошная	7,3–9,1	0,28	3,73–4,17	100–114	8–14	25–38	21–29
Руда вкрапленная	12,07	0,20	4,16	153	12	36	23



Рис. 1. Пучение почвы на 13 горизонте в северо-западном полевом штреке в сечениях 1351–1363.

Сурет 1. Солтүстік-батыс далалық штрегінің 13-горизонтындағы 1351–1363 қималарындағы табанның көтерілуі.

Figure 1. Floor heave at the 13th level of the northwestern field drift in cross-sections 1351–1363.

По данным ИГД им. Д. А. Кунаева, вмещающие породы месторождения в основном рассланцованы, что обуславливает анизотропию прочностных свойств: прочность метасоматитов на сжатие поперек сланцеватости в 1,7–2,1 раза больше, чем вдоль сланцеватости, а прочность на растяжение поперек сланцеватости в 1,6–2,0 раза меньше, чем вдоль сланцеватости.

Поэтому устойчивость выработок, ориентированных по простиранию и вкрест простирания, резко различа-

ется. Штреки, пройденные по простиранию рудного тела, разрушаются в бортах вдоль сланцеватости или в зонах интенсивной трещиноватости. Разрушения, как правило, проявляются в виде отслоений с бортов штреков, и только после увеличения пролета выработки происходит вывал из кровли опять же по крутопадающим поверхностям ослабления (сланцеватости и трещинам). Во всех случаях кровля штреков сводчатого сечения после разрушения и вывала приобретала характерную шатровую форму с подъемом шатра над сводом на 0,7–1,5 м. Ширина вывала по кровле от 0,7 м до 2,0 м; длина – до 5 м. При этом, орты и квершлагги, пройденные вкрест простирания залежей (и вкрест простирания крутопадающей сланцеватости), сохраняют свою устойчивость даже без крепления [8].

Методология

Для оценки устойчивости существующей горнотехнической обстановки на Иртышском месторождении в настоящей НИР используется НДС массива пород, полученное при упругом (основная часть расчетов) и упругопластическом решениях (обоснование систем разработки).

В качестве оценочных критериев прочности пород принимаются теории наибольших нормальных напряжений, Кулона – Мора и Друкера – Прагера.

1. Теория максимальных нормальных напряжений (первая теория прочности) основана на сопоставлении последних с прочностью пород на сжатие и растяжение с учетом нарушенности массива:

$$\sigma_1 \leq K_c \sigma_{сжс} \quad (1)$$

$$|\sigma_3| \leq K_c \sigma_p \quad (2)$$

где σ_1 и σ_3 – соответственно максимальные сжимающие и минимальные растягивающие главные напряжения, действующих в массиве (получены из упругого решения), МПа;

K_c – коэффициент структурного ослабления, д. ед.;

$\sigma_{сжс}$ – предел прочности породы на сжатие, МПа;

σ_p – предел прочности породы на растяжение, МПа.

Данная теория не отражает условия перехода породы в пластическое состояние и имеет практическое применение лишь для весьма хрупких материалов (скальная высоко модульная порода, камень, кирпич, бетон и др.) и, как правило, только при их растяжении в случаях, когда все три главных напряжения не равны по величине.

Для определения сохранности пород принимаются значения пределов прочности по наиболее опасным растягивающим напряжениям. При этом коэффициент запаса устойчивости ($K_{\sigma_3} \rightarrow$) определяется как отношение прочности пород по растягивающей компоненте с учетом структурного ослабления к возникающему растягивающему усилию в массиве: $K_{\sigma_3} \rightarrow = \frac{K_c \sigma_p}{|\sigma_3|} \rightarrow > 1$. Необходимо отметить, что в реальных условиях массив характеризуется нарушением и трещинами. Анализ результатов выполненных исследований свидетельствует о значительной изменчивости трещиноватости и расщелачиванности горных пород месторождения (особенностью Иртышского месторождения является залегание рудных залежей в зоне крупного разлома, которая характеризуется повышенным расщелачиванием пород). Поэтому технологические риски в расчетах показателя устойчивости учитывались через коэффициент структурного ослабления массива пород, ориентировочные значения которого приведены в таблице 2.

Таблица 2

Ориентировочные значения коэффициента структурного ослабления

Кесте 2

Құрылымдық әлсіреу коэффициентінің болжамды мәндері

Table 2

Approximate values of the structural weakening coefficient

Породы	Слаботрещиноватые	Среднетрещиноватые	Сильнотрещиноватые
K_c	> 0,45	0,3–0,45	0,15–0,3

2. Критерий Кулона – Мора состоит в предположении, что разрушение происходит тогда, когда действующее касательное напряжение становится равным пределу прочности породы на срез:

$$\tau = C + \sigma \times \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

где τ – предел прочности породы по касательным напряжениям, МПа;

C – сцепление, МПа;

σ – нормальное напряжение, действующее на площадке разрушения, МПа;

φ – угол внутреннего трения, град.

В общем понимании теория Кулона – Мора позволяет установить сопротивление разрушению пород, обладающих разной прочностью на растяжение и сжатие (хрупких материалов), и имеет существенное преимущество перед теорией наибольших нормальных напряжений.

Выражение (3) в таком виде практически не используется для нахождения коэффициента запаса устойчивости. В этом случае, для расчетов применяют функцию прочности, выраженную из этого уравнения (то есть уравнения прямой огибающей предельные круги напряжений Мора): [9]

$$2C \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi \geq (\sigma_1 - \sigma_3). \quad (4)$$

Отсюда, коэффициент запаса устойчивости массива будет равен:

$$K_y = \frac{2C \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi}{(\sigma_1 - \sigma_3)}. \quad (5)$$

Значения $K_y < 1$ характеризуют области запредельного деформирования пород.

3. Критерий Друкера – Прагера предполагает возможную потерю устойчивости пород за счет возникновения пластических деформаций, которые по существу являются разрушающими. Данный критерий был применен при геомеханическом обосновании систем разработок на Иртышском месторождении [10].

Результаты и обсуждения

Создание геомеханической модели массива (Data collection) по международным стандартам International Society for Rock Mechanics (ISRM) предусматривает:

- сбор данных о деформационных и прочностных свойствах пород и руд; выделение геомеханических доменов, объединяющих породы и руды с близкими свойствами;

- изучение трещиноватости массива в разных его частях (районах, участках, залежах, рудных зонах, горизонтах) и его нарушениями тектоническими разломами с выделением основных систем трещин (Joint Set), определением доминирующих углов и азимутов падения (Dip & Dip Direction), с определением интенсивности трещиноватости (Fracture Frequency), расстояний между трещинами (Spacing), длин трещин (Trace Length).

Практически все штреки на месторождении оказываются соосными с простиранием основных поверхностей ослабления массива (крутопадающей сланцеватостью). По мнению Макарова А. Б., при обнажении на контурах штреков вмещающие сланцеватые породы разделяются на тонкие плитки по сланцеватости, что обуславливает их слабую устойчивость вблизи рудных тел или в зонах интенсивной трещиноватости. Поэтому первые разрушения, как правило, проявляются в виде отслоений с бортов штреков, и только после увеличения пролета выработки происходит вывал из кровли опять же по крутопадающим поверхностям ослабления (сланцеватости и трещинам).

На основании выявленных качественных характеристик горных пород Rock Quality Designation (**RQD**) по наблюдениям в подземных выработках Иртышское месторождение в этажах 11–15 горизонты разбито на три участка.

Съемка трещиноватости массива в горных выработках Иртышского рудника выполнена линейным методом массовых замеров (Scanline Mapping). Инструментально (горным компасом) измерялись угол и азимут падения трещин (Dip & Dip Direction). Обработка результатов съемки проводилась с помощью программы Dips компании Roc Science (Canada).

Сводная полярная диаграмма трещиноватости массива участков отстроена по данным 75 замеров (рис. 2–5).

Ориентация систем трещин Иртышского рудника приведена в таблице 3.

Таблица 3

Ориентация систем трещин Иртышского рудника

Кесте 3

Ертіс кенішіндегі жарықшақтар жүйелерінің
кеңістіктік бағдарлануы

Table 3

Orientation of joint sets at the Irtysh mine

Уча- сток	№ системы	Угол падения, град.			Азимут падения, град.		
		от	до	средний	от	до	средний
1-й	1	30	60	45	205	230	215
	2	25	55	43	25	40	29
	3	75	85	80	115	155	134
2-й	1	25	55	42	215	235	222
	2	15	45	35	40	80	62
	3	80	90	85	315	335	325
3-й	1	20	50	39	235	260	247
	2	45	60	53	10	20	14

Сводная полярная диаграмма трещиноватости массива приведена на рис. 2–4.

Общая схема систем трещин для Иртышского месторождения приведена на рис. 5.

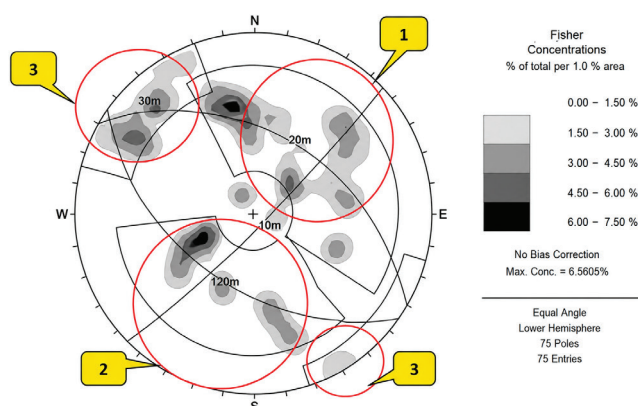


Рис. 2. Для 1-го участка.
Сурет 2. 1-ші учаске үшін.
Figure 2. For the 1st section.

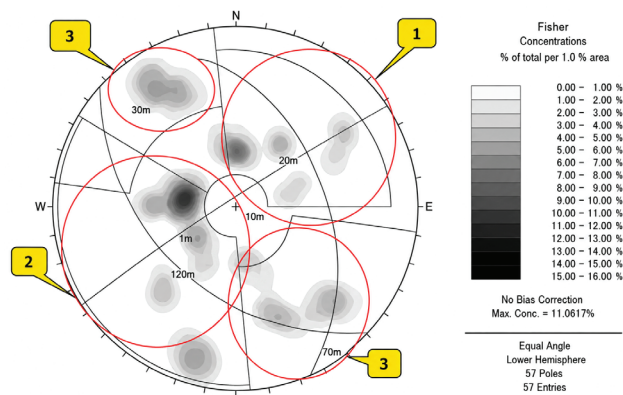


Рис. 3. Для 2-го участка.
Сурет 3. 2-ші учаске үшін.
Figure 3. For the 2nd section.

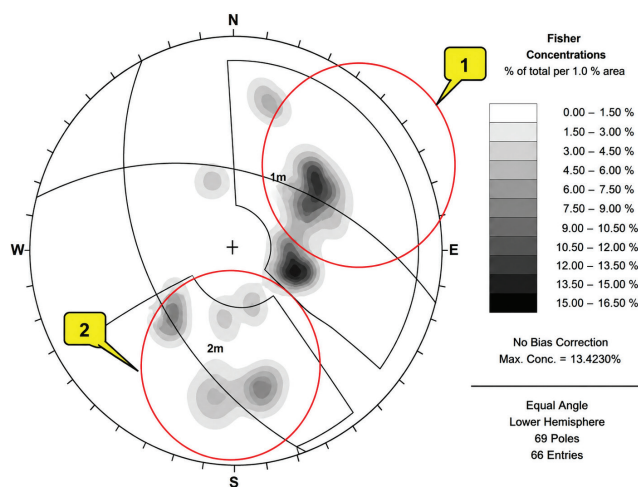


Рис. 4. Для 3-го участка.
Сурет 4. 3-ші учаске үшін.
Figure 4. For the 3rd section.

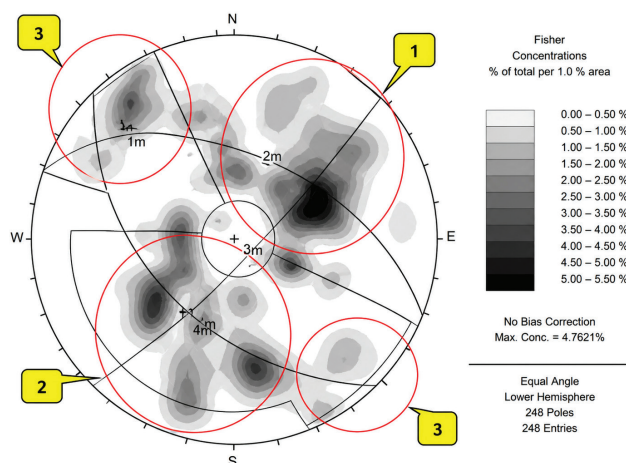


Рис. 5. Сводная диаграмма трещиноватости массива
Иртышского месторождения.
Сурет 5. Ертіс кен орны массивінің
жарықшақтануының жиынтық диаграммасы.
Figure 5. Generalized fracture diagram of the Irtysh
deposit rock mass.

Сводные элементы залегания выявленных систем трещин для Иртышского месторождения ЮВЗ и Основной залежи в этаже 11–15 горизонтов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Ориентация систем трещин Иртышского месторождения ЮВЗ и Основной залежи в этаже 11–15 горизонтов

Кесте 4

Ертіс кен орнының Оңтүстік-Шығыс кен аймағы (ОШКА) мен Негізгі кен денесінің 11–15 горизонттарындағы жарықшақтар жүйелерінің кеңістіктік бағдарлануы

Table 4

Orientation of Joint Sets in the Southeastern Ore Zone (SEOZ) and the Main Ore Body of the Irtysh deposit at levels 11–15

Угол падения, град.			Азимут падения, град.		
от	до	средний	от	до	средний
40	55	46	215	230	223
35	50	43	10	30	20
70	85	78	130	140	135

В результате обследования горных выработок и определения характеристик нарушенности массивов по рейтинговой системе RQD (Rock Quality Designation) массив Иртышского месторождения ЮВЗ и Основной залежи в этаже 11–15 горизонтов выделено три участка.

1-й участок. Рудное тело относится к Основной залежи, имеет сложную морфологию. Мощность варьирует от 6–8 до 10 м. Руды вкрапленные, прожилково-вкрапленные, сплошные полиметаллического состава. Породы лежащего бока представлены в основном, окварцованными серицито-кварцевыми сланцами, трещиноватые. Породы висячего бока представлены в основном, интенсивно окварцованными сланцами, незначительно хлоритизированные, неравномерно окварцованные. Вмещающие породы на контакте и приконтактной зоне с рудным телом ослаблены. Характеристика массива выделенного 1-го участка приведена рис. 6.

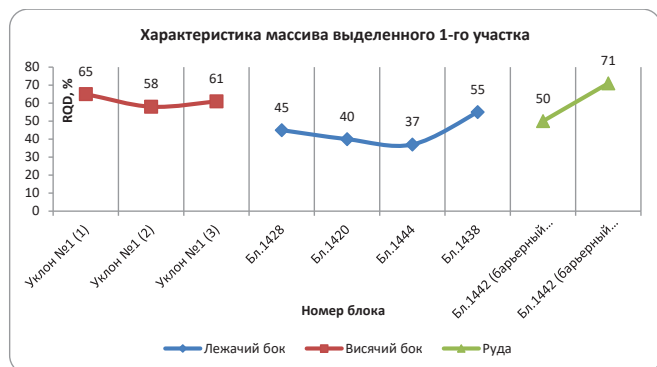


Рис. 6. Характеристика массива выделенного 1-го участка.

Сурет 6. 1-учаскеде бөлінген тау жыныстары массивінің сипаттамасы.

Figure 6. Characteristics of the rock mass in area 1.

2-й участок. Рудное тело относится к ЮВЗ, имеет лентовидную форму и крутое падение. Руды сплошные и вкрапленные полиметаллического состава. Породы лежащего бока представлены в основном, окварцованными серицито-кварцевыми сланцами с сульфидной минерализацией. Породы висячего бока представлены в основном грубо рассланцованными порфиритами, с коэффициентом крепости $f = 5-10$, а также встречаются углисто-серицито-кварцевые сланцы с коэффициентом крепости $f = 5-9$. Вмещающие породы на контакте и приконтактной зоне с рудным телом ослаблены. По сланцеватости разделяются на плитки, что означает слабую устойчивость вблизи рудных тел. При наличии тектонических трещин и зон нарушений возможны отслоение и вывал горной массы. Характеристика массива выделенного 2-го участка приведена на рис. 7.

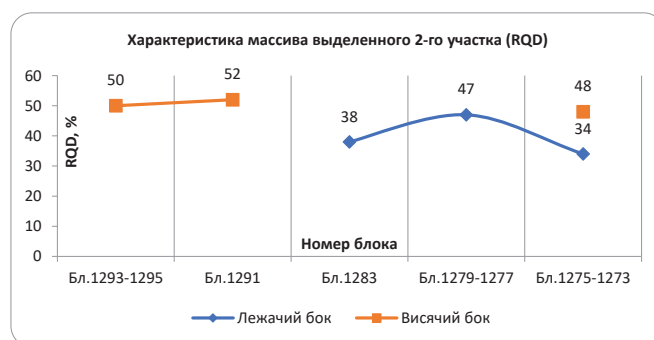


Рис. 7. Характеристика массива выделенного 2-го участка.

Сурет 7. 2-учаскеде бөлінген тау жыныстары массивінің сипаттамасы.

Figure 7. Characteristics of the rock mass in area 2.

3-й участок. Рудное тело относится к ЮВЗ, имеет лентовидную форму и крутое падение. Руды сплошные и вкрапленные полиметаллического состава. Породы лежащего бока представлены в основном, окварцованными серицито-кварцевыми сланцами с сульфидной минерализацией. Породы висячего бока представлены в основном, грубо рассланцованными порфиритами, а также встречаются углисто-серицито-кварцевые сланцы. Вмещающие породы на контакте и приконтактной зоне с рудным телом ослаблены. По сланцеватости разделяются на плитки, что означает слабую устойчивость вблизи рудных тел. Характеристика массива выделенного 3-го участка приведена на рис. 8.

Показатель качества массива горных пород по керну разведочной скважины 240 на разрезе 1430 на уровне -345 м ÷ -360 м (в районе ЛСП +100 м) составил $RQD = 46,6$. Таким образом, породы в районе разреза VIII можно также отнести к среднеустойчивым. Показатель качества массива горных пород по керну разведочной скважины 242 на разрезе 1430 на уровне -345 м ÷ -360 м (в районе ЛСП +150 м) составил $RQD = 66,1$, что свидетельствует об устойчивых породах.

