

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](mailto: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](mailto:karimov20-13@mail.ru)

Российская Федерация, Сибирский регион –  
 ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ ШАПОШНИК  
[shaposhnikyury@mail.ru](mailto: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 30.05.2026 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»



#### Главный редактор

М.Ж. БИТИМБАЕВ, [mbitimbaev@mail.ru](mailto:mbitimbaev@mail.ru)

#### Заместитель гл. редактора

Л.А. КРУПНИК, [leonkr38@mail.ru](mailto:leonkr38@mail.ru)

#### Заместитель гл. редактора

Х.А. ЮСУПОВ, [yusupov\\_kh@mail.ru](mailto:yusupov_kh@mail.ru)

#### Ответственный редактор

Т.С. ДОЛИНА, [Tatyana.Dolina@interrin.kz](mailto: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                                                                                                                                                                            |
| 4  | Конвейеры против дорог                                                                                                                                                                                |
| 5  | Эффективная перевозка сырья к заводу, обогатительной фабрике, готовой продукции к жд-станции или порту                                                                                                |
| 5  | Главное мероприятие, посвященное сере, пройдет в Алматы, Казахстан, с 9 по 11 июня 2026 года                                                                                                          |
|    | <b>Новости ESAB в Центральной Азии</b>                                                                                                                                                                |
| 6  | Формула ESAB: обучить, оснастить, защитить                                                                                                                                                            |
|    | <b>Геология</b>                                                                                                                                                                                       |
| 9  | <i>Е. Т. Ескалиев, *М. Е. Рахымбердина, К. Вах, Р. Шульц</i><br>Картирование пегматитовых изменений с использованием спектральных соотношений ASTER в Калба-Нарымской зоне Восточного Казахстана      |
|    | <b>Геомеханика</b>                                                                                                                                                                                    |
| 15 | <i>Г. С. Мадимарова, *Д. Н. Сулейменова, Т. Б. Нурпеисова, А. Е. Ормамбекова</i><br>Геомеханическое моделирование и управление устойчивостью горного массива в прибортовой зоне карьера               |
| 24 | <i>E. R. Khalikova, *A. E. Zhumabekova, V. F. Demin, D. S. Syzdykbaeva</i><br>Study of the production mine workings stability supported at the boundary with the mined-out space of the working faces |
|    | <b>Металлургия</b>                                                                                                                                                                                    |
| 32 | <i>Т. А. Чепуштанова, *Ә. Ж. Алтымышбаева, Е. С. Меркибаев, Б. Мишра</i><br>Термодинамическое прогнозирование процессов хлоридовозгонки пиритно-кобальтовых концентратов                              |
| 38 | <i>*Zh. K. Saulebek, R. T. Toleukadyr, Zh. O. Sadyk, Onuralp Yucel</i><br>Carbon-free smelting of chrome-containing ferroalloy using ferroalumosilicocalium and ferrosilicochrome dust                |
| 45 | <i>Н. К. Досмухамедов, Н. К. Айтенов, Л. И. Дитятковский, *Е. Е. Жолдасбай</i><br>К технологии переработки многокомпонентного техногенного сырья Баялдырского хвостохранилища                         |
|    | <b>Обогащение полезных ископаемых</b>                                                                                                                                                                 |
| 53 | <i>*А. М. Шаханов, М. Б. Барменишинова, Н. Токенов</i><br>Внедрение экспресс-рентгенофлуоресцентного анализа неистертых проб для оперативного контроля флотационного обогащения медных руд            |
| 59 | <i>Л. Б. Сабирова, А. Р. Мамбеталиева, *С. Қалиасқар, Т. Ш. Тусунбекова</i><br>Исследование влияния селективного реагента на окисленную часть лежалых хвостов                                         |
|    | <b>Бурение скважин</b>                                                                                                                                                                                |
| 64 | <i>Г. С. Бекбаева, Е. Т. Боташев, Г. М. Эфендиев, *М. К. Жантасов</i><br>Тұрақсыз сазды тау жыныстарында ұңғымалар салуға арналған ингибирлеуші бұрғылау ерітінділері                                 |
|    | <b>Нефтегазовое дело</b>                                                                                                                                                                              |
| 70 | <i>А. Н. Багиров, *Д. С. Рустамзаде, *А. Б. Расулзаде</i><br>Суперзвуковое охлаждение природного газа на газорегулирующей станции с целью его очистки                                                 |
|    | <b>Геоэкология</b>                                                                                                                                                                                    |
| 76 | <i>Н. Н. Мусахан, *Ы. Жакылбек, Н. Жеткергенқызы, М. Савут</i><br>Ақбақай кен орнының геоэкологиялық жағдайын спутниктік және зертханалық әдістермен бағалау                                          |
| 82 | Акылжан Масымханович Бейсебаев. К 90-летию со дня рождения                                                                                                                                            |
| 84 | Требования к оформлению и условия предоставления статей                                                                                                                                               |



## КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



**Марат  
Жакупович  
Битимбаев**  
*главный редактор*

*Дорогие читатели!  
Уважаемые члены редколлегии!*

Майский номер всегда напоминает о беспримерном подвиге советского народа, который ценой жизни 27 миллионов своих сыновей и дочерей спас мировую цивилизацию от фашистской нечисти, сохранив для нас нашу любимую Родину. Теперь, проживая в суверенном Казахстане, мы в эти скорбные дни отдаем дань памяти 600 тысячам наших родственников, которые ушли от нас навсегда, оставшись спать вечным сном на полях сражений вплоть до Северной Европы, Франции, Италии.

Наш народ, умеющий себя защищать и родивший батыров, чьи имена навсегда остались в наших сердцах как пример мужества и отваги, помнит их и гордится ими. Вот некоторые из них: Нуркен Абдиров, Толеген Тохтаров, Маншук Маметова, Алия Молдагулова, Султан Баймагамбетов, Изгутты Айтыков, 15 воинов из Казахстана, убитых фашистами в концлагере Энгелой в Норвегии, Бауыржан Момышулы и Малик Габдуллин, Сагадат Нурмагамбетов, Сейтхан Темирбаев, дважды Герои Советского Союза Талгат Бегельдинов, Сергей Луганский, Леонид Беда, Иван Павлов.

Героями Советского Союза стали 499 казахстанцев, из них 99 казахов, 110 казахстанцев награждены орденом Славы трех степеней.

Прошел 81 год после Великого Дня Победы 9 Мая 1945 г., и этот праздник в Казахстане встречают 96 ветеранов Великой Отечественной Войны, 16630 ветеранов, приравненных по льготам к ветеранам ВОВ, 26580 ветеранов боевых действий на территории других государств, 37626 тружеников тыла в годы ВОВ – всего 80932 ветерана, им страна воздаст в этот день почести, которых заслужили миллионы казахстанцев на линии огня, на мирных полях колхозов и совхозов, в забоях рудников и угольных шахт, у станков и доменных печей.

Мы их не забудем, мы будем всегда готовы повторить их подвиг, мы не дадим повторить фашистам свои желания владеть нашими полями и степями.

Залогом тому – дружба и чувство родства, объединяющее нас – казахстанцев более 100 национальностей, проживающих на мирной земле нашей общей Родины.

# КОНВЕЙЕРЫ ПРОТИВ ДОРОГ

**ЭФФЕКТИВНАЯ ПЕРЕВОЗКА СЫРЬЯ К ЗАВОДУ, ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКЕ, ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ К ЖД-СТАНЦИИ ИЛИ ПОРТУ**

Кто из собственников не мечтал о надежной и недорогой логистике для своего предприятия? Возьмем, к примеру, цементную отрасль.