Итоговые значения показателя RQD, характеризующего структурную нарушенность массива горных пород Иртышского месторождения, свидетельствуют о различной

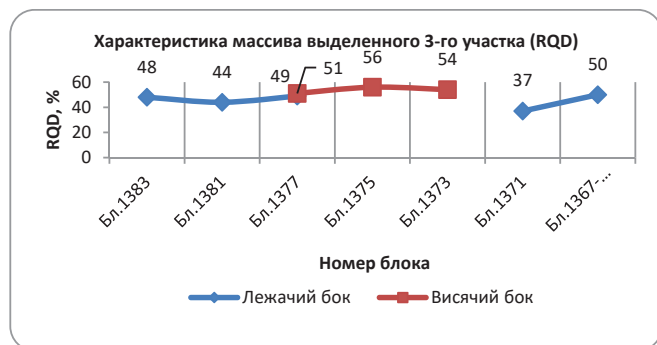


Рис. 8. Характеристика массива выделенного 3-го участка.

Сурет 8. 3-учаскеде бөлінген тау жыныстары массивінің сипаттамасы.

Figure 8. Characteristics of the rock mass in area 3.

степени сохранности основных литологических типов. Для массива пород 1-го литологического типа среднее значение RQD составило 43%, что соответствует массиву со средней степенью нарушенности. Для пород 2-го литологического типа среднее значение RQD достигло 55%, характеризуя массив как относительно устойчивый. Наиболее высокое значение показателя отмечено для рудных тел – 60,5%, что свидетельствует о лучшем качестве массива и более высокой устойчивости по сравнению с вмещающими породами.

Рейтинговые показатели массива горных пород RMR определяли путем натурных обследований горных выработок. Для трех литологических типов горных пород и руд, составляющих массив Иртышского месторождения (по выявленным трем участкам), значения RMR составили: сланцы с различными типами изменений – 48, порфириды – 57, руды – 64.

Таким образом, выявлено, что основная масса пород Иртышского месторождения обладает средней устойчивостью, руды относятся к категории устойчивых.

Для оценки качества массива горных пород Иртышского месторождения была использована система Q-класси-

фикации. Средние значения показателя RQD составили 43% для массива пород литологического типа 1, 55% – для литологического типа 2 и 60,5% – для рудного массива (барьерного целика). Для всех рассматриваемых литологических типов количество систем трещин J_n принято равным 9, показатель шероховатости трещин J_r – 3, показатель измененности поверхностей трещин J_a – 2, а показатель обводненности массива J_w – 0,66. Фактор учета соотношения прочности пород и действующих напряжений SRF для всех типов массива составил 2,5. В результате расчета интегрального показателя Q установлено, что его значение изменяется от 1,86 для литологического типа 1 до 2,42 для литологического типа 2 и достигает 2,65 для рудного массива (барьерного целика). Полученные значения свидетельствуют о более благоприятном геомеханическом состоянии рудного массива по сравнению с вмещающими породами и могут быть использованы при выборе параметров крепления и прогнозирования устойчивости подземных горных выработок.

Выводы

В результате исследований выполнена комплексная геомеханическая оценка массива горных пород Иртышского месторождения. Выделены 3 геомеханических участка, по результатам 198 натурных замеров (75, 57 и 66 измерений соответственно) установлены основные системы трещин и определены их пространственные параметры. По показателю RQD средние значения качества массива составили 43% для массива порфиридов, 55% для осадочных пород и 60,5% для рудных тел, что соответствует массивам средней и хорошей устойчивости. Установлено наличие трех основных систем трещин, при этом различие средних углов падения между участками не превышает 6° , а азимутов падения – 30° , что свидетельствует о едином характере структурной нарушенности массива. Полученные результаты являются исходной основой для геомеханического моделирования, прогноза устойчивости подземных выработок и обоснования рациональных параметров крепления при разработке Иртышского месторождения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технично-экономическое обоснование промышленных кондиций на колчеданно-полиметаллические руды Иртышского месторождения / ТОО КПК «Геолсервис». – Алматы, 2013 (на русском языке)
2. Оценка устойчивости массива горных пород и выбор типа и параметров крепления выработок на Орловском полиметаллическом месторождении / А. А. Жирнов [и др.] // Горный журнал. – 2018. – № 3. – С. 51–57 (на русском языке)
3. Проект промышленной разработки 14 горизонта Иртышского месторождения полиметаллических руд (вскрытие и отработка 14 горизонта Иртышского месторождения). – Белоусовка, 2010 (на русском языке)
4. Оценка и прогноз устойчивости бортов карьера «Кентобе» / О. Г. Бесимбаева [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 6. – С. 120–126 (на русском языке)
5. Прогнозирование деформаций уступов скального массива Куржункульского карьера с использованием кинематического анализа / Н. О. Бердинова [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 58–68 (на русском языке)
6. Разработка технологических решений по отработке прибортового массива и запасов карьера с учетом геомеханической оценки месторождения / Н. А. Нетова [и др.] // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2020. – № 2. – С. 17–23 (на английском языке)
7. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях (объектах строительства подземных сооружений), склонных к горным ударам. – Л.: ВНИМИ, 1989. – 58 с. (на русском языке)

8. Геомеханические процессы и их оценка в массивах горных пород Центрального Казахстана / Kh.-K. Kassymkanova, G. Jangulova, G. Issanova [и др.]. – Cham: Springer, 2020. – 94 с. (на английском языке)
9. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. Основы механики горных пород. – 4-е изд. – Oxford: Blackwell Publishing, 2007. – 475 с. (на английском языке)
10. Drucker D. C., Prager W. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // *Quarterly of Applied Mathematics*. – 1952. – Т. 10. – № 2. – С. 157–165 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ертіс кен орнының колчеданды-полиметалл кендеріне арналған өнеркәсіптік кондициялардың техникалық-экономикалық негіздемесі // «Геолсервис» КПК ЖШС. – Алматы, 2013 (орыс тілінде)
2. Орлов полиметалл кен орнындағы тау жыныстары массивінің орнықтылығын бағалау және қазбаларды бекітудің түрі мен параметрлерін таңдау / А. А. Журнов [және т. б.] // *Тау журналы*. – 2018. – № 3. – Б. 51–57 (орыс тілінде)
3. Ертіс полиметалл кен орнының 14-горизонтын өнеркәсіптік игеру жобасы (Ертіс кен орнының 14-горизонтын ашу және өндіру). – Белоусовка, 2010 (орыс тілінде)
4. «Кентөбе» карьері ернеулерінің орнықтылығын бағалау және болжау / О. Г. Бесимбаева [және т. б.] // *Пайдалы қазбаларды игерудің физика-техникалық мәселелері*. – 2018. – № 6. – Б. 120–126 (орыс тілінде)
5. Кинематикалық талдауды қолдану арқылы Құржынкөл карьерінің жартасты массиві кемерлерінің деформацияларын болжау / Н. О. Бердинова [және т. б.] // *Тау-кен ақпараттық-талдау бюллетені*. – 2020. – № 4. – Б. 58–68 (орыс тілінде)
6. Кен орнының геомеханикалық бағасын ескере отырып, карьердің ернеу маңындағы массиві мен қорларын игерудің технологиялық шешімдерін әзірлеу / Nemova N. A. [және т. б.] // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. – 2020. – № 2. – Б. 17–23 (ағылшын тілінде)
7. Тау соққыларына бейім және қауіпті кенді және кенсіз кен орындарында, жерасты құрылыстарын салу объектілерінде тау-кен жұмыстарын қауіпсіз жүргізу жөніндегі нұсқаулық: РД 06-329-99. – Мәскеу: Ресей Мемтаукентехқадағалауының Өнеркәсіптік қауіпсіздік жөніндегі ғылыми-техникалық орталығы, 2003 (орыс тілінде)
8. Геомеханические процесстер және оларды Орталық Қазақстанның тау жыныстары массивтерінде бағалау / Kh.-K. Kassymkanova, G. Jangulova, G. Issanova [және т. б.]. – Cham: Springer, 2020. – 94 б. (ағылшын тілінде)
9. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. Тау жыныстары механикасының негіздері. – 4-басылым. – Oxford: Blackwell Publishing, 2007. – 475 б. (ағылшын тілінде)
10. Drucker D. C., Prager W. Топырақ механикасы және шекті күйдегі пластикалық талдау // *Quarterly of Applied Mathematics*. – 1952. – Т. 10. – № 2. – Б. 157–165 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie promyshlennykh konditsii na kolchedanno-polimetallicheskie rudy Irtyskogo mestorozhdeniia [Feasibility Study of Industrial Cut-off Parameters for the Massive Sulfide Polymetallic Ores of the Irtysk Deposit] / GeolSERVICE LLP. – Almaty, 2013 (in Russian)
2. Rock mass stability assessment and selection of mine support type and parameters at the Orlovsky polymetallic deposit / A. A. Zhirnov et al. // *Gornyi Zhurnal [Mining Journal]*. – 2018. – No. 3. – P. 51–57 (in Russian)
3. Proekt promyshlennoi razrabotki 14 gorizonta Irtyskogo mestorozhdeniia polimetallicheskiy rud (vskrytie i otrabotka 14 gorizonta Irtyskogo mestorozhdeniia) [Industrial Mining Project for the 14th Level of the Irtysk Polymetallic Deposit (Development and Extraction of the 14th Level of the Irtysk Deposit)]. – Belousova, 2010 (in Russian)
4. Otsenka i prognoz ustoichivosti bortov kar'era «Kentobe» [Assessment and Prediction of Pit Wall Stability at the Kentobe Open Pit] O. G. Besimbayeva *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh [Physico-technical problems of mining]*. – 2018. – No. 6. – P. 120–126 (in Russian)
5. Prognoz deformatsii v krepkiykh massivakh gornykh porod kar'era Kurzunkul po rezul'tatam kinematicheskogo analiza [Prediction of Strains in Strong Rock Mass of the Kurzunkul Open Pit Mine by the Kinematic Analysis] / N. O. Berdinova et al. // *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' [Mining Informational and Analytical Bulletin]*. – 2020. – No. 4. – P. 58–68 (in Russian)
6. Technological solutions development for mining adjacent rock mass and pit reserves taking into account geomechanical assessment of the deposit / N. A. Nemova et al. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2020. – No. 2. – P. 17–23 (in English)
7. Instructions for the Safe Conduct of Mining Operations at Ore and Non-Ore Deposits and Underground Construction Sites Prone to and Hazardous in Terms of Rock Bursts: RD 06-329-99. – Moscow: Scientific and Technical Center for Industrial Safety of Gosgortekhnadzor of Russia, 2003 (in Russian)
8. Geomechanical Processes and Their Assessment in Rock Masses of Central Kazakhstan / Kh.-K. Kassymkanova, G. Jangulova, G. Issanova [et al.]. – Cham: Springer, 2020. – 94 p. (in English)
9. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. Fundamentals of Rock Mechanics. – 4th ed. – Oxford: Blackwell Publishing, 2007. – 475 p. (in English)
10. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // *Quarterly of Applied Mathematics*. – 1952. – Vol. 10. – No. 2. – P. 157–165 (in English)

Сведения об авторах:

Шапошник С. Н., доктор техн. наук, руководитель ТОО «Expert Pro» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), shaposhniksergey@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-7721-0706>

Асанова Ж. М., Ph.D доктор, и. о. доцента кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), zh.assanova@ktu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-1169-8729>

Есендосова А. Н., доктор Ph.D, ст. преподаватель кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова», (г. Караганда, Казахстан), a.yesendosova@ktu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0001-7415-3630>

Керімбаева Н. Б., преподаватель кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), Nazerke_kerimbayeva@bk.ru; <https://orcid.org/0009-0004-2669-4773>

Авторлар туралы мәліметтер:

Шапошник С. Н., техника ғылымдарының докторы, «Expert Pro» ЖШС басшысы (Өскемен қ., Қазақстан)

Асанова Ж. М., Ph.D докторы, «Пайдалы қазбалар кен орындарын өндіру» кафедрасының доценті м. а., «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)

Есендосова А. Н., Ph.D докторы, «Пайдалы қазбалар кен орындарын өндіру» кафедрасының аға оқытушысы, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)

Керімбаева Н.Б., «Пайдалы қазбалар кен орындарын өндіру» кафедрасының оқытушысы, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Shaposhnik S. N., Doctor of Technical Sciences, Director of Expert Pro LLP (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Assanova Zh. M., Ph.D, Acting Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)

Yesendosova A. N., Ph.D, Senior Lecturer of the Department of Mineral Deposits Development, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)

Kerimbayeva N. B., Lecturer of the Department of «Development of mineral deposits», Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)

Организатор:

окружной выставочный центр

• ЮГОРСКИЕ КОНТРАКТЫ •

Техническая поддержка:

EXPOTECHMEMBER
OF THE RUSSIAN
UNION OF EXHIBITIONS
AND FAIRSЧЛЕН
РОССИЙСКОГО
СОЮЗА ВЫСТАВОК
И ЯРМАРОК31 МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВЫСТАВКА**СУРГУТ.
НЕФТЬ И ГАЗ
2026**31th INTERNATIONAL
SPECIALIZED
TECHNOLOGICAL EXHIBITION**SURGUT.
OIL & GAS
2026****23.09 - 25.09**

+7 (3462) 94-34-54
sales@yugcont.ru
sngexpo.ru



г. Сургут,
СОК «Энергетик»
ул. Энергетиков, 47

Код МРНТИ 52.13.05

Д. А. Шокарев¹, *И. Д. Арыстан², А. А. Рахимберлина², Ж. Ж. Шильмагамбетова³¹ТОО «Expert Pro» (г. УстьКазахстан, Казахстан),²НАО «Карагандинский технический университет им. А. Сагинова» (г. Караганда, Казахстан),³НАО «Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова» (г. Актюбе, Казахстан)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАПОЛНЕНИЯ ЗАКРЕПНЫХ ПУСТОТ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОТРЕЩИНОВАТОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы повышения безопасности подземных горных работ при ликвидации закрепных пустот в условиях сложной геомеханической обстановки Артемьевской шахты Иртышского месторождения. Выполнен анализ причин образования куполов в кровле выработок и исследовано применение вспениваемых материалов для их заполнения. Проведена оценка влияния заполнителя на напряженно-деформированное состояние массива и рамной крепи с использованием фотоупругих датчиков и тензометрического контроля. Определены нагрузки, несущая способность заполнителя и эффективность технологии, позволяющей повысить устойчивость выработок, снизить риск обрушений и обеспечить безопасность подземных работ.

Ключевые слова: геомеханическое обоснование, высокопрочный массив горных пород, подземные горные работы, закрепные пустоты, куполообразные выработки, вспенивающиеся материалы, заполнение пустот, напряженно-деформированное состояние массива.

Жоғары жарықшақты тау жыныстары массиві жағдайында бекітпе артындағы қуыстарды толтыру технологиясын геомеханикалық негіздеу

Аңдатпа. Мақалада Иртыш кенорнының Артемьевск шахтасында күрделі геомеханикалық жағдайларда бекітпе артындағы қуыстарды жою кезінде жерасты тау-кен жұмыстарының қауіпсіздігін арттыру мәселелері қарастырылған. Тау-кен қазбаларының төбесінде күмбездердің пайда болу себептеріне талдау жасалып, оларды толтыру үшін көбіктенетін материалдарды қолдану зерттелген. Толтырғыштың тау жыныстары массиві мен рамалық бекітпенің кернеулі-деформацияланған күйіне әсері фотоэластикалық датчиктер және тензометриялық бақылау әдістері арқылы бағаланған. Толтырғыштың түсіретін жүктемелері, оның көтергіш қабілеті және қазбалардың тұрақтылығын арттыруға, опырылу қаупін төмендетуге және жерасты жұмыстарының қауіпсіздігін қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін технологияның тиімділігі анықталған.

Түйінді сөздер: геомеханикалық негіздеу, жоғары жарықшақты тау жыныстары массиві, жерасты тау-кен жұмыстары, бекітпе артындағы қуыстар, күмбезді тәрізді қазбалар, көбіктенетін материалдар, қуыстарды толтыру, тау жыныстары массивінің кернеулі-деформацияланған күйі.

Geomechanical justification of the technology for filling backfill voids under conditions of a highly fractured rock mass
Abstract. The article considers the issues of improving the safety of underground mining operations during the elimination of backfill voids under complex geomechanical conditions at the Artemyevsky mine of the Irtysh deposit. The causes of dome formation in the roof of mine workings were analyzed, and the application of foaming materials for their filling was investigated. The influence of the filler on the stress-strain state of the rock mass and frame support was evaluated using photoelastic sensors and strain gauge monitoring. The loads, bearing capacity of the filler, and the efficiency of the technology were determined, which makes it possible to increase the stability of mine workings, reduce the risk of collapses, and ensure the safety of underground operations.

Key words: geomechanical justification, highly fractured rock mass, underground mining operations, backfill voids; dome-shaped excavations, foaming materials, void filling, stress-strain state of rock mass.

Введение

В связи со сложными горно-геологическими условиями и геомеханической обстановкой на Артемьевской шахте получили развитие процессы вывалообразования в зонах повышенной трещиноватости пород [1].

Формирование вывалов определяется целым рядом факторов, количественные характеристики которых изменяются в широких пределах, вследствие чего предсказание вывалов весьма затруднительно. Актуальной задачей на Артемьевской шахте является оперативная и качественная ликвидация вывалов, что возможно при заполнении пустот вспениваемыми материалами. Задача ТОО «Expert PRO» – данные «купола» заполнить вспениваемыми материалами и дать обоснованное заключение о пригодности использованных материалов для заполнения «куполов» [2].

Заполнение пустот на Артемьевской шахте производится в первую очередь в «куполе» доставочного штрека 1 на сопряжении с доставочным штреком 2 блока 20 отн. -232 м (рис. 1). Объем пустот «купола» составляет 80 м³. Доставочный штрек 1, в котором образовались «купола», закреплен рамной металлической крепью и крепь по кровле закатана кругляком.

Технология заполнения куполов представляет собой полный комплекс оборудования и материалов для выполнения работ, связанных с заполнением куполов вспени-

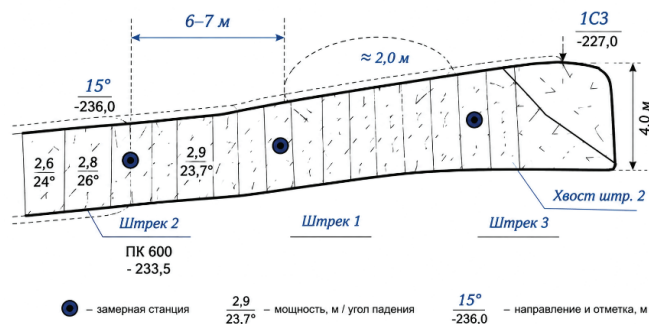


Рис. 1. Вертикальная проекция участка горных работ на сопряжении доставочного штрека 1 и 2.

Сурет 1. 1 және 2 жеткізу штректерінің түйісуіндегі тау-кен жұмыстары учаскесінің тік проекциясы.

Figure 1. Vertical projection of the mining operations area at the junction of haulage drifts 1 and 2.

вающимися материалами. Комплекс представляет собой оборудование для приготовления материала для транспортировки вспениваемых материалов и непосредственно укладки их в пустоты куполов [3–5]. Вспенивающиеся материалы, благодаря своей жидкой консистенции, могут

заполнять все неровности, пустоты и трещины пространства куполов горных выработок, а также в минимальные сроки ликвидировать аварийные участки. Используемые материалы: смола «Карбофил» и цементная смесь «Текфом». Для проведения работ применяется двухкомпонентный насос с пневматическим приводом SK90 4:1 (рис. 2) и насосный агрегат MONO WT820 (рис. 3).



Рис. 2. Пневматический двухкомпонентный шестеренчатый насос SK90 4:1.

Сурет 2. Пневматикалық екікомпонентті шестернялы сорғы SK90 4:1.

Figure 2. Pneumatic two-component gear pump SK90 4:1.



Рис. 3. Насос MONO WT 820.

Сурет 3. MONO WT 820 сорғысы.

Figure 3. MONO WT 820 pump.

Для приготовления вспениваемых материалов используется шахтная вода температурой 10–30 °С. Компоненты смолы перед применением выдерживают не менее 16 часов при температуре не ниже +20 °С.

В районе «куполов» должны быть обеспечены подвод сжатого воздуха и воды, электроснабжение и освещение рабочих мест [6].

В ходе исследований оценивалось влияние заполнения «куполов» вспениваемыми материалами на напряженно-деформированное состояние массива, а также деформационные характеристики и несущая способность заполнителя.

Методология

Заполнение закрепного пространства выполняется насосными агрегатами. В купол устанавливают две трубы:

после создания герметизирующего слоя смолы толщиной 0,15–0,20 м через нагнетательную трубу подают вспенивающийся материал, а через контрольную осуществляют отвод воздуха и контроль полноты заполнения [7].

Работы выполняются последовательно: сначала на сопряжении доставочных штреков 1 и 2, затем на доставочном штреке 1 в интервале ПК550–ПК600 (отм. –236 м).

Изменение напряженно-деформированного состояния массива контролируется фотоупругими датчиками ФДО-1 и ФДО-2 с использованием полярископа ПШ. При перераспределении нагрузки от заполненного «купола» датчики, установленные на расстоянии 6–7 м, фиксируют изменение напряжений в окружающем массиве [8].

Фотоупругие датчики, разработанные в ИГД СО РАН, представляют собой стеклянные цилиндры с осевым отверстием, устанавливаемые в шпур и деформирующиеся совместно с породой. Они работают в отраженном свете и позволяют регистрировать изменения напряженно-деформированного состояния массива (рис. 4).

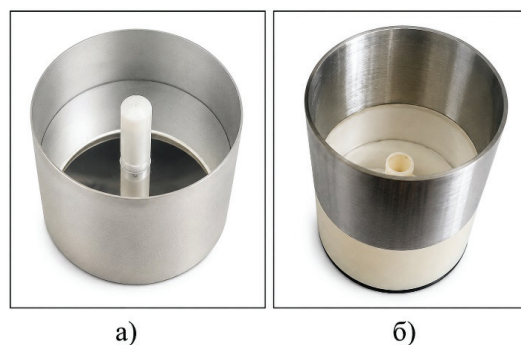


Рис. 4. Общий вид фотоупругого датчика типа ФДО-1 (а) и ФДО-2 (б).

Сурет 4. ФДО-1 (а) және ФДО-2 (б) типті фотоупруғілік датчиктердің жалпы көрінісі.

Figure 4. General view of photoelastic sensors of type FDO-1 (a) and FDO-2 (b).

Принцип работы фотоупругих датчиков основан на использовании механооптического эффекта (пьезоэффекта), свойственного прозрачным оптически чувствительным материалам, – эффекта фотоупругости.

Поляризованный свет, проходя через нагруженный фотоупругий датчик, разделяется на два взаимно перпендикулярных луча, распространяющихся с разными скоростями. Возникающая разность хода приводит к образованию интерференционной картины, отражающей распределение напряжений или деформаций в породе. Для регистрации этой картины применяются специальные приборы – полярископы, формирующие пучок поляризованных лучей (рис. 5).

Направления квазиглавных напряжений и деформаций совпадают с осями симметрии оптической картины фотоупругого датчика. По интерференционной картине определяют их направления, величину максимальных напряжений и соотношение компонентов тензора.

На Артемьевской шахте для установки датчиков бурят три шпура диаметром 40 мм и длиной 0,6 м у каждого

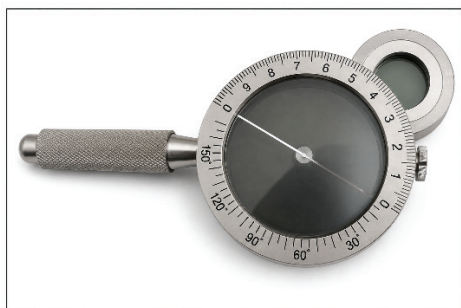


Рис. 5. Общий вид полярископа типа ПШ.
Сурет 5. ПШ типті полярископтың жалпы көрінісі.
Figure 5. General view of the PSH-type polariscope.

«купола». Состояние крепи контролируют визуально и измеряют относительные смещения элементов электронной линейкой методом засечек [9–10].

Результаты и обсуждения

В настоящее время при проходке горных выработок в сильнотрещиноватых породах или на участках с высоким НДС на Артемьевской шахте происходит обрушение кровли и образуются «купола» довольно больших объемов. «купола» могут образовываться при проходке выработки или после (при неполной забутовке «куполов» или ее отсутствии).

Данные выработки, в которых образовались «купола», закреплены рамной металлической крепью и крепь по кровле закатана кругляком (рис. 6).



Рис. 6. «Купол» на Артемьевской шахте на отм. -153 м.
Сурет 6. Артемьев кенішіндегі -153 м белгісіндегі «күмбез».
Figure 6. «Dome» at the Artemyevsky mine at elevation -153 m.

В выработках с «куполами» (рис. 6), по которым осуществляется движение самоходного оборудования, людей и вентиляция, нередко образуются незаполненные пустоты вследствие вывалов пород высотой более 2–3 м. Это приводит к неравномерным и динамическим нагрузкам на крепь.

Традиционное заполнение «куполов» выполняется вручную, преимущественно круглым лесом, что сопрово-

ждается неравномерным распределением материала, повышенными трудозатратами и снижением эффективности работы крепи. Доля ручной забутовки составляет 9–12% от общего объема проходческих работ и до 35–65% затрат на крепление.

Для герметизации стыков затяжки применяли слой торкрет-бетона с армирующей сеткой, а также мешковину и мешки из-под цементной смеси «Текфом» (рис. 7). Однако объема вспениваемых материалов оказалось недостаточно из-за утечек смеси через неплотности крепи и наличия дополнительных пустот в кровле выработки.



Рис. 7. Слой торкрет-бетона с сеткой для изоляции стыков в затяжке из круглого леса.

Сурет 7. Дөңгелек ағаштан жасалған тартпа түйіспелерін оқшаулауға арналған торлы торкрет-бетон қабаты.

Figure 7. Shotcrete layer with mesh for joint insulation in a round timber lagging.

Это обусловлено следующими причинами.

До начала работ отсутствовали достоверные данные об объеме «куполов» и конфигурации закрепного пространства.

Закупленного объема смолы «Карбофил» и цементной смеси «Текфом» было недостаточно: материалы были рассчитаны на заполнение 938 м³ пустот, тогда как их фактический объем на доставочном штреке № 1 (отм. -232 м) составил 1280 м³.

Подготовительные работы выполнить заранее не представлялось возможным. Металлическая крепь СВП не была герметизирована вентиляционным брезентом в соответствии с требованиями инструкции, поэтому для создания герметизирующего слоя использовали смолу «Карбофил».

Опыт применения данной технологии на Артемьевской шахте показал, что вспенивающиеся смолы эффективны для полного заполнения пустот объемом до 250 м³, а создание герметизирующего слоя целесообразно только в выработках с небольшими объемами пустот. Схема заполнения «купола» доставочного штрека 1 блока 20 отм. -236 м в рамках данной НИР представлена на рис. 8.

Для герметизации стыков затяжки из круглого леса применяли мешковину и использованные мешки от цементной смеси «Текфом». Смесь «Текфом» после смешивания с водой образует устойчивую цементную пену, однако из-за сохранения текучести в течение 2–5 минут при недостаточной герметизации происходили утечки материала.

При заполнении пустот фенольной смолой «Карбофил» утечки отсутствовали, однако ее стоимость примерно в 8

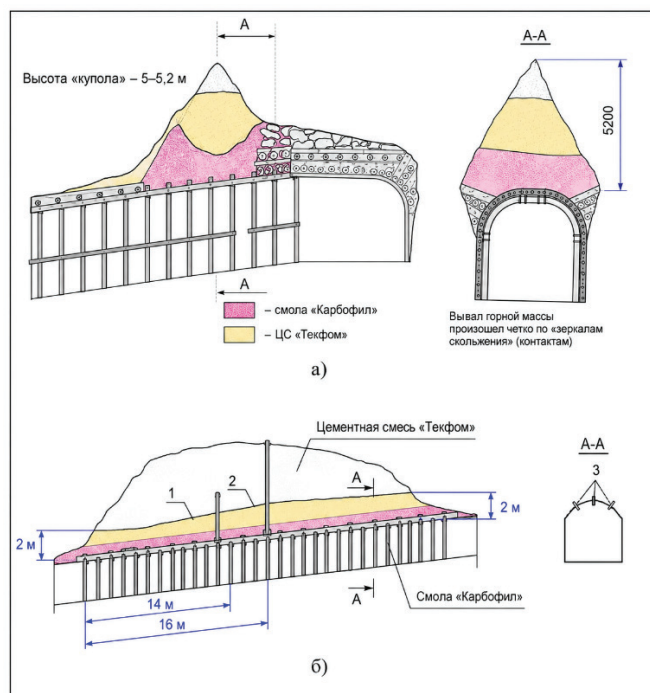


Рис. 8. Схема заполнения «купола» доставочного штрека 1 блока 20 отн. -236 м: а) малый «купол»; б) в интервале ПК550–ПК600: 1 – нагнетательная труба $\varnothing 50$ мм длиной 5 м (1 шт.); 2 – нагнетательная и дренажная труба $\varnothing 50$ мм длиной 8 м (по 1 шт.); 3 – патрубки $\varnothing 32$ мм длиной 0,5 м.

Сурет 8. 20-блоқтың 1-доставкалық штрегінің –236 м белгісіндегі күмбезді толтыру сызбасы: а) кіші «күмбез»; б) ПК550–ПК600 аралығында: 1 – ұзындығы 5 м, диаметрі $\varnothing 50$ мм айдау құбыры (1 дана); 2 – ұзындығы 8 м, диаметрі $\varnothing 50$ мм айдау және дренаждық құбыр (әрқайсысы 1 дана); 3 – ұзындығы 0,5 м, диаметрі $\varnothing 32$ мм келте құбырлар.

Figure 8. Scheme of dome filling in haulage drift 1 of block 20 at elevation -236 m: a) small «dome»; b) within the PK550–PK600 interval: 1 – injection pipe $\varnothing 50$ mm, 5 m long (1 pc.); 2 – injection and drainage pipes $\varnothing 50$ mm, 8 m long (1 pc. each); 3 – branch pipes $\varnothing 32$ mm, 0.5 m long.

раз превышает стоимость смеси «Текфом», что ограничивает экономическую целесообразность полного заполнения крупных пустот.

При заполнении малого «купола» объемом 74 м^3 общая нагрузка на шесть рам крепи составила 91,8 кН (15,3 кН на одну раму), что значительно ниже несущей способности арочной крепи СВП-22 (не менее 330 кН на раму). Коэффициент запаса прочности составил около 22.

Контроль напряженного состояния крепи осуществлялся с помощью тензорезисторного датчика М50. Измерения показали, что после закачки вспенивающегося материала нагрузка на крепь первоначально быстро возрастает под действием собственного веса заполнителя, затем незначительно уменьшается вследствие его твердения. При последующих этапах заполнения передача нагрузки происходит постепенно и продолжается в течение двух недель и более.

Схема распределения горного давления и взаимодействия крепи с массивом горных пород представлена на рис. 9.

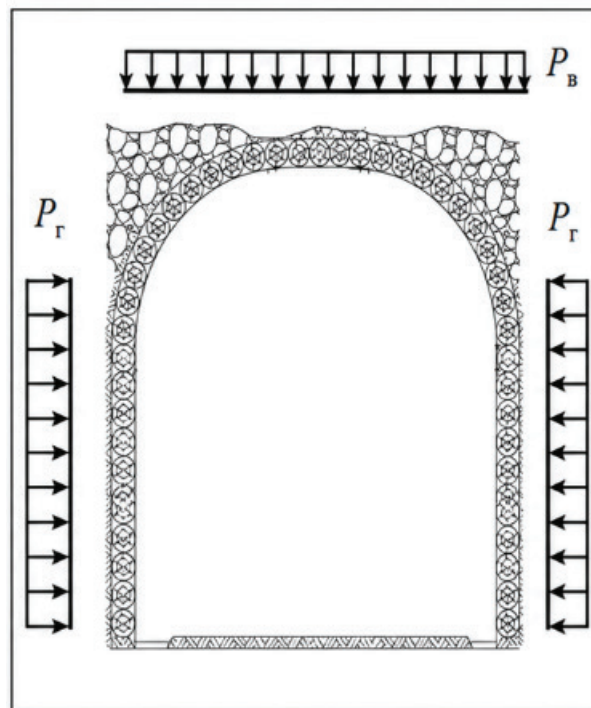


Рис. 9. Схема действия нагрузок на крепь выработки от массива и вспенивающегося заполнителя.

Сурет 9. Массив пен көбіктенетін толтырғыштан тау-кен қазбасының бекітпесіне түсетін жүктемелердің әсер ету сызбасы.

Figure 9. Scheme of load action on the excavation support from the rock mass and foaming backfill.

Это объясняется наличием несущей способности нижних слоев вспенивающегося материала, который служит опорой для последующих порций заполнителя. Таким образом, наличие вспенивающегося материала над рамной крепью повышает безопасность выработки за счет сглаживания возникающих нагрузок во времени. Этот эффект сохраняется даже при неполном заполнении «купола», поскольку область недоzakлада со временем будет заполняться породой при приобретении «купол» свода естественного равновесия без разрушающих ударных нагрузок на крепь.

По состоянию на 15.04.2016 г. показания датчика составили 504 кг, что соответствует вертикальной нагрузке на раму 59,27 кН. Дополнительная нагрузка от вспенивающегося материала достигла 21,16 кН, при этом коэффициент запаса прочности крепи СВП-22 снизился с 8,7 до 5,5, оставаясь значительно выше нормативного значения.

Расчет крепи выполнен для рамной конструкции на жестком основании при равномерно распределенных вертикальных и боковых нагрузках со стороны массива. Анализ позволил определить внутренние усилия и перемещения элементов крепи (рис. 11). Установлено, что элементы крепи работают на изгиб и сжатие, а максимальные напря-

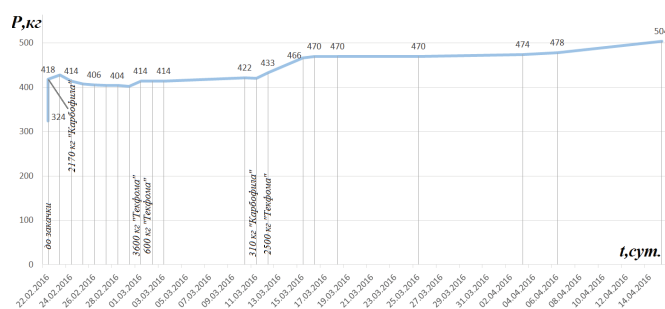


Рис. 10. График показаний тензорезисторного датчика М50, установленного под затяжку крепи.

Сурет 10. Бекітпенің ағаш төсемінің астына орнатылған М50 тензорезисторлық датчик көрсеткіштерінің графигі.

Figure 10. Graph of readings from the M50 strain gauge sensor installed under the support lagging.

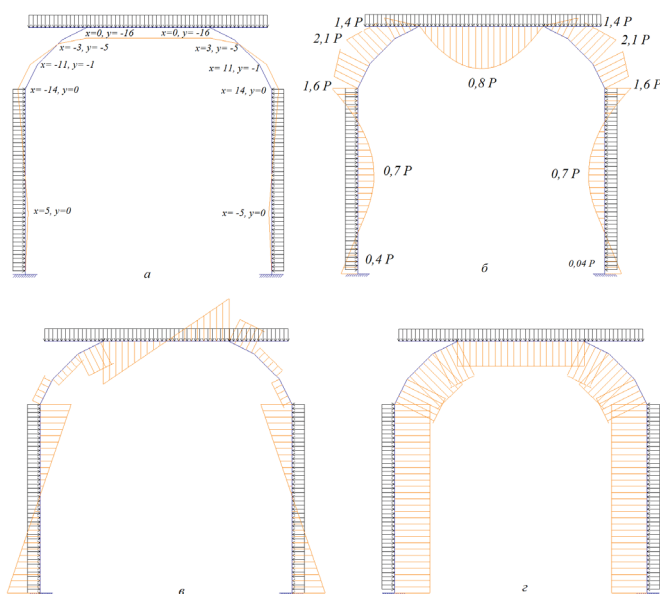


Рис. 11. Результаты расчета крепи: а – перемещения узлов крепи, мм; б – эпюры изгибающих моментов, кН; в – эпюра поперечных сил Q; г – эпюра продольных сил N.

Сурет 11. Бекітпені есептеу нәтижелері: а – бекітпе түйіндерінің орын ауыстырулары, мм; б – иілді моменттерінің эпюралары, кН; в – көлденең күштердің Q эпюрасы; г – бойлық күштердің N эпюрасы.

Figure 11. Results of support calculation: а – displacements of support nodes, mm; б – bending moment diagrams, kN; в – shear force diagram Q; г – axial force diagram N.

жения возникают в сечениях с наибольшими изгибающими моментами.

Максимальные напряжения в сечениях крепи:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} \cdot \frac{N}{A_{max}},$$

где M – изгибающий момент;

N – продольная сила;

W – момент сопротивления сечения (СВП-22 – 74,8 см²);

A – площадь сечения (СВП-22 – 24,44 см²).