Транспортная составляющая в себестоимости цемента (включая доставку сырья) занимает более **12%**, при этом логистические издержки постоянно растут из-за подорожания железнодорожных тарифов и автоперевозок. Добыча и транспортировка основных сырьевых материалов (известняк, глина) до завода составляет существенную часть производственных расходов.

Совокупные темпы роста затрат на доставку цемента автомобильным транспортом приближаются к 30% вследствие роста стоимости топлива, штрафов за нарушения ПДД, в том числе за превышение разрешенной массы автопоезда, повышения утилизационного сбора за новые машины, периодических сезонных закрытий дорог.

Длинные ленточные конвейеры – отличная альтернатива автотранспорту, они обеспечивают регулярность транспортировки сырья/клинкера, давая предприятию больше независимости от внешних факторов. Они снижают транспортную составляющую в себестоимости цемента на 30–60%. А в некоторых случаях конвейер – единственное решение для предприятия. И такая ситуация во многих странах.

Представьте себе, небольшая европейская страна Бельгия. Цементный завод Holcim Belgium в местечке Горэн-Рамекруа (Gaugain-Ramescroix). Это маленький округ с населением около 3,5 тысяч человек, входящий в коммуну Турнэ (Tournai). Расстояние до карьера известняка менее 2,5 км. Казалось бы, все под боком, но дорога проходит в 300 м от жилых домов. А это означает полный запрет на грузовой автотранспорт и строгие ограничения по шуму (не более 55 Db днем и 45 Db ночью).

Что же делать? Решение есть: длинный конвейер. Но на прямую трассу проложить невозможно, на пути глубокий карьер. Является ли это непреодолимым препятствием? Для профессионалов – нет. Французская фирма RBL-REI уже решала сложную задачу на соседнем карьере для тогда еще Лафаржа и строила двухкилометровый конвейер с двумя несущими лентами. Таким образом, цементный завод уже имеет положительный опыт эксплуатации длинного ленточного конвейера. И сегодня RBL-REI приходит на помощь и прокладывает трассу С-образной формы 1,4 км с горизонтальным радиусом 647 м (!) без разрыва ленты при производительности 2 500 т/ч и скорости ленты 3,2 м/с.

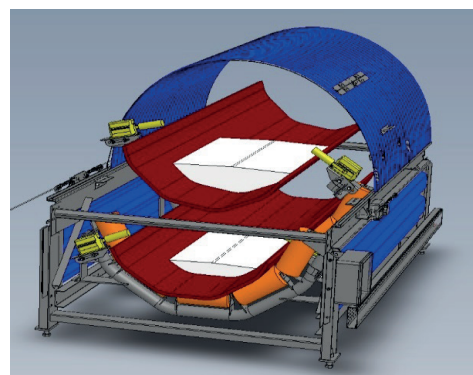
Трасса переходит через 3 автодороги и одно железнодорожное полотно. Для гарантии соответствия экологическим требованиям выбраны пластиковые бесшумные ролики, снижающие шум металлические укрытия ленты, а также устанавливается система пылеулавливания (99% частиц). На сегодняшний день монтаж закончен, идут ПНР, ввод конвейера в эксплуатацию запланирован к концу лета 2026.

Согласно официальному пресс-релизу на сайте Holcim конвейер поможет избежать 15 000 авторейсов в год (30 000 с учетом порожнего пробега)!



**Трасса монтируемого в настоящее время в Бельгии конвейера**

Еще одно интересное инженерное решение RBL-REI – это конвейеры, транспортирующие в оба конца. У таких конвейеров нижняя лента тоже загружается и транспортирует в обратном направлении. Благодаря качественной системе очистки одна лента перевозит разные продукты. Так, в Австралии 4-километровый изогнутый конвейер перемещает по верхней ленте сырой уголь к ТЭЦ, а по нижней золу в обратном направлении. Или, например, в Китае 6,5-километровый изогнутый конвейер по верхней ветви перемещает клинкер, а по нижней уголь в обратном направлении. Уникальная технология конвейеров с двумя несущими лентами позволяет достичь серьезной экономии, исключая второй став, вторую ленту, перегрузочные узлы, кабели, приводные группы, барабаны, ролики, систему натяжения и переворот ленты. Это осязаемое снижение инвестиционных затрат, а ведь снижаются также и эксплуатационные расходы на протяжении всего срока службы оборудования (35–40 лет)