Допускаемые напряжения $[\sigma] = R_y \cdot \gamma_c$, $R_y = 225$ МПа – расчетное сопротивление материала крепи. Коэффициент условий работы γ_c примем равным 0,85, тогда $[\sigma] = 191$ МПа.

$M_{max} = 40,9$ МПа < $[\sigma] = 191$ МПа.

Таким образом, возникающие под действием нагрузок напряжения лежат в допустимых пределах, запас прочности по напряжениям составляет 4,66.

Выводы

Применение вспениваемых материалов обеспечивает заполнение неровностей, трещин и пустот закрепного пространства, формируя дополнительный несущий элемент между массивом горных пород и крепью. В результате происходит постепенное перераспределение горного давления и снижение вероятности возникновения динамических нагрузок на элементы крепления.

При заполнении малого «купола» объемом 74 м³ общая нагрузка на шесть рам крепи составила 91,8 кН, что значительно ниже несущей способности арочной крепи СВП-22. Коэффициент запаса прочности составил около 22, что свидетельствует о высокой надежности конструкции при восприятии дополнительной нагрузки от заполнителя.

Результаты расчетного анализа крепи показали, что максимальные возникающие напряжения в элементах конструкции составляют 40,9 МПа и находятся значительно ниже допустимого расчетного сопротивления материала крепи (191 МПа). Запас прочности по напряжениям составляет 4,66, что подтверждает устойчивую работу крепёжной системы при совместном воздействии массива и вспенивающегося заполнителя.

Установлено, что технология заполнения закрепных пустот вспениваемыми материалами является наиболее эффективной при ликвидации куполов объемом до 250 м³. Для обеспечения надежности работ необходимы предварительное определение фактического объема и конфигурации пустот, а также качественная герметизация закрепного пространства.

Таким образом, разработанная технология позволяет повысить безопасность подземных горных работ, снизить риск обрушения кровли выработок и обеспечить повышение эксплуатационной надежности крепи в сложных геомеханических условиях. Полученные результаты подтверждают возможность применения вспениваемых материалов как эффективного способа управления напряженно-деформированным состоянием массива и поддержания устойчивости горных выработок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Техничко-экономическое обоснование промышленных кондиций на колчеданно-полиметаллические руды Иртышского месторождения. Алматы: ТОО КПК «Геолсервис», 2013 (на русском языке)
2. Временные указания по безопасному ведению горных работ на Иртышском и Белоусовском месторождениях, склонных к горным ударам / ДГП «ВНИИцветмет» НЦ КПМС РК. – Усть-Каменогорск, 2005 (на русском языке)
3. Проект промышленной разработки 14 горизонта Иртышского месторождения полиметаллических руд (вскрытие и отработка 14 горизонта Иртышского месторождения). – Белоусовка, 2010 (на русском языке)
4. Новое трехосное испытательное устройство с высокотемпературным модулем для определения термомеханических свойств твердых пород. / C. Wang [и др.] // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2023. – № 27 (4). – С. 1697–1714 (на английском языке)
5. Griffiths D. V., Lane P. A. Анализ устойчивости склона с помощью конечных элементов // *Geotechnique*. – 1999. – Вып. 49. – № 3. – С. 387–403 (на английском языке)
6. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Критерий Хука – Брауна – издание 2002 года // *Материалы 5-го Североамериканского симпозиума по механике горных пород и 17-й конференции Ассоциации проходчиков Канады: NARMS-TAC 2002, Торонто, Канада / под ред. Р. Э. Хамма и др.* – 2002. – Вып. 1. – С. 267–273 (на английском языке)
7. Duncan J. M. Современное состояние: предельное равновесие и конечно-элементный анализ склонов. // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1996. – Вып. 122. – № 7. – С. 577–596 (на английском языке)
8. Brady H. G., Brown E. T. Механика горных пород для подземных горных работ. – Лондон: George Allen & Unwin, 1985. – 527 с. (на английском языке)
9. Stephenson R. M., Sandy M. P. Оптимизация проектирования очистных забоев и наземной поддержки – тематическое исследование // *Наземная поддержка 2013: материалы 7-го Международного симпозиума по наземной поддержке в горнодобывающей промышленности и подземном строительстве / под ред. Y. Potvin, B. Brady.* – Перт: Австралийский центр геомеханики, 2013. – С. 387–400 (на английском языке)
10. Nickson S. D. Руководство по креплению кабелями для подземных горных работ в твердых породах: дис. ... магистра наук. – Ванкувер: Университет Британской Колумбии, 1992. – 223 с. (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ертіс кен орнының колчеданды-полиметалл кендеріне арналған өнеркәсіптік кондициялардың техникалық-экономикалық негіздемесі / «Геолсервис» КПК ЖШС. – Алматы, 2013 (орыс тілінде)
2. Тау соққыларына бейім Ертіс және Белоусов кен орындарында тау-кен жұмыстарын қауіпсіз жүргізу жөніндегі уақытша нұсқаулар / ҚР КПМС ҰО «ВНИИцветмет» ЕМК. – Өскемен, 2005 (орыс тілінде)
3. Ертіс полиметалл кен орнының 14-горизонтын өнеркәсіптік игеру жобасы (Ертіс кен орнының 14-горизонтын ашу және өндіру). – Белоусовка, 2010 (орыс тілінде)
4. Қатты тау жыныстарының термомеханикалық қасиеттерін анықтауға арналған жоғары температуралы модуль бар жаңа үшосьті сынақ құрылғысы. / C. Wang [және т. б.] // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2023. – № 27 (4). – Б. 1697–1714 (ағылшын тілінде)
5. Griffiths D. V., Lane P. A. Ақырлы элементтер әдісімен еңістің орнықтылығын талдау. // *Geotechnique*. – 1999. – Т. 49. – № 3. – Б. 387–403 (ағылшын тілінде)
6. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Хук – Браун критерийі – 2002 жылғы басылым // *Тау жыныстары механикасы бойынша 5-Солтүстік Америка симпозиумы және Канаданың 17-ші Тоннель қауымдастығы: NARMS-TAC 2002 материалдары, Торонто, Канада.* – 2002. – Т. 1. – Б. 267–273 (ағылшын тілінде)
7. Duncan J. M. Қазіргі жағдай: шектік тепе-теңдік және еңістерді ақырлы элементтер әдісімен талдау // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1996. – Т. 122. – № 7. – Б. 577–596 (ағылшын тілінде)
8. Brady H. G. B., Brown E. T. Тау жыныстарының механикасы: жерасты тау-кен жұмыстарына арналған. – Лондон: Allen & Unwin, 1985. – 527 б. (ағылшын тілінде)
9. Stephenson R. M., Sandy M. P. Тазарту камераларын жобалау мен жерүсті тіректерін оңтайландыру: тәжірибелік зерттеу // *Ground Support 2013: Тау-кен өнеркәсібі мен жерасты құрылыстарындағы бекіту жүйелері бойынша 7-халықаралық симпозиум материалдары / ред. Y. Potvin, B. Brady.* – Перт: Австралиялық геомеханика орталығы, 2013. – Б. 387–400 (ағылшын тілінде)
10. Nickson S. D. Қатты тау жыныстары жағдайындағы жерасты тау-кен жұмыстарына арналған анкерлік кабельдерді қолдану жөніндегі нұсқаулық: магистрлік диссертация. – Ванкувер: Британдық Колумбия университеті, 1992. – 223 б. (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie promyshlennykh konditsii na kolchedanno-polimetallicheskie rudy Irtyshskogo mestorozhdeniia [Feasibility Study of Industrial Cut-off Parameters for the Massive Sulfide Polymetallic Ores of the Irtysh Deposit]. – Almaty: GeolSERVICE LLP, 2013 (in Russian)
2. Vremennye ukazaniia po bezopasnomu vedeniiu gornykh rabot na Irtyshskom i Belousovskom mestorozhdeniakh, sklonnye k gornym udaram [Temporary Guidelines for the Safe Conduct of Mining Operations at the Irtysh and Belousov Deposits Prone to Rockbursts] / DGP «VNIItsvetmet» NTs KPMS RK. – Ust-Kamenogorsk, 2005 (in Russian)
3. Proekt promyshlennoi razrabotki 14 gorizonta Irtyshskogo mestorozhdeniia polimetallicheskiikh rud (vskrytie i otrabotka 14 gorizonta Irtyshskogo mestorozhdeniia) [Industrial Mining Project for the 14th Level of the Irtysh Polymetallic Deposit (Development and Extraction of the 14th Level of the Irtysh Deposit)]. – Belousovka, 2010 (in Russian)
4. A Novel True Triaxial Testing Device with a High-Temperature Module for Thermo-Mechanical Property Characterization of Hard Rocks / C. Wang et al. // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2023. – Vol. 27. – No. 4. – P. 1697–1714 (in English)
5. Griffiths D. V., Lane P. A. Slope Stability Analysis by Finite Elements // *Geotechnique*. – 1999. – Vol. 49. – No. 3. – P. 387–403 (in English)
6. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek – Brown Failure Criterion – 2002 Edition // *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference (NARMS-TAC 2002).* – Toronto, Canada, 2002. – Vol. 1. – P. 267–273 (in English)

7. Duncan J. M. State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1996. – Vol. 122. – No. 7. – P. 577–596 (in English)
8. Brady B. H. G., Brown E. T. *Rock Mechanics for Underground Mining*. – London: Allen & Unwin, 1985. – 527 p. (in English)
9. Stephenson R. M., Sandy M. P. Optimising stope design and ground support – a case study // *Ground Support 2013: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction* / eds. Y. Potvin, B. Brady. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013. – P. 387–400 (in English)
10. Nickson S. D. *Cable Support Guidelines for Underground Hard Rock Mine Operations: M.A.Sc. thesis*. – Vancouver: University of British Columbia, 1992. – 223 p. (in English)

Сведения об авторах:

Шокарев Д. А., магистр техносферной безопасности, Советник директора по стратегическим вопросам ТОО «Expert Pro» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), D.Shokarev@expertpro.kz; <https://orcid.org/0009-0001-9052-8559>

Арыстан И. Д., к. т. н., профессор кафедры «Разработка месторождения полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), arystan39@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1434-8644>

Рахимберлина А. А., ст. преподаватель кафедры «Рудничная аэрология и охрана труда», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), altuwa1986@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3388-8096>

Шильмагамбетова Ж. Ж., доцент кафедры «Нефтегазовое дело», Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, кандидат педагогических наук (г. Актюбе, Казахстан), zshilmagambetova@zhubanov.edu.kz; <https://orcid.org/0009-0008-8780-7160>

Авторлар туралы мәліметтер:

Шокарев Д. А., техносфералық қауіпсіздік магистрі, «Expert Pro» ЖШС директорының стратегиялық мәселелер жөніндегі кеңесшісі (Өскемен қ., Қазақстан)

Арыстан И. Д., т. ғ. к., «Пайдалы қазбалар кенорындарын өндіру» кафедрасының профессоры, КеАҚ «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» (Қарағанды қ., Қазақстан)

Рахимберлина А. А., «Кеніштік аэрология және еңбекті қорғау» кафедрасының аға оқытушысы, КеАҚ «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» (Қарағанды қ., Қазақстан)

Шильмагамбетова Ж. Ж., Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, «Мұнай газ ісі» кафедрасының доценті, педагогика ғылымдарының кандидаты (Ақтөбе қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Shokarev D. A., Master of Technosphere Safety, Strategic Affairs Advisor to the Director of Expert Pro LLP (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Arystan I. D., candidate of Technical Sciences, Professor of the department «Development of mineral deposits», NAO «Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov» (Karaganda, Kazakhstan)

Rakhimberlina A. A., senior lector of the department «Mine Aerology and Occupational Safety», NAO «Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov» (Karaganda, Kazakhstan)

Shilmagambetova Zh. Zh., Academic associate professor of the Department «Oilgas industru», Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Candidate of Pedagogical Sciences (Aktobe, Kazakhstan)

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА

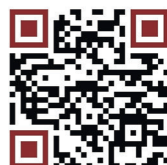


ПОДПИСКА' 2026

РЕКЛАМНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

СОТРУДНИЧЕСТВО

Узнайте больше
на сайте:



Instagram:



Консультация
в WhatsApp:



Код МРНТИ 55.39.39

Д. Д. Басканбаева¹, К. К. Елемесов¹, *Е. Е. Сарыбаев¹, С. М. Аппазова²¹Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан),²Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті (Қызылорда қ., Қазақстан)

МАЙМЕН ТОЛТЫРЫЛҒАН БҰРАНДАЛЫ КОМПРЕССОРДАҒЫ ЖЫЛУ-МАССА АЛМАСУ ЖӘНЕ КОНДЕНСАЦИЯНЫ МОДЕЛЬДЕУ

Аннотация. Жұмыста маймен толтырылған бұрандалы компрессорда ылғалды газды сығу кезіндегі жылу-масса алмасу процестері қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі тау-кен саласында компрессорлардың кең қолданылуымен және су буы бар газдар үшін энергетикалық есептердің дәлдігін арттыру қажеттілігімен байланысты. Мақсат – конденсацияның жылулық режимге және сығу тиімділігіне әсерін ескеретін математикалық модель құру. Модель айналымы көлемдегі процестің термогазодинамикалық сипаттамасына негізделген, масса мен энергия теңдеулерін, маймен жылу алмасуды және жасырын жылу бөлінуін қамтиды. 30–80% ылғалдылықта жүргізілген есептеулер сығу температурасы мен меншікті жұмыстың төмендейтінін көрсетті. 70% ылғалдылықта меншікті жұмыс шамамен 5%-ға азаяды.

Түйінді сөздер: бұрандалы компрессор, ылғалды газ, су буының конденсациясы, жылу-масса алмасу, математикалық модельдеу, энергия тиімділігі.

Modeling of heat and mass transfer and condensation in an oil-injected screw compressor

Abstract. The paper examines heat and mass transfer processes during the compression of humid gas in an oil-injected screw compressor. The study is relevant due to the widespread use of compressors in the oil and gas industry and the need to improve the accuracy of energy performance calculations for gases containing water vapor. The aim is to develop a mathematical model that accounts for moisture condensation effects on the thermal regime and compression efficiency. The model is based on a thermogasdynamic description of a variable-volume process and includes mass and energy balance equations, considering heat transfer with injected oil and latent heat release. Numerical simulations at 30–80% humidity showed a decrease in discharge temperature and specific work. At about 70% humidity, the specific work decreases by approximately 5%.

Key words: screw compressor, humid gas, water vapor condensation, heat and mass transfer, mathematical modeling, energy efficiency.

Моделирование теплообмена и конденсации в маслозаполненном винтовом компрессоре

Аннотация. В работе рассматриваются тепло-массообменные процессы при сжатии влажного газа в маслозаполненном винтовом компрессоре. Актуальность исследования связана с широким применением компрессоров в горной промышленности и необходимостью повышения точности расчета их энергетических характеристик при работе с газами, содержащими водяной пар. Целью является разработка математической модели, учитывающей влияние конденсации на тепловой режим и эффективность сжатия. Модель основана на термогазодинамическом описании процесса в переменном объеме и включает уравнения сохранения массы и энергии с учетом теплообмена с впрыскиваемым маслом и выделения скрытой теплоты. Расчеты, проведенные при влажности 30–80%, показали снижение температуры сжатия и удельной работы. При влажности 70% удельная работа уменьшается примерно на 5%.

Ключевые слова: винтовой компрессор, влажный газ, конденсация водяного пара, теплообмен, математическое моделирование, энергоэффективность.

Кіріспе

Өнеркәсіптік жабдықтардың энергия тиімділігіне қо-йылатын талаптардың артуы компрессорлық қондырғылардың жұмысын жетілдіру мәселесін өзекті етеді. Компрессорлар мұнай-газ, энергетика және тау-кен өнеркәсі-бінде кеңінен қолданылады, ал олардың энергия тұтынуы өндірістік шығындардың елеулі бөлігін құрайды [1–2].

Бұрандалы компрессорлар жоғары сенімділігімен және тұрақты жұмысымен ерекшеленеді. Маймен толтырылған компрессорларда май бүрку саңылауларды тығыздауды, салқындатуды және тозуды азайтуды қамтамасыз етеді [3–5]. Алайда нақты пайдалану жағдайларында компрес-сорлар құрамында ылғалы бар газдармен жұмыс істейді. Газды сығу кезінде температура мен қысымның өзгеруі су буының конденсациясына әкелуі мүмкін, бұл компрессор-дың температуралық режимі мен энергетикалық көрсет-кіштеріне әсер етеді [6–7].

Қазіргі математикалық модельдердің көпшілігі газ бен май арасындағы жылу алмасуды және фазалық ауысу-ларды толық ескермейді [8–11]. Сонымен қатар, тау-кен және байыту кәсіпорындарында компрессорлық жабдық пневматикалық тасымалдау, желдету және технологиялық газдарды беру жүйелерінде кеңінен қолданылады. Сон-дықтан ылғалды газды сығу кезінде жүретін жылу-масса алмасу мен конденсация үдерістерін ескеретін модельдер-ді әзірлеу компрессорлық жүйелердің энергия тиімділігін арттыру үшін маңызды болып табылады [12].

Жұмыстың мақсаты – конденсацияның жылулық ре-жимге және сығу тиімділігіне әсерін ескеретін математи-калық модель құру.

Әдістер мен материалдар

Жұмыста маймен толтырылған бұрандалы компрессорда ылғалды газды сығу кезіндегі жылу-масса алмасу үдерісте-рін зерттеуге арналған математикалық модель әзірленді. Мо-дельде газ, май және конденсацияланатын ылғал арасындағы өзара әсер ескерілді. Зерттеудің негізгі мақсаты – су буының конденсациясының компрессордың температуралық режимі мен энергетикалық көрсеткіштеріне әсерін бағалау.

Зерттеу нысаны ретінде өнеркәсіптік компрессорлық жүйелерде қолданылатын маймен толтырылған бұрандалы компрессор қарастырылды. Жұмыс ортасы ретінде құра-мында су буы бар газ қоспасы қабылданды. Май салқын-дату, тығыздау және жылу алмасу функцияларын атқарды.

Математикалық модель басқарылатын көлем үшін мас-са және энергия сақталу теңдеулеріне негізделді.

Ұсынылған математикалық модель жұмыс камерасын-дағы газ қоспасының массасының, температурасының және қысымының уақыт бойынша өзгеруін сипаттайтын өзара байланысқан теңдеулер жүйесінен тұрады. Модель масса сақталу теңдеуін (1), энергия теңдеуін (6), конденса-ция шартын (4–5), күй теңдеуін (9) және жұмыс камерасы көлемінің өзгеру заңын (10) қамтиды.

Газ фазасы үшін масса балансы 1-ші формула түрінде жазылады:

$$\frac{dm_g}{dt} = m_{in} - m_{out} - m_{cond}, \quad (1)$$

мұндағы m_g – жұмыс камерасындағы газ қоспасының мас-сасы;

m_{in} және m_{out} – басқарылатын көлемге кіретін және шығатын газдың массалық шығындары;

m_{cond} – су буының конденсациялану жылдамдығы.

Соңғы мүше қанығу шарттарына жеткен кезде су буының бір бөлігінің газ фазасынан сұйық фазаға ауысуын сипаттайды.

Газ құрамындағы су буының массалық үлесі 2-ші қатынас арқылы анықталды:

$$Y_V = \frac{m_V}{m_g}, \quad (2)$$

мұндағы m_v – газ қоспасындағы су буының массасы.

Газдағы су буының қысымы 3-ші формуламен анықталды:

$$p_V = Y_V \cdot p, \quad (3)$$

мұндағы p – жұмыс камерасындағы газ қоспасының ағымдағы қысымы. Конденсацияның басталу шарты 4-ші теңдікпен қабылданды:

$$p_V \geq p_{sat}(T), \quad (4)$$

мұндағы $p_{sat}(T)$ – T температурадағы қаныққан су буының қысымы. Бұл шарт орындалған кезде су буының бір бөлігі сұйық фазаға өтеді.

Модельде конденсация жылдамдығы жуықталған тәуелділік бойынша бағаланды (5-ші формула):

$$m_{cond} = k_c(p_V - p_{sat}(T)), \quad (5)$$

мұндағы k_c – конденсация қарқындылығының эмпирикалық коэффициенті, ол эксперименттік деректер мен компрессордың жұмыс камерасындағы жылу және масса алмасудың тән жағдайлары негізінде анықталады.

Жүйенің энергетикалық балансы газ бен май арасындағы жылу алмасумен байланысты жылулық әсерлерді, сондай-ақ конденсация кезінде бөлінетін жасырын жылуды ескере отырып жазылды. Энергетикалық баланс 6-шы теңдеу түрінде көрсетуге болады:

$$\frac{d}{dt}(m_g c_{pg} T) = Q_{gm} + Q_{cond} - p \frac{dV}{dt}, \quad (6)$$

мұндағы c_{pg} – тұрақты қысым кезіндегі газ қоспасының меншікті жылу сыйымдылығы;

T – газ температурасы;

V – жұмыс камерасының ағымдағы көлемі;

$p \frac{dV}{dt}$ – мүшесі роторлардың айналуы барысында газды сығу жұмысын сипаттайды.

Газ бен май арасындағы жылу алмасу 7-ші өрнекпен сипатталды:

$$Q_{gm} = \alpha_{gm} \cdot A_{gm} (T_m - T), \quad (7)$$

мұндағы α_{gm} – газ бен май арасындағы жылу беру коэффициенті;

A_{gm} – жылу алмасудың тиімді ауданы;

T_m – май температурасы.

Бұл мүше бүркілген майдың қарқынды салқындату әсерін сипаттайды, ол сығу үдерісінің температуралық режиміне елеулі ықпал етеді.

Су буының конденсациясымен байланысты жылулық әсер жасырын жылудың бөлінуі арқылы ескерілді, 8-ші формуламен:

$$Q_{cond} = r \cdot m_{cond}, \quad (8)$$

мұндағы r – су буының конденсациясының меншікті жасырын жылуы.

Бұл мүше жүйенің жылулық құрамын арттырады және сығу үдерісінің соңындағы газдың соңғы температурасына әсер етеді.

Жұмыс камерасындағы қысымның өзгеруі газ қоспасының күй теңдеуі арқылы 9-шы формуламен анықталды:

$$pV = m_g \cdot R \cdot T, \quad (9)$$

мұндағы R – газ қоспасының газ тұрақтысы.

Осы жұмыста газ ауа мен су буының идеал қоспасы ретінде қарастырылды, бұл қарастырылып отырған қысым мен температура диапазондары үшін рұқсат етілген жуықтау болып табылады.

Жұмыс камерасының көлемі бұрандалы роторлардың айналу кинематикасына сәйкес уақыт бойынша өзгеріп отырды. Есептеулерді жеңілдету үшін көлемнің өзгеруі аналитикалық тәуелділікпен сипатталды (10 формула):

$$V(t) = V_{max} - (V_{max} - V_{min}) \cdot \frac{t}{t_c}, \quad (10)$$

мұндағы V_{max} және V_{min} – жұмыс камерасының максималды және минималды көлемдері;

t_c – бір сығу циклының уақыты.

Мұндай жуықтау роторлардың геометриясын егжей-тегжейлі модельдеусіз-ақ сығу үдерісінде көлемнің азаюының негізгі тенденциясын дұрыс сипаттауға мүмкіндік береді.

Компрессордың энергетикалық тиімділігін бағалау үшін сығудың меншікті жұмысы көрсеткіші қолданылды, ол 11-шы формуламен анықталады:

$$L = \int p dV. \quad (11)$$

Берілген өрнекті цикл уақыты бойынша сандық интегралдау арқылы қарастырылып отырған жағдайларда газды сығуға жұмсалатын жұмысты анықтауға болады. Үдерістің тиімділігі алынған сығу жұмысын теориялық изотермиялық жұмысымен салыстыру арқылы бағаланды (12-ші формула).

$$L_{iso} = m_g R T \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right), \quad (12)$$

мұндағы p_1 және p_2 – газдың бастапқы және соңғы қысымы.

Осылайша, әзірленген математикалық модель масса және энергия сақталу теңдеулерін, газ қоспасының күй теңдеуін, конденсация шартын және газ бен май арасындағы жылу алмасуды қамтиды. Модель жұмыс камера-

сындағы қысымның, температураның және ылғал мөлшерінің өзгеруін уақыт бойынша анықтауға мүмкіндік береді.

Есептік теңдеулер жүйесі уақыт бойынша қадамдық интегралдау әдісін қолдану арқылы сандық түрде шешілді. Интегралдау қадамы газ параметрлерінің өзгерісін және конденсацияның басталу сәтін дұрыс сипаттай алатындай етіп таңдалды. Өрбір уақыт қадамында қысым, температура, су буының массалық үлесі және түзілетін сұйық фазаның мөлшері анықталды.

Модельді тексеру үшін зертханалық бұрандалы компрессор қондырғысында алынған эксперименттік деректер пайдаланылды. Қондырғы компрессор кірісі мен шығысындағы қысым мен температураны, газ шығынын және май температурасын өлшеуге мүмкіндік берді. Газдың салыстырмалы ылғалдылығы 30–80 % аралығында өзгертілді. Эксперимент нәтижелері модель параметрлерін калибрлеу және есептеу нәтижелерін салыстыру үшін қолданылды.

Ұсынылған әдістеме күрделі үшөлшемді CFD-модельдерді қолданбай-ақ ылғалды газды сығу кезінде жүретін негізгі жылу-масса алмасу және конденсация үдерістерін бағалауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

Жүргізілген есептеулер мен математикалық модельдеу нәтижелерін эксперименттік өлшеулермен салыстыру ылғалды газды сығу кезінде маймен толтырылған бұрандалы компрессордың жылулық режимі мен энергетикалық сипаттамаларына су буының конденсациясының әсерін сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік берді. Зерттеу бастапқы қысымдар диапазонында $p_1 = 0,1-0,12$ МПа, соңғы қысым $p_2 = 0,7-0,8$ МПа және газдың бастапқы температурасы $T_1 = 293-298$ К болған жағдайда жүргізілді, бұл кен өндіру және байыту процестерінде қолданылатын технологиялық газдарды дайындау жүйелеріндегі компрессорлық қондырғылардың типтік пайдалану шарттарына сәйкес келеді. Кірістегі салыстырмалы ылғалдылық 30–80% аралығында өзгертілді, бұл ылғал мөлшерінің сығу үдерісіне әсерін бағалауға мүмкіндік берді.

Талдаудың бірінші кезеңінде компрессордың жұмыс камерасындағы газ қысымы мен температурасының сығу үдерісі кезіндегі өзгеру динамикасы анықталды. Есептеулер газ қоспасының күй теңдеуін, масса сақталу теңдеуін және энергетикалық балансты қамтитын жылу-масса алмасу теңдеулер жүйесін сандық интегралдау арқылы жүргізілді (6, 7 теңдеулер).

Модельдеу нәтижелері газ құрамында ылғал болмаған жағдайда сығу үдерісіндегі температураның өсуі іс жүзінде монотонды сипатқа ие болатынын көрсетті. Бастапқы температура $T_1 = 295$ К және қысымның арту дәрежесі $\pi = p_2/p_1 = 7$ болған кезде үдеріс соңында газ температурасы $T_2 \approx 392$ К-ге жетті (1-кесте). Бұл ретте цикл бойындағы жұмыс камерасындағы газдың орташа температурасы шамамен 346 К болды.

Аталған мәндер зертханалық қондырғыда алынған эксперименттік деректермен жақсы сәйкес келеді, онда компрессордың ұқсас жұмыс жағдайларында өлшенген соңғы температура 388–395 К аралығында болды.

Кесте 1

Әртүрлі салыстырмалы ылғалдылық мәндерінде бұрандалы компрессорда ылғалды газды сығу процесінің есептік параметрлері

Table 1

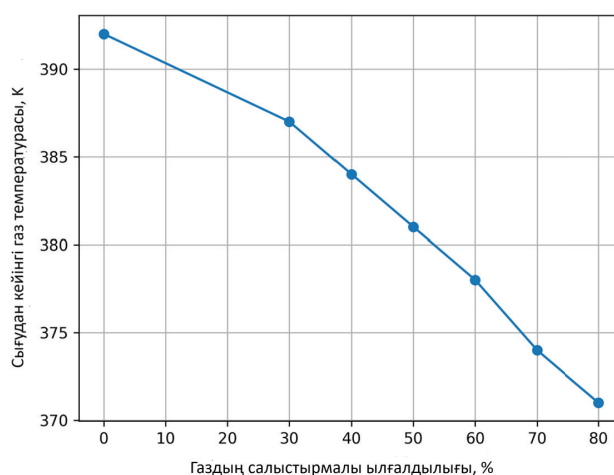
Calculated parameters of the wet gas compression process in a screw compressor at different relative humidity levels

Таблица 1

Расчетные параметры процесса сжатия влажного газа в винтовом компрессоре при различных значениях относительной влажности

Салыстырмалы ылғалдылық ϕ , %	Бастапқы температура T_1 , К	Соңғы температура T_2 , К	Конденсацияның басталу қысымы, МПа	Конденсацияның басталу температурасы, К
0	295	392	—	—
30	295	387	—	—
40	295	384	0.39	347
50	295	381	0.34	341
60	295	378	0.31	339
70	295	374	0.29	336
80	295	371	0.27	333

Газ құрамында ылғал болған жағдайда температураның өзгеру сипаты айтарлықтай өзгереді. Кірістегі салыстырмалы ылғалдылық 50% болғанның өзінде температуралық қисықтың құрғақ газ үшін алынған есептеулерден ауытқуы байқалды (1-сурет).



Сурет 1. Компрессор кірісіндегі газдың салыстырмалы ылғалдылығына байланысты сығудан кейінгі газ температурасының тәуелділігі.
Figure 1. Dependence of the final gas temperature after compression on the relative humidity of the gas at the compressor inlet.

Рис. 1. Зависимость конечной температуры газа после сжатия от относительной влажности газа на входе компрессора.

Модельге сәйкес, қысым мен температураның белгілі бір мәндеріне жеткенде қанығу шарты орындалды (4 формула). Бұл су буының конденсациясының басталуына әкелді. Есептеулер көрсеткендей, қарастырылған эксперимент жағдайында конденсацияның басталуы шамамен $p \approx 0,32-0,36$ МПа қысымда және $T \approx 338-342$ К температурада орын алды. Осы сәтте қаныққан бу қысымы шамамен $p_{sat} \approx 0,033$ МПа болды.

Конденсация басталғаннан кейін жүйенің энергетикалық балансында фазалық ауысу кезінде бөлінетін жасырын жылуға байланысты қосымша жылу ағыны пайда болды. Бұл ағын 8-ші өрнекпен сипатталды. Мұнда су үшін конденсацияның жасырын жылуы $r = 2.26 \times 10^6$ Дж/кг деп қабылданды. Конденсация жылдамдығы салыстырмалы түрде аз болғанның өзінде бұл жылулық әсер үдерістің температуралық режиміне елеулі ықпал етті.

Сандық есептеулер барысында газдың салыстырмалы ылғалдылығы 50% болған кезде конденсацияның массалық жылдамдығының максималды мәні бір жұмыс камерасының есептік көлемі үшін шамамен

$$m_{cond,max} \approx (1,1-1,4) \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}$$

деңгейіне жететіні анықталды.

Бір сығу циклы барысында конденсацияланған судың жалпы массасы шамамен $m_{cond} = 2.8 \times 10^{-5}$ кг (2-кесте) болды.

Кесте 2

Компрессордың жұмыс камерасындағы ылғалдың конденсациялану процесінің есептік сипаттамалары
Table 2

Calculated characteristics of the moisture condensation process in the compressor working chamber

Таблица 2

Расчетные характеристики процесса конденсации влаги в рабочей камере компрессора

Салыстырмалы ылғалдылық ϕ , %	Конденсацияның максималды жылдамдығы $m_{cond, max}$ кг/с	Циклдегі конденсат массасы, кг	Бөлінген жылу Q_{cond} Дж	Жылу балансындағы жылулық әсердің үлесі, %
40	$5,2 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$	34	3,8
50	$1,2 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-5}$	63	6,1
60	$1,4 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-5}$	84	7,8
70	$1,8 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-5}$	104	9,4
80	$2,1 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-5}$	140	10,7

Абсолюттік мәні аз болғанына қарамастан, осы кезде бөлінетін жылу мөлшері бір сығу циклына

$$Q_{cond} \approx 63 \text{ Дж}$$

мәніне жетті.

Алынған нәтижелер конденсация кезінде бөлінетін жылу бүркілген майдың салқындату әсерін ішінара өтейтінін көрсетті. Соның нәтижесінде конденсация басталған

нан кейін температуралық қисық біршама жайпақ сипатқа ие болады. Қарастырылған жағдайларда 50% ылғалдылық кезінде газдың соңғы температурасы $T_2 \approx 381$ К болды, бұл құрғақ газды сығу кезіндегі температурадан 11 К-ге төмен.

Салыстырмалы ылғалдылық 70%-ға дейін артқанда бұл әсер айқынырақ байқалды. Конденсацияның басталуы сәл ертерек, шамамен 0,29 МПа қысымда орын алды. Конденсацияланған судың массасы келесі мәнге дейін артты:

$$m_{cond} \approx 4,6 \times 10^{-5} \text{ кг}$$

Ал бөлінетін жылу мөлшері бір циклге шамамен 104 Дж-ға жетті. Бұл жағдайларда газдың соңғы температурасы $T_2 \approx 374$ К-ге дейін төмендеді.

Есептік және эксперименттік деректерді салыстыру нәтижелердің жақсы сәйкестігін көрсетті. Зертханалық сынақтарда 70% салыстырмалы ылғалдылық кезінде компрессор шығысындағы өлшенген температура 372–377 К аралығында болды, бұл есептік мәндерден 2,5%-дан аспайтын айырмашылықты құрайды. Мұндай ауытқу осы деңгейдегі инженерлік модель үшін рұқсат етілген деп есептеуге болады.

Алынған нәтижелер жүйедегі жылу ағындарының таралуын неғұрлым егжей-тегжейлі қарастыруға мүмкіндік береді. Есептеулер барысында газды салқындатуда негізгі үлесті маймен жылу алмасу беретіні анықталды. Газ бен май арасындағы жылу ағыны 7-ші өрнекпен анықталды. Мұнда жылу беру коэффициенті $\alpha_{gm} = 350-420$ Вт/(м²К) деп қабылданды. Қарастырылған жағдайлар үшін жұмыс камерасының бір есептік көлеміне шаққанда жылу ағынының орташа мәні шамамен 0,85–1,15 кВт болды.

Бұл ретте конденсацияның жылулық әсерінің үлесі үдерістің жалпы жылулық балансынан шамамен 6–10% құрады. Салыстырмалы түрде аз үлесіне қарамастан, бұл әсер үдерістің соңғы параметрлеріне елеулі ықпал етеді, өйткені ол тікелей қарқынды сығу аймағында жүзеге асады.

Қосымша талдау конденсацияның компрессордың меншікті жұмысына әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Сығу жұмысы 11-ші өрнекпен анықталды. Цикл уақыты бойынша сандық түрде интегралданатын өрнек арқылы. Құрғақ газ үшін меншікті жұмыс шамасы құрады

$$L_{dry} \approx 94,5 \text{ кДж/кг}$$

бұл политроптық тәуелділік бойынша жүргізілген есептеулермен жақсы сәйкес келеді (3-кесте).

Газдың салыстырмалы ылғалдылығы 50% болған кезде меншікті жұмыс келесі мәнге дейін төмендеді

$$L_{50} \approx 91,8 \text{ кДж/кг}$$

бұл шамамен 2,9%-ға төмендеуге сәйкес келеді. 70% ылғалдылық кезінде меншікті жұмыс шамасы құрады

$$L_{70} \approx 89,6 \text{ кДж/кг}$$

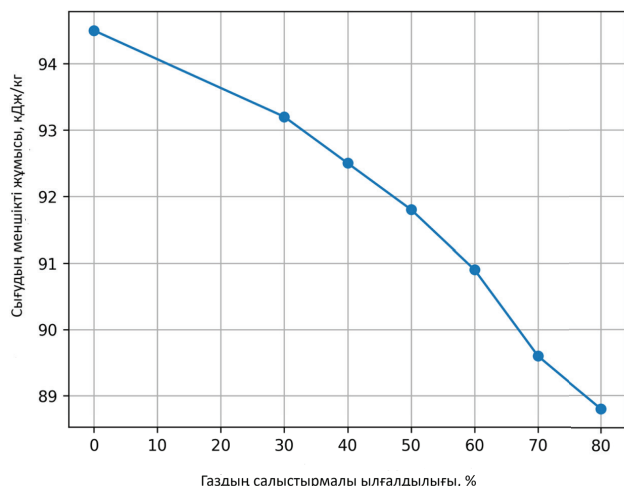
бұл құрғақ газ жағдайымен салыстырғанда шамамен 5,2%-ға төмендеуге сәйкес келеді (2-сурет).