**Две несущие ленты**

В условиях пересеченной и труднодоступной местности многокилометровые изогнутые ленточные конвейеры RBL-REI помогут решить проблемы перевалки сыпучих материалов навалом. Они адаптируются к рельефу, продукции и специфическим задачам эксплуатанта, работают круглосуточно с минимальными затратами на обслуживание и запчастей и отвечают самым современным экологическим нормам.

*Marianna.d@rblrei-france.com*



Co-organisers



**MEScon Connect: Central Asia 2026**  
Bridging Regions. Building Connections.

9-11 June 2026  
InterContinental Almaty, Kazakhstan



## ГЛАВНОЕ МЕРОПРИЯТИЕ, ПОСВЯЩЕННОЕ СЕРЕ, ПРОЙДЕТ В АЛМАТЫ, КАЗАХСТАН, С 9 ПО 11 ИЮНЯ 2026 ГОДА

Впервые за 12-летнюю историю CRU, международный эксперт в сфере сырьевых рынков, с гордостью объявляет о расширении своего ведущего мероприятия по сере MEScon за пределы Ближнего Востока в партнерстве с UniverSUL Consulting. Мероприятие MEScon Connect: Central Asia пройдет в Алматы, Казахстан, с 9 по 11 июня 2026 года.

Это стратегическое расширение переносит известную программу MEScon во второй по величине регион мира по производству серы. Центральная Азия играет все более важную роль в мировой цепочке создания стоимости серы не только благодаря своим значительным производственным мощностям, но и за счет ключевых логистических связей с крупными рынками сбыта, такими как Китай.

Программа 2026 года будет включать насыщенную серию сессий, охватывающих всю цепочку создания стоимости серы, с особым акцентом на операционные, технические и инновационные темы, формирующие отрасль сегодня. Участников ждут практические кейсы, материалы по повышению эффективности и обсуждения новых технологий и перспективных решений.

**Никола Кослетт, генеральный директор CRU Communities, прокомментировала:**

*«Расширение MEScon в Центральную Азию – это важный шаг в объединении глобального сообщества специалистов по сере. Мы рады создать платформу в этом ключевом регионе, которая будет способствовать инновациям, помогать решать уникальные логистические задачи и продвигать отрасль вперед через сотрудничество и обмен опытом».*

**Анжела Слэйвенс, основательница UniverSUL Consulting и соосновательница MEScon, прокомментировала:**

*«Возвращаясь к первому MEScon (тогда MESPO) в 2014 году, основной целью было объединить местных операторов, чтобы делиться опытом и передовыми практиками на благо их уникальных производств и всей отрасли в целом.*

*В то время Ближний Восток становился крупнейшим в мире регионом по производству серы, и начинали работу одни из самых крупных и известных объектов по добыче кислого газа и производству серы. По мере роста сообщества Центральная Азия стала важной частью диалога MEScon, с сопоставимо крупными и сложными проектами. Технические вызовы в обоих регионах тесно*

*связаны, поэтому перенос MEScon в Центральную Азию – это естественный следующий шаг для углубления этих обменов и укрепления сообщества».*

**Питер Харриссон, руководитель направления рынков серы и серной кислоты в CRU, прокомментировал:**

*«После многих успешных лет в Абу-Даби мы переносим MEScon в Казахстан, чтобы отразить географическое разнообразие отрасли, сохраняя при этом наш ключевой фокус на технических инновациях и операционном совершенстве. Мероприятие объединит всю цепочку создания стоимости серы – от региональных производителей до конечных потребителей на таких рынках, как Китай. Одной из ключевых тем станет решение острых логистических проблем, с которыми сталкивается этот не имеющий выхода к морю регион, что является критически важным и постоянным вопросом для отрасли серы в Центральной Азии».*

Для получения дополнительной информации о MEScon Connect 2026 посетите наш сайт.