Кесте 3
Газдың ылғалдылығының бұрандалы компрессордың энергетикалық көрсеткіштеріне әсері

Table 3
Effect of gas humidity on the energy performance of a screw compressor

Таблица 3
Влияние влажности газа на энергетические показатели винтового компрессора

Салыстырмалы ылғалдылық ϕ , %	Сығудың меншікті жұмысы L , кДж/кг	Жұмыстың төмендеуі, %	Изотермиялық жұмыс L_{iso} , кДж/кг	Изотермиялық КПД η_{iso}
0	94,5	0	81,4	0,86
30	93,2	1,4	81,4	0,87
40	92,5	2,1	81,4	0,88
50	91,8	2,9	81,4	0,89
60	90,9	3,8	81,4	0,90
70	89,6	5,2	81,4	0,91
80	88,8	6,0	81,4	0,92



Сурет 2. Маймен толтырылған бұрандалы компрессорда газдың салыстырмалы ылғалдылығының сығудың меншікті жұмысына әсері.

Figure 2. Effect of relative gas humidity on the specific compression work in an oil-injected screw compressor.

Рис. 2. Влияние относительной влажности газа на удельную работу сжатия в маслозаполненном винтовом компрессоре.

Үдерістің тиімділігін бағалау үшін компрессордың изотермиялық пайдалы әсер коэффициенті де есептелді, 13-ші формуламен:

$$\eta_{iso} = \frac{L_{iso}}{L}, \quad (13)$$

мұнда изотермиялық жұмыс 14-ші өрнек арқылы анықталды

$$L_{iso} = R \cdot T_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right). \quad (14)$$

Қарастырылып отырған жағдайлар үшін изотермиялық жұмыс шамамен 81,4 кДж/кг болды.

Есептеулер нәтижесінде құрғақ газ үшін компрессордың изотермиялық пайдалы әсер коэффициенті мынаған тең екені анықталды

$$\eta_{iso,dry} \approx 0,86$$

50% ылғалдылық кезінде бұл көрсеткіш келесі мәнге дейін артты

$$\eta_{iso,50} \approx 0,89$$

ал 70% ылғалдылық кезінде бұл көрсеткіш келесі мәнге дейін артты

$$\eta_{iso,70} \approx 0,91.$$

Осылайша, газ құрамындағы ылғалдың болуы және соған байланысты су буының конденсациясы сығу үдерісінің энергетикалық тиімділігінің белгілі бір дәрежеде артуына әкеледі. Мұның негізгі себебі – сығу барысында газ температурасының төмендеуі, бұл компрессордың меншікті жұмысын азайтады.

Қосымша талдау конденсацияның майдың температуралық режиміне әсерін анықтауға мүмкіндік берді. Есептеулерге сәйкес, жұмыс камерасындағы майдың орташа температурасы шамалы ғана артты. Ылғалдылық 30% болғанда майдың орташа температурасы шамамен $T_m = 332$ К болса, 70% ылғалдылықта ол 334 К-ге дейін көтерілді. Бұл конденсация кезінде бөлінетін жылудың бір бөлігі фазалар арасындағы жылу алмасу арқылы майға берілуімен түсіндіріледі.

Сондай-ақ газ фазасындағы су буының массалық үлесінің өзгерісі талданды. Сығу үдерісінің басында буының массалық үлесі шамамен құрады

$$Y_{v,1} \approx 0,014$$

70% салыстырмалы ылғалдылық кезінде. Сығу үдерісі аяқталып, ішінара конденсация жүргеннен кейін бұл шама келесі мәнге дейін төмендеді

$$Y_{v,2} \approx 0,008$$

бұл су буының мөлшерінің шамамен 40%-ға азаюына сәйкес келеді. Ылғалдың бір бөлігі сұйық фазаға өтіп, маймен араласты.

Талдау барысында сондай-ақ конденсацияның үдеріс параметрлеріне әсері тек белгілі бір ылғалдылық деңгейінен бастап айқын байқалатыны анықталды. Салыстырмалы ылғалдылық 35–40%-дан төмен болған жағдайда түзілетін сұйық фазаның мөлшері өте аз болады, сондықтан компрессордың энергетикалық параметрлерінің өзгеруі 1%-дан аспайды. Мұндай жағдайларда үдерісті іс жүзінде құрғақ газды сығу ретінде қарастыруға болады.

Жоғары ылғалдылық кезінде фазалық түрленулердің әсері едәуір айқын байқалады. Салыстырмалы ылғалдылық 75%-дан асқанда есептеулер конденсацияланатын судың массасының бір циклге $6,2 \times 10^{-5}$ кг-ға дейін артатынын көрсетті, алайда сығудың меншікті жұмысының одан әрі төмендеуі баяулап, базалық жағдаймен салыстырғанда 6–7%-дан аспайды.

Осылайша, жүргізілген зерттеу маймен толтырылған бұрандалы компрессордағы жылу-масса алмасу үдерістеріне су буының конденсациясының әсерін сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер газ құрамындағы салыстырмалы түрде аз мөлшердегі ылғалдың өзі сығу үдерісінің жылулық режимін елеулі өзгертіп, компрессордың энергетикалық сипаттамаларына ықпал ете алатынын көрсетті.

Әзірленген математикалық модель масса және энергия сақталу теңдеулерінің, конденсация шарттарының, күй теңдеуінің және газ бен май арасындағы жылу алмасу теңдеулерінің өзара байланысқан жүйесіне негізделген. Бұл әсерлерді инженерлік есептеулерде ескеруге мүмкіндік береді және ылғалды газдарды сығу жағдайындағы компрессорлық қондырғылардың жұмысын талдау үшін қолданылуы мүмкін.

Қорытынды

Жұмыста маймен толтырылған бұрандалы компрессорда ылғалды газды сығу кезіндегі жылу-масса алмасу және су буының конденсация үдерістерін ескеретін математикалық модель әзірленді. Ұсынылған модель компрессордың температуралық режимін және энергетикалық сипаттамаларын бағалауға мүмкіндік береді.

Есептеу және эксперименттік нәтижелер газ құрамындағы ылғалдың сығу үдерісіне елеулі әсер ететінін көрсетті. Су буының конденсациясы газ температурасын төмендетіп, сығудың меншікті жұмысын азайтады және компрессордың энергетикалық тиімділігін арттыруға ықпал етеді.

Ұсынылған тәсіл тау-кен және тау-металлургия кәсіпорындарының компрессорлық жүйелерін инженерлік талдау және энергия тиімділігін бағалау кезінде қолданылуы мүмкін.

Алғыс

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің қаржылық қолдауымен № BR24992956-ОТ-24. «Газды сығымдау үшін инновациялық жабдықтар мен технологияларды әзірлеу және құру» тақырыбы аясында жүзеге асырылды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Xiao G., Zhang Y., Liu H. Маймен толтырылған бұрандалы компрессордағы сұйық қабықша ағыны негізіндегі ішкі жылу алмасуды зерттеу // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Т. 258. – 125089 (ағылшын тілінде)
2. Wang Y., Xing Z., Peng X. Маймен толтырылған бұрандалы компрессорлардағы май тамшыларының термодинамикалық қасиеттері // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2023. – Т. 238. – № 1. – Б. 45–58 (ағылшын тілінде)
3. Basha N., Kovacevic A., Stosic N. Бұрандалы компрессорлардағы май бүрку процесін сандық зерттеу // *International Journal of Refrigeration*. – 2021. – Т. 126. – Б. 14–27 (ағылшын тілінде)
4. Екібұрандалы тоңазытқыш компрессорларының p – V диаграммаларын эксперименттік зерттеу / Н. Wu [және т. б.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2004. – Т. 24. – № 17–18. – Б. 2737–2747 (ағылшын тілінде)
5. De Paepe M., Bogaert G., Huisseune H. Маймен толтырылған бұрандалы компрессорларды май бүрку арқылы салқындату // *Applied Thermal Engineering*. – 2005. – Т. 25. – № 5–6. – Б. 829–841 (ағылшын тілінде)
6. Seshaiyah N., Jagannadha Rao V. V., Reddy P. B. Маймен толтырылған екібұрандалы компрессордың жұмыс циклін математикалық модельдеу // *Applied Thermal Engineering*. – 2007. – Т. 27. – № 8–9. – Б. 1453–1461 (ағылшын тілінде)
7. Kovacevic A., Stosic N., Smith I. K. Бұрандалы компрессорларды үшөлшемді сандық талдау // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2007. – Т. 221. – № 2. – Б. 95–108 (ағылшын тілінде)
8. Rane S., Kovacevic A., Stosic N. Айнымалы геометриялы бұрандалы компрессорлар үшін тор генерациясы және CFD талдауы // *International Journal of Refrigeration*. – 2013. – Т. 36. – № 2. – Б. 553–563 (ағылшын тілінде)
9. Peng X., Xing Z., He Z. Маймен толтырылған бұрандалы компрессорлардың жылулық сипаттамаларын эксперименттік зерттеу // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – Т. 50. – № 1. – Б. 123–130 (ағылшын тілінде)
10. Singh P. J., Singh O. Айнымалы ротор профілі бар екібұрандалы компрессордың CFD талдауы // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Т. 70. – № 1. – Б. 490–499 (ағылшын тілінде)
11. Li J., Wu H., Xing Z. Ағып кетулер мен жылу алмасуды ескере отырып, маймен толтырылған бұрандалы компрессорларды термодинамикалық модельдеу // *Applied Energy*. – 2017. – Т. 204. – Б. 1097–1108 (ағылшын тілінде)
12. Xu B., Peng X., Yan Y. Маймен толтырылған бұрандалы компрессорлардағы ағып кету ағындарын модельдеу // *International Journal of Refrigeration*. – 2019. – Т. 100. – Б. 1–12 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Xiao G., Zhang Y., Liu H. Internal heat transfer of oil-injected screw compressor from liquid film flow model // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 258. – Article 125089 (in English)
2. Wang Y., Xing Z., Peng X. Thermodynamic properties of oil droplets in oil-injected screw compressors // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 238. – No. 1. – P. 45–58 (in English)
3. Basha N., Kovacevic A., Stosic N. Numerical Investigation of Oil Injection in Screw Compressors // *International Journal of Refrigeration*. – 2021. – Vol. 126. – P. 14–27 (in English)
4. Experimental study on p – V indicator diagrams of twin-screw refrigeration compressors / Wu H. et al. // *Applied Thermal Engineering*. – 2004. – Vol. 24. – No. 17–18. – P. 2737–2747 (in English)
5. De Paepe M., Bogaert G., Huisseune H. Cooling of oil-injected screw compressors by oil atomisation // *Applied Thermal Engineering*. – 2005. – Vol. 25. – No. 5–6. – P. 829–841 (in English)
6. Seshaiyah N., Jagannadha Rao V. V., Reddy P. B. Mathematical modeling of the working cycle of an oil-injected twin-screw compressor // *Applied Thermal Engineering*. – 2007. – Vol. 27. – No. 8–9. – P. 1453–1461 (in English)

7. Kovacevic A., Stosic N., Smith I. K. Three-dimensional numerical analysis for screw compressors // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E*. – 2007. – Vol. 221. – No. 2. – P. 95–108 (in English)
8. Rane S., Kovacevic A., Stosic N. Grid generation and CFD analysis of variable geometry screw compressors // *International Journal of Refrigeration*. – 2013. – Vol. 36. – No. 2. – P. 553–563 (in English)
9. Peng X., Xing Z., He Z. Experimental investigation on thermal characteristics of oil-injected screw compressors // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – Vol. 50. – No. 1. – P. 123–130 (in English)
10. Singh P. J., Singh O. CFD analysis of twin screw compressor with variable rotor profile // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 70. – No. 1. – P. 490–499 (in English)
11. Li J., Wu H., Xing Z. Thermodynamic modeling of oil-injected screw compressors including leakage and heat transfer // *Applied Energy*. – 2017. – Vol. 204. – P. 1097–1108 (in English)
12. Xu B., Peng X., Yan Y. Leakage flow modeling in oil-injected screw compressors // *International Journal of Refrigeration*. – 2019. – Vol. 100. – P. 1–12 (in English)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Xiao G., Zhang Y., Liu H. Исследование внутреннего теплообмена в маслозаполненном винтовом компрессоре на основе модели течения жидкой пленки // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Т. 258. – Ст. 125089 (на английском языке)
2. Wang Y., Xing Z., Peng X. Термодинамические свойства масляных капель в маслозаполненных винтовых компрессорах // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2023. – Т. 238. – № 1. – С. 45–58 (на английском языке)
3. Basha N., Kovacevic A., Stosic N. Численное исследование впрыска масла в винтовых компрессорах // *International Journal of Refrigeration*. – 2021. – Т. 126. – С. 14–27 (на английском языке)
4. Экспериментальное исследование p – V диаграмм двухвинтовых холодильных компрессоров / H. Wu [и др.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2004. – Т. 24. – № 17–18. – С. 2737–2747 (на английском языке)
5. De Paere M., Bogaert G., Huisseune H. Охлаждение маслозаполненных винтовых компрессоров путем распыления масла // *Applied Thermal Engineering*. – 2005. – Т. 25. – № 5–6. – С. 829–841 (на английском языке)
6. Seshiaiah N., Jagannadha Rao V. V., Reddy P. B. Математическое моделирование рабочего цикла маслозаполненного двухвинтового компрессора // *Applied Thermal Engineering*. – 2007. – Т. 27. – № 8–9. – С. 1453–1461 (на английском языке)
7. Kovacevic A., Stosic N., Smith I. K. Трехмерный численный анализ винтовых компрессоров // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2007. – Т. 221. – № 2. – С. 95–108 (на английском языке)
8. Rane S., Kovacevic A., Stosic N. Генерация сетки и CFD-анализ винтовых компрессоров с изменяемой геометрией // *International Journal of Refrigeration*. – 2013. – Т. 36. – № 2. – С. 553–563 (на английском языке)
9. Peng X., Xing Z., He Z. Экспериментальное исследование тепловых характеристик маслозаполненных винтовых компрессоров // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – Т. 50. – № 1. – С. 123–130 (на английском языке)
10. Singh P. J., Singh O. CFD-анализ двухвинтового компрессора с переменным профилем ротора // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Т. 70. – № 1. – С. 490–499 (на английском языке)
11. Li J., Wu H., Xing Z. Термодинамическое моделирование маслозаполненных винтовых компрессоров с учетом утечек и теплообмена // *Applied Energy*. – 2017. – Т. 204. – С. 1097–1108 (на английском языке)
12. Xu B., Peng X., Yan Y. Моделирование утечек в маслозаполненных винтовых компрессорах // *International Journal of Refrigeration*. – 2019. – Т. 100. – С. 1–12 (на английском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Басканбаева Д. Д., Ph.D, «Технологиялық машиналар және газтурбиналық қондырғылар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), d.baskanbayeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-1688-0666>

Елемесов К. К., т. ғ. к., профессор, Ә. Бұркітбаев атындағы Энергетика және машинажасау институтының директоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), k.yelemessov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6168-2787>

Сарыбаев Е. Е., «Технологиялық машиналар және газтурбиналық қондырғылар» кафедрасының аға оқытушысы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), y.sarybayev@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-6665-4558>

Аппазова С. М., «Инженерингтік технологиялар» білім беру бағдарламасының аға оқытушысы Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті (Қызылорда қ., Қазақстан), saltanat1986.10@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3520-1502>

Information about the authors:

Baskanbayeva D. Dz., Ph.D, Associate Professor of the Department of Technological machines and gas turbine installations, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Yelemessov K. K., Candidate of Technical Sciences, Professor, Director of Institute of Energy and Mechanical Engineering named after A. Burkitbayev, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Sarybayev Ye. Ye., postdoctoral student of the EP «Digital Engineering of Machines and Equipment», Senior Lecturer of the Department of «Technological Machines and equipment», Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Appazova S. M., Senior Lecturer of the Educational Program «Engineering Technologies», Korkyt Ata Kyzylorda University (Kyzylorda, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Басканбаева Д. Д., Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Технологические машины и газотурбинные установки», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Елемесов К. К., к. т. н., профессор, директор Института энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Сарыбаев Е. Е., Ph.D, ст. преподаватель кафедры «Технологические машины и газотурбинные установки», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Аппазова С. М., ст. преподаватель образовательной программы «Инжиниринговые технологии», Кызылординский университет им. Коркыт Ата (г. Кызылорда, Казахстан)

Код МРНТИ 87.15.15

Е. А. Цешковская¹, *Н. К. Цой¹, Н. В. Матвиенко², А. С. Нурмаганбетова¹

¹Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан),

²ТОО «Expert PRO» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОБЫЧИ НЕРУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Аннотация. Работа посвящена исследованию экологических аспектов деятельности предприятия по открытой добыче глины в Карагандинской области. Экологические исследования актуально проводить с научно обоснованным подходом, практической оценкой и элементами программного обеспечения. Целью работы является экологическая оценка воздействия на состояние окружающей среды предприятия по открытой добыче глины для строительной отрасли. В работе изучена экологическая природная и техногенная ситуация района размещения карьера. Применялись аналитические, натурные, лабораторные методы исследований. Разработаны рекомендации по внедрению принципов замкнутого цикла (сырье – продукция – отходы – вторичное сырье), предполагающих частичное замещение природной глины вторичными строительными ресурсами региона; план мониторинга с переходом на автоматизированные интеллектуальные системы контроля качества приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: окружающая среда, карьер, экологическая обстановка, промышленные загрязнители, нормативы, воздействие, жизненный цикл.

Металл емес минералдарды өндірудің қоршаған ортаға қатысты бағалау

Аннотация. Жұмыс Карағанды облысындағы сазды ашық өндіру кәсіпорны қызметінің экологиялық аспектілерін зерттеуге арналған. Экологиялық зерттеулерді ғылыми негізделген тәсілмен, практикалық бағалаумен және бағдарламалық жасақтама элементтерімен жүргізу маңызды. Жұмыстың мақсаты-құрылыс саласы үшін ашық саз өндіретін кәсіпорынның қоршаған орта жағдайына әсерін экологиялық бағалау. Жұмыста карьерді орналастыру ауданының экологиялық табиғи және техногендік жағдайы зерттелді. Зерттеудің аналитикалық, табиғи, зертханалық әдістері қолданылды. Табиғи сазды өндіріс қайталама құрылыс ресурстарымен ішінара алмастыруды көздейтін тұйық цикл (шикізат – өнім – қалдықтар – қайталама шикізат) қағидаттарын енгізу бойынша ұсынымдар әзірленді; атмосфераның жер үсті қабатының сапасын бақылаудың автоматтандырылған зияткерлік жүйелеріне көшумен мониторинг жоспары.

Түйінді сөздер: қоршаған орта, карьер, экологиялық жағдай, өнеркәсіптік ластанушы заттар, ережелер, әсер, тіршілік циклі.

Environmental assessment of non-metallic minerals extraction

Abstract. The work is devoted to the study of environmental aspects of the company's activities for open-pit clay mining in the Karaganda region. It is important to conduct environmental research with a scientifically based approach, practical assessment and software elements. The purpose of the work is an environmental assessment of the environmental impact of an open-pit clay mining enterprise for the construction industry. The paper examines the ecological, natural and technogenic situation of the quarry area. Analytical, field, and laboratory research methods were used. Recommendations have been developed for the implementation of closed-loop principles (raw materials – products – waste – secondary raw materials), involving the partial replacement of natural clay with secondary building resources in the region; a monitoring plan with the transition to automated intelligent quality control systems for the surface layer of the atmosphere.

Key words: environment, quarry, ecological situation, industrial pollutants, regulations, impact, life cycle.

Введение

Урбанизация охватывает все большие территории. Строительство зданий, развитие предприятий по производству кирпичных, бетонных изделий чрезвычайно необходимы для экономического роста. Однако, необходимо соблюдать требования экологического законодательства по превентивным мерам для снижения негативного воздействия производства на природные ресурсы и здоровье населения. В настоящее время строительство обретаёт все большие обороты в связи с урбанизацией территорий [1, 2], что напрямую влияет на развитие сырьевой базы и влечёт за собой освоение новых месторождений нерудных полезных ископаемых (глина, песок). Открытая добыча нерудных полезных ископаемых несёт колоссальнейшую нагрузку на компоненты окружающей среды. Согласно экологическому законодательству [1], недропользователи должны внедрять наилучшие доступные технологии (НДТ) для минимизации воздействия на экосистемы и здоровье населения, проживающего вблизи промышленных территорий. Поэтому экологическая оценка весьма актуальна для планируемого производства. Обязательность проведения экологической оценки подтверждена Экологическим кодексом Республики Казахстан [1].

Производство открытых горных работ занимает огромные территории под инфраструктуру и меняет не только естественный рельеф местности, но и климатические условия, экосистемы, гидрологический режим местности. Исследование воздействия горных объектов на урбанизированных территориях представляет собой крупномасштабные работы, поэтому актуально использование методов космического зондирования и наземного исследова-

ния при помощи летательных аппаратов, что позволяет наиболее комплексно охватить большие территории [3]. Такое решение позволяет получить действительную ситуацию происходящих изменений, комплексно оценить воздействие на компоненты окружающей среды в результате ведения горных работ. Полностью исключить ущерб от ведения открытых горных работ невозможно, но минимизировать и прогнозировать воздействие на состояние окружающей среды однозначно необходимо. Поэтому на стадии разведки и проектирования открытых горных работ необходимо разработать план природоохранных мероприятий и предусмотреть непрерывный экологический мониторинг [4, 5], который будет действовать на протяжении всего периода извлечения нерудных полезных ископаемых. Процесс открытых горных работ специфичен: большое поступление в окружающую среду неорганической пыли при вскрышных работах, извлечении, дроблении горной массы, использование воды для пылеподавления, изменение гидрологического режима подземных вод, накопление больших объемов вскрышных и вмещающих пород, которые занимают огромные территории. Все это влияет и на климатические изменения рассматриваемого региона.

В настоящее время добыча нерудных полезных ископаемых является неотъемлемой частью процесса декарбонизации и снижения углеродного следа строительной отрасли [6, 7]. Ключевым направлением является постепенное замещение первичного природного сырья вторичным и промышленными отходами других производств. При внедрении в производство субститутов, комплиментов, НДТ будет происходить снижение нагрузки на экосистемы рас-

смаатриваемой территории, в целом сокращение парниковых газов, что непосредственно ведет к углеродной нейтральности. Поэтому современная экологическая оценка горной отрасли должна ориентироваться на сквозную оценку производства по схеме «сырье – продукция – отходы – вторичное сырье». Так систематизированы результаты исследований по анализу жизненного цикла (LCA) [8]. Таким образом, необходимо не только анализировать этап добычи нерудных полезных ископаемых, но и разведку, подготовку к добыче, включая процессы минимизации отходов, рекультивацию нарушенных земель и вовлечение в производство вторичных ресурсов.

Целью настоящей работы является экологическая оценка воздействия на состояние окружающей среды предприятия по открытой добыче глины для строительной отрасли. Задачами исследования являются: исследование территории расположения объекта до начала добычных работ, рассмотрение технологического процесса производства с точки зрения экологии, анализ всех источников основного и вспомогательного процессов производства, оценка эмиссий на компоненты природы, исследование промышленных отходов, качественного и количественного состава выбросов; оценка воздействия на атмосферный воздух, водные ресурсы и почвенный покров; рекомендации по ведению экологического мониторинга.

Разработанные превентивные мероприятия должны в обязательном порядке учитываться при составлении Генеральных планов развития населенных пунктов. Данный системный подход к планированию урбанизированных территорий сохранит качество жизни населения [9], баланс между развитием промышленности и состоянием окружающей среды.

Материалы и методы

Объектом исследования является горнодобывающее предприятие, расположенное в Карагандинской области: карьер по добыче нерудного полезного ископаемого (глина). Основная деятельность: извлечение и первичная подготовка глины для нужд строительной отрасли Карагандинского региона. Ближайшая жилая застройка находится приблизительно на расстоянии порядка 1000 метров от границы горного отвода. Объемы производства незначительные, следовательно, данное расстояние достаточно для минимизации прямого воздействия на население. Но при увеличении объемов производства – добычи сырья необходимо жестко контролировать санитарно-защитную зону (СЗЗ).

Для получения полной и достоверной информации в районе ведения горных работ проводилась комплексная оценка экологической ситуации. Использовались аналитические, статистические, натурные (непосредственно на местности) и лабораторные исследования отобранных образцов.

Лабораторные исследования выполнены методом атомно-эмиссионной спектрометрии, что обеспечивает высокую точность при определении валового содержания химических элементов. Для изучения воздействия на атмосферный воздух применяли газоанализатор «ГАНК». Этот прибор эффективен на предприятиях по добыче и

переработке нерудных полезных ископаемых, где дробление и транспортировка горной массы сопровождаются образованием большого количества пыли и вредных аэрозолей. Добавляют загрязнения выбросы карьерной техники (самосвалы, бульдозеры, погрузчики), работающие на дизельном топливе. В основном эти источники относятся к категории неорганизованных, поэтому газоанализатор «ГАНК» является незаменимым при проведении точечных замеров на границах участков. В таких условиях постоянный контроль воздушной среды становится ключевым фактором поддержания экологических и санитарно-гигиенических параметров в соответствии с нормативными требованиями.

Для исследований химических веществ в почве использовался Спектрофотометр ПЭ-5300ВИ. Прибор предназначен для измерения содержания химических веществ в почве на показатели фотометрическим методом: азот общий, алюминий, аммоний, бериллий, бор, гумус, железо, кобальт, магний, марганец, медь, молибден, мышьяк, нитраты, органическое вещество, селен, сульфаты, фенолы летучие, формальдегид, фосфор, цинк, сера и др. Для воспроизведения ситуации применялось программное обеспечение, позволившее моделировать реальные сценарии рассеивания загрязняющих веществ с учетом климатических региональных условий.

Для добычи нерудного полезного ископаемого и обслуживания инфраструктуры предусматриваются следующие производственные объекты: административно-бытовой комплекс (АБК), выемочно-добычной участок (непосредственно тело глиняного карьера), площадки открытого хранения и складирования извлеченного минерального сырья (глины), вспомогательный участок (склад технологических материалов для нужд предприятия), ремонтный цех для обслуживания карьерного автотранспорта и горнодобывающего оборудования.

Для снижения нагрузки на состояние окружающей среды и рационального недропользования необходимо внедрять в производство принципы замкнутого цикла. В строительной отрасли часть первичного сырья – глина – может заменяться на вторичные ресурсы, представленные шлаком, отходами в результате демонтажа зданий и сооружений, шлакоблоками, битым кирпичом. В настоящее время инновационные технологии могут перерабатывать некондиционные строительные материалы во вторичное сырье, тем самым непосредственно сокращая объемы добычи первичного сырья в карьере, продлевая срок его эксплуатации.

Для оценки воздействия производства на окружающую среду необходимо проводить исследования с рассмотрением климатических условий территории. Климатические условия Карагандинской области отличаются большим разнообразием в связи со значительной протяженностью по всем румбам. Климат области резко континентальный, сухой, что напрямую влияет на экологические риски при добыче. Высокая степень континентальности проявляется в больших годовых и суточных амплитудах температуры и в неустойчивости климатических показателей во времени (из года в год).

Метеорологические условия оказывают существенное влияние на перенос и рассеивание вредных примесей, по-

ступающих в атмосферу. Наибольшее влияние оказывает ветер, температура, рельеф местности. На формирование уровня загрязнения воздуха оказывают влияние туманы, осадки. Туман и осадки в виде дождей и снега являются защитными барьерами для распространения ксенобиотиков. Осадки способствуют задержанию, поглощают примесь не только вблизи подстилающей поверхности, но и из вышележащих наиболее загрязненных слоев воздуха.

Метеорологические характеристики и коэффициенты, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Природные метеорологические характеристики района расположения добывающего производства

Кесте 1

Өндіру нысаны орналасқан аумақтың табиғи метеорологиялық сипаттамалары

Table 1

Natural meteorological characteristics of the area where the extraction facility is located

Наименование	Величина
Коэффициент, зависящий от стратификации атмосферы, А	200
Коэффициент рельефа местности	1
Средняя максимальная температура наружного воздуха наиболее жаркого месяца года, °С	28,5
Средняя температура наружного воздуха наиболее холодного месяца, °С	-20,2
Среднегодовая роза ветров, %	
северное направление	10
северо-восточное направление	15
восточное направление	14
юго-восточное направление	11
южное направление	19
юго-западное направление	18
западное направление	8
северо-западное направление	5
Штиль, %	9
Среднегодовая скорость ветра, м/с	2,8
Скорость ветра (по средним многолетним данным), повторяемость превышения которой составляет 5%, м/с	7
Число дней с устойчивым снежным покровом за год	144
Количество дней с дождем	42
Сумма осадков за год, мм	118,9

Источники выбросов на промышленной площадке были нанесены на карту и обозначены принятой нумерацией: начиная с цифры «0» показаны организованные источники, с цифры «6» неорганизованные источники эмиссий в

атмосферу (карьер, открытые отвалы вскрышных пород, пункты пересыпки глины) (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения источников эмиссий в атмосферу (Google Earth, дата обращения февраль, 2026 г.).

Сурет 1. Атмосфераға шығарындылар көздерінің орналасу сызбасы (Google Earth, 2026 жылғы ақпандағы деректер).

Figure 1. Layout of atmospheric emission sources (Google Earth, accessed February 2026).

Результаты исследований

Технологический процесс добычи глины состоит из следующих операций:

- вскрышные работы: выемка и перемещение плодородного слоя почвы во временные бурты (для дальнейшей рекультивации), а также разработка пустых вмещающих пород, перекрывающих залежи полезной глины;
- экскавация и добыча сырья: извлечение глины с помощью экскаваторов;
- временное хранение: складирование добытого сырья для формирования запасов и частичного подсушивания на воздухе;
- погрузочно-транспортные работы: погрузочные работы и транспортировка сырья (глины) на склады строительной отрасли.

Таким образом, при ведении открытых горных работ на данном объекте действует семь источников эмиссий в атмосферу. Источники загрязнения рассматриваемого предприятия не оборудованы автоматизированными системами мониторинга. Мониторинг атмосферного воздуха на рассматриваемом предприятии осуществляется методом инструментальных замеров (для организованных источников) и расчетным методом (для неорганизованных источников).

Мониторинг воздушной среды базируется на сочетании прямых инструментальных измерений (на стационарных источниках) и расчетных методов (для мобильной техни-

ки и открытых площадок). Основные сведения об источниках выбросов и методах их производственного контроля приведены в таблице 2.

Таблица 2
Источники эмиссий в атмосферу для проведения контроля

Кесте 2
Мониторингке жататын атмосферага шығарындылар көздері

Table 2
Sources of atmospheric emissions subject to monitoring

Наименование показателей	Всего
Количество источников выбросов загрязняющих веществ	7
Организованных, из них:	3
Количество источников с автоматизированной системой мониторинга	—
Количество источников, на которых мониторинг осуществляется инструментальными замерами	2
Количество источников, на которых мониторинг осуществляется расчетным методом	1
Количество неорганизованных источников, на которых мониторинг осуществляется расчетным методом	4

В процессе освоения месторождения образуются промышленные и бытовые отходы. Концепция управления отходами базируется на принципах *reduce* (сокращение), *reuse* (повторное использование) и *recycling* (переработка). При этом повторное использование вскрышных пород и некондиционного минерального сырья является наиболее приоритетным направлением защиты земель.

Действующая на предприятии система обращения с отходами включает следующие процессы:

- расчет образования вскрышных отходов и корректировка графиков отвалообразования с учетом возможностей их полезного использования при выравнивании рельефа и рекультивации отработанных сегментов карьера;
- сбор и хранение отходов в специальных контейнерах или емкостях для временного хранения отходов;
- вывоз отходов на утилизацию и/или переработку и в места захоронения по разработанным и согласованным графикам.

Некоторая часть образующихся твердых материалов может быть использована повторно непосредственно в границах горного отвода. Например, вскрышные породы и суглинки являются отличным материалом для обратной засыпки выработанного пространства (внутреннего отвалообразования) и профилирования внутренних технологических дорог, что резко снижает площади нарушенных земель и предотвращает их ветровую эрозию. Своевременный вывоз опасных отходов на утилизацию исключает риски фильтрации токсичных веществ

(нефтепродуктов) в глубокие горизонты почв и подземные водоносные слои.

Наиболее острой экологической проблемой для открытого способа добычи сырья является воздействие на атмосферный воздух. Основные выбросы загрязняющих веществ носят неорганизованный характер и происходят при экскавации сухой глины, планировке отвалов вскрыши бульдозерами, сдувании мелкодисперсных фракций ветром со складов временного хранения и, в наибольшей степени, при движении тяжелых самосвалов по грунтовым карьерным дорогам. Кроме того, постоянным источником загрязняющих веществ, таких как сажа, оксид азота, углерод и сера, является работа дизельного карьерного транспорта.

Для оперативного реагирования на негативное изменение качества атмосферного воздуха предприятию необходимо производственный экологический контроль и мониторинг. Для исследуемого предприятия предлагается следующий процесс мониторинга (таблица 1).

План проведения экологического мониторинга за загрязнениями и выбор контрольных точек, а также выбор контролируемых веществ необходимо проводить с учетом геоэкологических параметров, в том числе климата, направления ветра, рельефа. Таким образом, таблица 3 будет варьироваться по виду и количеству загрязняющих веществ, периодичности отбора проб.

Таблица 3
Контроль за источниками выбросов от исследуемого объекта

Кесте 3
Зерттелетін нысандағы шығарындылар көздеріне мониторинг жүргізу

Table 3
Monitoring of emission sources at the facility under study

Контролируемый загрязнитель	Периодичность контроля	Периодичность контроля в периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ)
0301 Азот (IV) диоксид (азота диоксид)	Ежеквартально	1 раз в сутки
0304 Азот (II) оксид (азота оксид)	Ежеквартально	1 раз в сутки
0330 Сера диоксид (ангидрид сернистый, сернистый газ, Сера (IV) оксид)	Ежеквартально	1 раз в сутки
0337 Углерод оксид (окись углерода, угарный газ)	Ежеквартально	1 раз в сутки
2908 Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния в %: 70–20 (шамот, цемент, пыль цементного производства)	Ежеквартально	1 раз в сутки

Важно также отметить, что карьер находится в зоне резко континентального климата Карагандинского региона с большой ветровой нагрузкой, поэтому замеры необходимо проводить на границе СЗЗ с учетом направления и скорости ветра. Данное условие проведения замеров позволит выявлять реальные зоны запыления, оценивать дальность переноса пылевого загрязнения и своевременно принимать меры по пылеподавлению (например, орошение дорог водой) еще до того, как облако пыли достигнет селитебной зоны.

Обсуждение результатов

В настоящее время необходимо проведение объективной экологической оценки любого производственного процесса, в частности, ведения открытой добычи нерудного минерального сырья при снижении экологической нагрузки на ландшафты в регионах с неустойчивыми климатическими условиями. Полученные исследования включают не только описание текущего влияния ведения открытых горных работ на состояние окружающей среды, но и дают полную картину связи карьера с компонентами окружающей среды (рассеивание эмиссий в атмосферном воздухе, накопление загрязняющих веществ в почве). Таким образом, в работе детально рассмотрен полный цикл миграции загрязняющих веществ: от начала их выделения при экскавации или движении транспорта, рассеивания в приземном слое атмосферы и до их конечного накопления в почвенном покрове вокруг горного отвода. Такой комплексный подход позволяет перевести управление недропользованием по схеме замкнутого цикла: «подготовка недр – извлечение запасов – минимизация отходов – рекультивация нарушенных земель».

В результате исследований были определены параметры рассеивания загрязняющих веществ, адаптированные к неустойчивым метеорологическим условиям Карагандинского региона. Достоинством данного исследования являются следующие практические рекомендации:

- *частичное использование вторичных ресурсов (замещение первичного минерального сырья). Сокращение извлечения первичного сырья за счет использования в качестве вторичного сырья отходов рассматриваемого региона (шлак, зола, бетонные отходы). Данный подход напрямую решает, как минимум две экологические задачи: снижает нагрузку на земельные ресурсы Карагандинского региона, сдерживая увеличение площадей карьеров и отвалов; сокращение добычи глины (первичного сырья), что является одним из условий выполнения декарбонизации производства;*

- *проведение инструментального экологического контроля и внедрение перманентного онлайн экологического мониторинга. Данное мероприятие позволит предприятию быстро реагировать на погодные изменения. Например, по дополнительному орошению дорог или временному приостановлению вскрышных работ при наступлении НМУ.*

Данные исследования отличаются от аналогичных, направленных на исследования влияния выбросов от печей обжига [10, 11], и заключаются в комплексной экологической оценке, где учитываются как организованные, так и неорганизованные источники выбросов. В нашем же случае акцент сделан на комплексную оценку горнодобыва-

ющего сектора, где основными источниками загрязнения являются неорганизованные (работа карьерного транспорта, дефляция бортов карьера и отвалов).

Данная работа принципиально отличается от большинства родственных исследований, которые традиционно концентрируются на выбросах перерабатывающих заводов (например, на выбросах обжиговых печей кирпичных или цементных производств). Наш фокус смещен в сторону комплексной оценки горнодобывающего звена, где доминируют неорганизованные, динамически меняющиеся источники эмиссий (запыление от движения тяжелой техники, дефляция бортов карьера и отвалов).

Ученые Ignacio Zabalza, Antonio Valero, Alfonso Aranda-Usón [11] детально анализировали жизненный цикл минерального сырья для строительной отрасли в условиях мягкого, европейского климата, а настоящие исследования полностью адаптированы к условиям резко континентального климата. Климат Центрального Казахстана характеризуется наличием ветровой нагрузки, значительных суточных перепадов температуры, недостаточного количества осадков, что способствует интенсивному процессу пылеобразования на открытых площадках.