### О CRU

CRU предоставляет независимую экспертную аналитику глобальных сырьевых рынков. Эта экспертиза основана на уникальных данных, объективных аналитических выводах и стратегическом мышлении. Предлагая знания по четырем основным направлениям – *data, insights, strategy* и *communities* – CRU помогает компаниям ориентироваться в условиях все более сложного сырьевого рынка, решать задачи цепочек поставок, декарбонизации и энергетического перехода с ясностью, уверенностью и скоростью.

С момента основания в 1969 году CRU последовательно инвестирует в первичные исследования, надежные методологии сбора и анализа данных и развитие сильных международных команд экспертов. Компания прошла аудит IOSCO по всем своим ценовым индикаторам сырьевых рынков, что подтверждает надежность и устойчивость ее методологий, политик и процессов.

Сегодня в CRU работают более 420 экспертов в 17 локациях (включая представительство) в Европе, Северной и Южной Америке, Азии и Австралии.

### Контакты для СМИ:

Ana.Seferovic@crugroup.com



## ФОРМУЛА ESAB: ОБУЧИТЬ, ОСНАСТИТЬ, ЗАЩИТИТЬ

Промышленности нужны не только станки, но и люди, которые на них работают. Технологии бессмысленны без квалифицированного сварщика, а его мастерство невозможно раскрыть без качественного оборудования и надежной защиты.

Компания ESAB последовательно выстраивает эту цепочку: партнерство с чемпионатами WorldSkills, оснащение рабочих мест и забота о здоровье сварщиков через современные средства индивидуальной защиты (СИЗ). Рассказываем, как образование, технологии и безопасность работают в единой системе и почему для рынка Центральной Азии это особенно актуально.

В 2026 году ESAB выступил партнером двух чемпионатов WorldSkills: в Бишкеке и Алматы. Компания организовала конкурсные площадки, предоставила сварочные материалы, а победители получили СИЗ и аксессуары ESAB: маски, перчатки и рюкзаки.

Цель мероприятий – повысить престиж рабочих специальностей, открыть молодежи новые карьерные перспективы и улучшить качество профильного образования.

Конкурсы стали примером того, как объединение усилий учебных заведений, бизнеса и движения WorldSkills помогает готовить конкурентных участников глобального рынка труда.



**WorldSkills Kyrgyzstan 2026**

Однако подготовка квалифицированных кадров – лишь половина успеха. Не менее важно, чем и на чем эти специалисты будут работать.

В 2025 году компания выпустила инверторный источник 500DP для импульсной сварки углеродистых и нержавеющей сталей, а также алюминиевых сплавов. В 2026 – Transmig 500H, универсальный вариант для сварки углеродистой стали в среде защитных газов.

«Новинки ESAB созданы для решения промышленных задач в жестких условиях – от горных предприятий до строительства, машиностроения и обслуживания техники. Они безотказно работают как в «поле», так и на стационарных производствах, повышая эффективность процессов», – отмечает Екатерина Татарина, директор ТОО «ЭСАБ Казахстан», руководитель региона ЭСАБ Центральная Азия.

Общая платформа моделей включает защиту от термических перегрузок: блок жидкостного охлаждения с датчиком потока. При нарушении циркуляции аппарат выдает предупреждение и блокирует работу, предотвращая оплавление горелки и повреждение шлангов.

Модель 500DP обеспечивает круглосуточный цикл: 100% продолжительность нагрузки при токе 500 А позволяет работать без пауз на охлаждение. Встроенные синергетические программы для MIG/MAG повышают эффективность в цехах среднего масштаба и на крупных предприятиях.

Модель 500H оснащена чипом ARM, регулирующим напряжение и форму волны тока. Это стабилизирует дугу при питании от генераторов и защищает от скачков напряжения. Сварщик корректирует только скорость подачи проволоки – система автоматически подбирает ток и напряжение под диаметр, тип проволоки и защитный газ.

Высокая производительность инверторов требует эффективной передачи тока и охлаждения. В технологической цепочке горелки серии Pike – финальное звено: они



**Инверторный источник Transmig 500DP**

подают ток, защитный газ и присадочную проволоку в зону сварки.

Линейка разделена на две серии: Pike PSF спроектированы под оригинальные комплектующие ESAB, а Pike MXL совместимы со стандартными евро-расходниками других производителей. Комплексная защита от износа включает никелированные сопла, износостойкие сплавы для стабилизации дуги и термостойкие рукоятки.

Выбор инструментов – это баланс между текущими задачами и перспективами роста предприятия. Эволюция оборудования идет по пути защиты от человеческого фактора и внешних рисков. Так, в Казахстане происходит качественный сдвиг в восприятии производственной безопасности. Компании отходят от принципа «результат любой ценой» к стандарту Vision Zero – концепции нулевого травматизма. Средства индивидуальной защиты перестают быть статьей расходов или формальным требованием.

Традиционно закупки на предприятиях велись по принципу закрытия отдельных позиций. Однако такая практика часто дает сбой: СИЗ конфликтуют друг с другом, и главное – с удобством работы.

Ложная экономия на дешевых расходниках ведет к скрытым издержкам: нестабильные светофильтры вредят зрению, вторичный пластик токсичен и непрочен. Без независимой сертификации заявленные характеристики не имеют значения. Продукция ESAB проходит многолетний цикл международной сертификации с ежегодным подтверждением соответствия.

Модельный ряд сварочных масок ESAB включает решения P10 и Sword F11. За счет отсутствия электроники изделия сохраняют функциональность при экстремально низких температурах. P10 отличается увеличенным смотровым окном – это критично при TIG-процессах. Sword F11 оснащена откидным блоком с двухпозиционной фиксацией, позволяющим проводить слесарные работы без полного поднятия щитка.



**Горелка Pike MXL**



**Перчатки (краги) ESAB Heavy Duty Basic**

Сменные линзы с диапазоном от DIN 9 до DIN 13 обеспечивают адаптацию маски к различным режимам и методам сварки.

Обеспечив защиту органов зрения, необходимо уделить внимание рукам рабочего – наиболее уязвимой части тела при выполнении сварочных работ. Безопасность рук сварщика начинается с подбора материалов. ESAB использует сертифицированное сырье, проверенное независимыми лабораториями. В зависимости от специфики работ применяется либо влагостойкий верхний слой кожи КРС (термостойкость до 80 °C), либо пористый спилкок, отводящий влагу (до 100 °C). Огнестойкие нити из полиамида гарантируют прочность швов при термических нагрузках. Для повышенных нагрузок подходят перчатки Heavy Duty Basic, для тяжелых условий – Heavy Duty Black с кевларовой прошивкой. Для работы при отрицательных температурах предусмотрена модель MW1000 с утепленной подкладкой.

Безопасность на производстве – это не просто закупка экипировки, а система, объединяющая качественные материалы, обучение персонала и контроль. Тренды отрасли могут меняться, но главное остается неизменным. Инвестиции в защиту и подготовку кадров – вложение в здоровье сотрудников, а значит, в будущее самой компании.

«ESAB строит работу как единую цепочку: от поддержки молодых профессионалов до оснащения производств надежным оборудованием и защиты сварщиков. Потому что настоящий стандарт качества начинается с человека и возвращается к нему», – Екатерина Татарина, ТОО «ЭСАБ Казахстан».