Дальнейшие исследования будут направлены на поиск технологий для безопасной рекультивации выработанного карьерного пространства с использованием промышленных отходов рассматриваемого региона. Основной проблемой в данном случае будет изменчивость химического и гранулометрического состава техногенного сырья. Кроме того, важным аспектом является выработка механизма по обязательному внедрению планов рекультивации нарушенных горными работами земель в Генеральные планы развития урбанизированных территорий.

Заключение

В результате проведенных комплексных экологических исследований по добыче нерудного минерального сырья (глины) были разработаны практические рекомендации и мероприятия, направленные на снижение техногенной нагрузки на компоненты окружающей среды Карагандинского региона.

В качестве защитных мер по снижению негативного воздействия добывающего предприятия на состояние окружающей среды рекомендуется:

- *постоянный контроль над функционированием оборудования и проведение замеров на организованных источниках эмиссий (аспирационные системы, котельная и др.);*

- *неорганизованные источники эмиссий, такие как склады временного хранения глины, обустроить, например, ветрозащитными экранами; внутрикарьерные дороги и отвалы орошать растворами химических реагентов для пылеподавления;*

- *на границе санитарно-защитной зоны предусмотреть проведение замеров по выбранным маркерным веществам, характерным для открытых горных работ и карьерной техники: пыль неорганическая, оксиды углерода, азота, серы.*

Существующую систему производственного мониторинга рекомендуется модернизировать путем внедрения автоматизированных интеллектуальных средств измерения качества воздуха на основе следующих правил (таблица 4).

Таблица 4

Условия модернизации существующей системы производственного мониторинга

Кесте 4

Қолданыстағы өндірістік мониторинг жүйесін жаңғырту шарттары

Table 4

Conditions for modernizing the existing production monitoring system

Показатель	Правила, учитывающие характер рассеивания
Высота источника	Чем выше труба, тем больше расстояние рассеивания. Классификация: высокие ($H \geq 50$ м), средние ($H = 10-50$ м), низкие ($H = 2-10$ м), наземные ($H \leq 2$ м)
Температура выбросов	Горячие выбросы ($\Delta T > 5^\circ \text{C}$) поднимаются выше и рассеиваются интенсивнее холодных
Скорость ветра	Определяет опасную скорость ветра (U_m), при которой приземная концентрация максимальна. Слабый ветер способствует накоплению загрязняющих веществ внутри карьера, а штормовой ветер резко усиливает сдувание пыли с отвалов
Метеоусловия	Температурная стратификация, туманы, инверсии – при инверсии рассеивание резко ухудшается
Рельеф местности	Локальные неровности выработанного пространства и отвалов изменяют направление воздушных потоков. На прилегающей равнинной местности поправка на рельеф принимается минимальной ($\eta = 1$).
Характеристика источника	Диаметр устья, скорость выброса, объем газовойздушной смеси (V_t) влияют на начальный подъем факела
Физико-химические свойства	Коэффициент F (1...3) учитывает скорость оседания: газы ($F = 1$), мелкодисперсная пыль ($F = 2$), крупная пыль ($F = 3$)

В качестве рекомендации, которая применима для всех предприятий Карагандинского региона и даже Центрального Казахстана является озеленение границы санитарно-защитной зоны (создание «зеленого фильтра» по всему периметру СЗЗ), прилегающей к предприятию. Особенно эта рекомендация касается горнодобывающих предприятий, расположенных в суровых климатических условиях Центрального Казахстана. Частые многорядные посадки засухоустойчивых деревьев и кустарников (вяз мелколист-

ный, лох узколистный, тополь серебристый) выполняют важнейшую экологическую функцию. Такие «зеленые фильтры» будут сдерживать скорость ветра, задерживать глиняную пыль. Все это будет способствовать улучшению качественного состояния окружающей среды. Экологические риски, такие как увеличение распространения облака выбросов от производства, увеличение выбросов в период неблагоприятных метеорологических условий будут минимизированы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экологический кодекс Республики Казахстан: Кодекс Республики Казахстан от 2 января 2021 года № 400-VI ЗРК (на русском языке)
2. García-Machado J. J., Martínez-Ávila M. Экологические показатели и «зеленая культура»: опосредующий эффект «зеленых» инноваций. Применение в автомобильной промышленности // Sustainability. – 2019. – Т. 11. – № 18. – Ст. 4874 (на английском языке)
3. Применение беспилотных летательных аппаратов в области гидрографических исследований / П. С. Шпаков [и др.] // Вестник Академии гражданской авиации. – 2022. – № 1 (24). – С. 8–13 (на русском языке)
4. Экологические требования при проектировании и строительстве объектов / В. Н. Азаров [и др.] // Вестник Евразийской науки. – 2018. – № 10 (6). – Ст. 96SAVN618 (на русском языке)
5. Полякова Т. В., Сайбель А. В., Халезин С. В. Строительство и экология // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4–2 (23). – С. 204–206 (на русском языке)
6. Snellings R., Suraneni P., Skibsted J. Будущие и появляющиеся дополнительные цементующие материалы // Cement and Concrete Research. – 2023. – Т. 171. – Ст. 107199 (на английском языке)
7. Oke J. A., Abuel-Naga H., Leong E.-C. Декарбонизация в строительстве с использованием дополнительных цементных материалов и технологии ускоренной карбонизации – обзор // International Journal of Sustainable Engineering. – 2024. – № 18 (4). – С. 392–413 (на английском языке)
8. Rhaouti Ya., Taha Ya., Benzaazoua M. Оценка экологических характеристик смесевых цементов с точки зрения жизненного цикла: Систематический обзор // Sustainable Production and Consumption. – 2023. – Т. 23. – С. 32–48 (на английском языке)
9. Манжилевская С. Е., Петренко Л. К., Шиндиян Г. А. Систематизация мероприятий по охране и улучшению окружающей среды г. Ростова-на-Дону // Вестник Евразийской науки. – 2019. – Т. 11. – № 3. – Ст. 62SAVN319 (на русском языке)
10. Влияние производства печей для обжига кирпича на окружающую среду и здоровье человека в Пакистане / M. W. Khan [и др.] // Sci Total Environ. – 2019. – № 678. – С. 383–389 (на английском языке)
11. Zabalza I., Valero A., Aranda-Usón A. Оценка жизненного цикла строительных материалов: сравнительный анализ энергетического воздействия на окружающую среду и оценка потенциала повышения экологической эффективности // Building and Environment. – 2011. – № 46 (54). – С. 1133–1140 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Қазақстан Республикасының Экология кодексі: Қазақстан Республикасының 2021 жылғы 2 қаңтардағы № 400-VI ҚРЗ Кодексі (орыс тілінде)
2. García-Machado J.J., Martínez-Ávila M. Қоршаған ортаны қорғау және жасыл мәдениет: жасыл инновацияның делдалдық әсері. Автомобиль өнеркәсібіне қолданылуы // Sustainability. – 2019. – № 11 (18). – 4874 (ағылшын тілінде)

3. Гидрографиялық зерттеулерде пилотсыз ұшу аппараттарын пайдалану / П. С. Шпаков [және т. б.] // Азаматтық авиация академиясының хабаршысы. – 2022. – № 1 (24). – Б. 8–13 (орыс тілінде)
4. Нысандарды жобалау және салу кезіндегі экологиялық талаптар / В. Н. Азаров [және т. б.] // Еуразия ғылымының бюллетені. – 2018. – № 10 (6). – 96SAVN618 (орыс тілінде)
5. Полякова Т. В., Сайбель А. В., Халезин С. В. Құрылыс және экология // Донның инженерлік хабаршысы. – 2012. – № 4–2 (23). – Б. 204–206 (орыс тілінде)
6. Snellings R., Suraneni P., Skibsted J. Болашақ және жаңадан пайда болатын қосымша цемент материалдары // Cement and Concrete Research. – 2023. – Т. 171. – 107199 (ағылшын тілінде)
7. Oke J. A., Abuel-Naga H., Leong E.-C. Құрылыста қосымша цемент материалдарын және жеделдетілген көміртектеу техникасын қолдана отырып, көміртексіздендіру – шолу // International Journal of Sustainable Engineering. – 2024. – № 18 (4). – Б. 392–413 (ағылшын тілінде)
8. Rhaouti Ya., Taha Ya., Benzaazoua M. Аралас цементтердің қоршаған ортаға әсерін өмірлік цикл тұрғысынан бағалау: жүйелі шолу // Sustainable Production and Consumption. – 2023. – Т. 23. – Б. 32–48 (ағылшын тілінде)
9. Манжилевская С.Е., Петренко Л.К., Шиндиян Г. А. Ростов-на-Дону қоршаған ортасын қорғау және сақтау шараларын жүйелеу // Еуразия ғылымының бюллетені. – 2019. – № 3. – Т. 11. – 62SAVN319 (орыс тілінде)
10. Пәкістандағы кірпіш нештері өнеркәсібінің қоршаған орта мен адам денсаулығына әсері / М. W. Khan [және т. б.] // Sci Total Environ. – 2019. – № 678. – Б. 383–389 (ағылшын тілінде)
11. Zabalza I., Valero A., Aranda-Usón A. Құрылыс материалдарының өмірлік циклін бағалау: энергетикалық және қоршаған ортаға әсерді салыстырмалы талдау және экологиялық тиімділікті арттыру әлеуетін бағалау // Building and Environment. – 2011. – № 46 (54). – Б. 1133–1140 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Ekologicheskie kodeksy Respubliki Kazakhstan: Kodeksy Respubliki Kazakhstan ot 2 yanvarya 2021 goda № 400-VI ZRK [Ecological Code of the Republic of Kazakhstan: The Code of the Republic of Kazakhstan dated January 2, 2021 No. 400-VI] (Russian)
2. Garcia-Machado J. J., Martinez-Ávila M. Environmental Performance and Green Culture: The Mediating Effect of Green Innovation. An Application to the Automotive Industry // Sustainability. – 2019. – No. 11 (18). – Article 4874 (English)
3. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v oblasti gidrograficheskikh issledovaniy [Introduction of unmanned aerial vehicles in the region of hydrographic research] P. S. Shpakov et al. Vestnik Akademii grazhdanskoi aviatsii [Bulletin of the Academy of Civil Aviation]. – 2022. – No. 1 (24). – P. 8–13 (Russian)
4. Ekologicheskie trebovaniya pri proektirovaniy i stroitel'stve ob'ektov [Environmental considerations for the design and construction of objects] V. N. Azarov et al. Vestnik Evraziiskoi nauki [Vestnik of Eurasian National University]. – 2018. – No. 10 (6). – 96SAVN618 (Russian)
5. Polyakova T. V., Saibel A.V., Khalezin S. V. Stroitel'stvo i ekologiya [Construction and ecology]. Inzhenernyi vestnik Dona [Engineering Journal of Don]. – 2012. – No. 4–2 (23). – P. 204–206 (Russian)
6. Snellings R., Suraneni P., Skibsted J. Future and emerging supplementary cementitious materials // Cement and Concrete Research. – 2023. – Vol. 171. – Article 107199 (English)
7. Oke J. A., Abuel-Naga H., Leong E.-C. De-carbonizing in construction using supplementary cementitious materials and accelerated carbonation technique – A review // International Journal of Sustainable Engineering. – 2024. – No. 18 (4). – P. 392–413 (English)
8. Rhaouti Ya., Taha Ya., Benzaazoua M. Assessment of the Environmental Performance of Blended Cements from a Life Cycle Perspective: A Systematic Review // Sustainable Production and Consumption. – 2023. – Vol. 23. – P. 32–48 (English)
9. Manzhilevskaya S. E., Petrenko L. K., Shindiyan G. A. Sistematizatsiya meropriyatiy po okhrane i uluchsheniyu okruzhayushchei sredy g. Rostova-na-Donu [Systematization of events in the region and seduction of the surrounding regions of Rostov-on-Don]. Vestnik Evraziiskoi nauki [Bulletin of Eurasian scientific]. – 2019. – No. 3. – Vol. 11. – Article 62SAVN319 (Russian)
10. Impact of brick kilns industry on environment and human health in Pakistan / M. W. Khan et al. // Sci Total Environ. – 2019. – No. 678. – P. 383–389 (English)
11. Zabalza I., Valero A., Aranda-Usón A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential // Building and Environment. – 2011. – No. 46 (54). – P. 1133–1140 (English)

Сведения об авторах:

Цешковская Е. А., Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Промышленная безопасность и экология», Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан), elena_tsesh@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0330-3325>

Цой Н. К., к. т. н., ассоциированный профессор кафедры «Промышленная безопасность и экология», Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан), zoinat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5682-930X>

Матвиенко Н. В., научный руководитель научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, ТОО «Expert PRO» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), n.matvienko@expertpro.kz; <https://orcid.org/0009-0006-2622-0732>

Нурмаганбетова А. С., магистрант кафедры «Промышленная безопасность и экология», гр. БЖДМ-25-2, Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан), areweere123@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-4824-9246>

Авторлар туралы мәліметтер:

Цешковская Е. А., Ph.D, «Өнеркәсіптік қауіпсіздік және экология» кафедрасының доценті, Әбілқас Сағынов Қарағанды техникалық университеті (Қарағанды қ., Қазақстан)

Цой Н. К., т. ғ. к., «Өнеркәсіптік қауіпсіздік және экология» кафедрасының доценті, Әбілқас Сағынов Қарағанды техникалық университеті (Қарағанды қ., Қазақстан)

Матвиенко Н. В., Ғылыми-зерттеу және тәжірибелік-конструкторлық жұмыстардың ғылыми жетекшісі, «Expert PRO» ЖШС (Өскемен қ., Қазақстан)

Нурмаганбетова А. С., «Өнеркәсіптік қауіпсіздік және экология» кафедрасының магистрі, гр. БЖДМ-25-2, Әбілқас Сағынов Қарағанды техникалық университеті (Қарағанды қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Teshkovskaya Ye. A., Ph.D, Associate Professor of the Department of Industrial Safety and ecology, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)

Tsoy N. K., k. t. s., Associate Professor of the Department of Industrial Safety and ecology, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)

Matvienko N. V., Scientific director of research and development activities, «Expert PRO» LLP (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Nurmaganbetova A. S., Master's student of the Department of Industrial Safety and Ecology, gr. BZhDM-25-2, Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ И УСЛОВИЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ в редакцию периодического печатного издания «Горный журнал Казахстана»

1. «Горный журнал Казахстана» принимает к публикации оригинальные статьи научного и научно-технического содержания, отражающие результаты исследовательской и научной деятельности, имеющие рекомендации к практическому применению решаемых вопросов, а также статьи обзорного характера, отвечающие критериям первичной научной публикации (полный перечень рубрик указан на сайте *minmag.kz*).

2. Основные требования к статьям, представленным для публикации в журнале:

- набор статьи производится в текстовом редакторе Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем с полуторным интервалом;
- общий объем статьи, включая рисунки, таблицы, метаданные не должен превышать 8 печатных страниц;
- статьи (за исключением обзоров), должны содержать новые научные результаты;
- статья должна соответствовать тематике (см. п. 1), научному уровню журнала;
- статья должна быть оформлена в полном соответствии с требованиями, отраженными в п. 3;
- статья может быть представлена на казахском, русском или английском языке;
- в редакцию представляется окончательный, **тщательно выверенный вариант** статьи, исключающий необходимость постоянных доработок текста на этапах издательского процесса;
- перед отправкой статьи в редакцию журнала авторам необходимо проверить текст на предмет отсутствия плагиата.

3. Структура статьи должна содержать следующие разделы:

- код МРНТИ (ГРНТИ <http://grnti.ru/?p1=52>) – шестизначный;
- название статьи (сокращения не допускаются, не допускается использование аббревиатур и формул; максимальное количество слов 10-12) должно быть информативным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы, предоставляется на казахском, русском и английском языках;
 - инициалы и фамилии авторов; статья должна иметь не более 4 авторов; знаком «*» указывается автор-корреспондент;
 - сведения о каждом авторе (ученая степень, ученое звание, должность, место основной работы, город, страна, контактные данные (адрес электронной почты), ORCID ID) предоставляются на казахском, русском и английском языках;
 - полное название организации (-й), где работают авторы (с указанием ведомственной принадлежности);
 - аннотация в соответствии с требованиями международных баз данных должна достаточно полно раскрывать содержание статьи, включая характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению материалами. Аннотация предоставляется на казахском, русском и английском языках объемом не менее 700 и не более 900 символов;
 - ключевые слова в количестве 6...10 устойчивых словосочетаний, по которым в дальнейшем будет выполняться поиск статьи (сокращения и аббревиатуры не допускаются): ключевые слова отражают специфику темы, объект и результаты исследования и предоставляются на казахском, русском и английском языках;
 - текст статьи, содержащий следующие разделы (введение, методы/исследования, результаты, обсуждение результатов, заключение/ выводы);
 - список использованных источников (10...12), в том числе не менее 3 зарубежных не ранее 2015 года, предоставляется на казахском, русском и английском языках.

РИСУНКИ должны иметь расширение графических редакторов CorelDraw, Photoshop, Illustrator и т. п.). Фотографии должны быть предельно четкими в графическом формате (TIFF, JPEG, CDR) с разрешением не менее 300 dpi. Все буквенные и цифровые обозначения на рисунках необходимо пояснить в основном или подрисуночном текстах. Надписи и другие обозначения на графиках и рисунках должны быть четкими и легко читаемыми. **ПОДПИСИ К РИСУНКАМ** и **ЗАГОЛОВКИ ТАБЛИЦ ОБЯЗАТЕЛЬНЫ**. Оформляются отдельным блоком на казахском, русском и английском языках.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ следует набирать в формульном редакторе MathTypes Equation или MS Equation, греческие и русские буквы в формулах набирать прямым шрифтом (опция текст), латинские – курсивом. **Обозначения величин и простые формулы в тексте и таблицах набирать как элементы текста** (а не как объекты формульного редактора). Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в последующем изложении. Нумерация формул сквозная.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ составляется в порядке цитирования и оформляется в строгом соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008. Ссылки на литературу в тексте отмечаются по мере их появления порядковыми номерами в квадратных скобках. Список приводится на казахском, русском и английском языках с указанием в скобках оригинала публикации. Образец оформления литературы и транслитерации размещен на сайте *minmag.kz*.

4. Условия приобретения журналов авторами.

С автором(ами) заключается договор о приобретении 10 (десяти) экземпляров журнала согласно установленным расценкам на текущий год, которые он(они) имеют право распространять среди горной общественности. После оплаты статья публикуется в номере журнала согласно очередности.