Тимченкодан  
Маркетинг

Маркетингтік  
нигилизм  
агенттігі

+7 705 818 40-65  
communication@stimchenko.com  
www.stimchenko.kz

# Держим курс!



Маркетинг для  
производственных  
компаний

**Мы помогаем:**

- Сформировать позитивный образ компании
- Привлечь новых клиентов
- Обойти конкурентов
- Выйти на новые рынки
- Продавать

Стратегия | Дизайн | Репутация | Отраслевые выставки | Работа со СМИ

Код МРНТИ 38.49.17

Е. Т. Ескалиев<sup>1</sup>, \*М. Е. Рахымбердина<sup>1</sup>, К. Вах<sup>2,1</sup>, Р. Шульц<sup>3</sup><sup>1</sup>Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан),<sup>2</sup>ООО «EuroGV» (г. Прага, Чешская Республика),<sup>3</sup>Университет нефти и минералов им. короля Фахда (г. Дахран, Королевство Саудовская Аравия)

## КАРТИРОВАНИЕ ПЕГМАТИТОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЙ ASTER В КАЛБА-НАРЫМСКОЙ ЗОНЕ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

**Аннотация.** Исследование направлено на оценку эффективности стандартных спектральных соотношений каналов ASTER для картирования пегматитов в Калба-Нарымской металлогенической зоне Казахстана. Применены стандартные соотношения каналов Kalinowski и Oliver для выявления зон альтерации, ассоциированных с пегматитовой минерализацией. В данной работе представлена методология, основанная на анализе спектров VNIR и SWIR каналов ASTER с применением существующих спектральных соотношений. Полученные результаты подтверждают эффективность данных стандартных соотношений каналов в идентификации зон *Al-OH* и *Mg-OH* глин, которые коррелируют с уже известными пегматитовыми месторождениями. Применение стандартных соотношений каналов может быть рекомендовано для предварительной оценки перспективности территорий на редкометалльные пегматиты в схожих геологических условиях.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, соотношение каналов, Калба-Нарым, пегматиты, космические снимки, картирование.

**ASTER спектрлік арналар қатынастарын қолданумен Шығыс Қазақстандағы Қалба-Нарым аймағында пегматиттік өзгерістерді картаға түсіру**

**Аннотация.** Зерттеу Қазақстандағы Қалба-Нарым металлогендік аймағында ASTER деректерін пайдалана отырып, гидротермалды өзгерістерді картаға түсіру үшін стандартты спектрлік арналар қатынастардың тиімділігін бағалауға бағытталған. Пегматиттік минерализациямен байланысты өзгеріс аймақтарын анықтау үшін Kalinowski және Oliver стандартты арналар қатынастары қолданылды. Бұл жұмыста қолданыстағы спектрлік қатынастарды қолдана отырып, ASTER арналарының VNIR және SWIR спектрлерін талдауға негізделген әдістеме ұсынылады. Нәтижелер белгілі пегматиттік кен орындарымен корреляцияланатын *Al-OH* және *Mg-OH* саз аймақтарын анықтау үшін стандартты арналар қатынастар деректерінің тиімділігін растайды. Ұқсас геологиялық жағдайларда сирек металл пегматиттеріне қатысты аумақтардың перспективасын алдын-ала бағалау үшін стандартты арналар қатынастарды қолдану ұсынылуы мүмкін.

**Түйінді сөздер:** қашықтықтан зондау, спектрлік арналар қатынасы, Қалба-Нарым, пегматиттер, ғарыштық суреттер, картаға түсіру.

### Pegmatite alteration mapping using Band Ratios with ASTER in Kalba-Narym, East Kazakhstan

**Abstract.** This study evaluates the effectiveness of standard ASTER spectral ratios for alteration mapping in the Kalba-Narym metallogenic zone of Kazakhstan. Standard Kalinowski and Oliver band ratios were applied to identify alteration zones associated with pegmatite mineralization. This study presents a methodology based on the analysis of VNIR and SWIR spectra from ASTER channels using existing spectral ratios. The results confirm the effectiveness of these standard ratios in identifying *Al-OH* and *Mg-OH* clay zones that correlate with known pegmatite deposits. Standard ratios can be recommended for preliminary assessment of rare-metal pegmatite prospects in similar geological conditions.

**Key words:** remote sensing, band ratios, Kalba-Narym, pegmatite exploration, satellite images, mapping.

### Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) стало неотъемлемым инструментом в геологических исследованиях, особенно для картирования гидротермальных изменений и связанной с ними минерализации. Спутниковые данные ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) с их уникальными спектральными возможностями в VNIR (0,52–0,86 мкм) и SWIR (1,6–2,43 мкм) диапазонах обеспечивают эффективное выявление минералов, содержащих гидроксильные группы и карбонаты [1].

Калба-Нарымская металлогеническая зона в Восточном Казахстане представляет собой ключевой регион для поиска редкометалльных пегматитов, содержащих *Li*, *Ta*, *Nb*, *Be*, *Cs*, *Sn*, *W*. Регион характеризуется наличием позднегерцинских гранитоидов (295–285 млн лет) и ассоциированных с ними пегматитовых зон [2]. Калба-Нарым является относительно изученной зоной [3, 4]. В результате имеем полный профиль зоны: классификация металлов, оруденение и минералы [5, 6]. Нашей задачей является использование результатов исследований в качестве параметров поиска перспективным участком с помощью ДЗЗ, в частности пегматитов.

Современные методы дистанционного зондирования, основанные на анализе спектральных данных ASTER, популярны среди научного сообщества по всему миру [7].

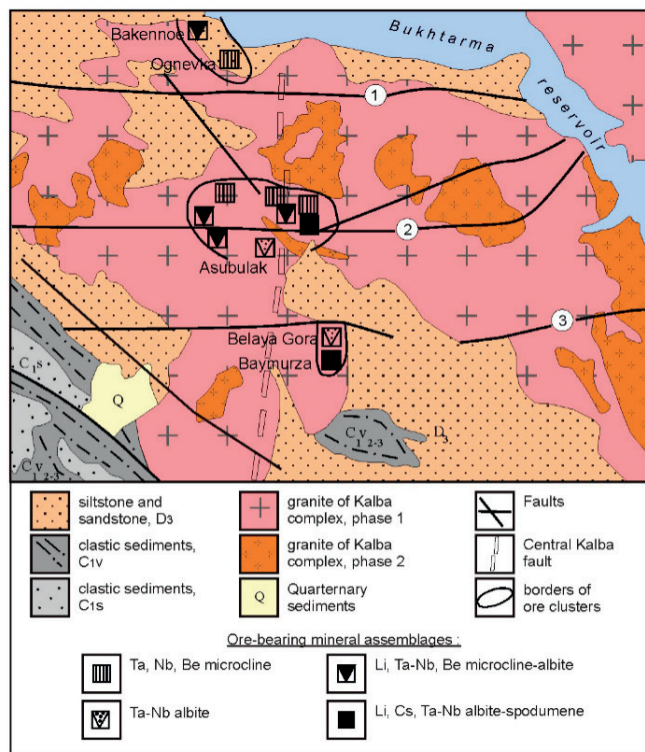
Однако применение этих методов для поиска месторождений полезных ископаемых остается недостаточно освещенным в контексте Казахстана.

Целью данного исследования является использование методологии картирования пегматитов в Калба-Нарымской зоне с использованием стандартных спектральных соотношений каналов ASTER, и тем самым показать потенциал спутниковых технологий для геологии [8].

### Материалы и методы исследования

1. Геологические данные собраны по результатам проведенных в прошлом исследований [2, 3, 5]. В Калба-Нарымской зоне редкометалльные пегматиты обычно представлены альбит-кварцевыми разновидностями с участием слюд (мусковит/лепидолит) и турмалина. Редкие элементы (*Li*, *Ta*, *Nb*, *Sn*, *Be*, *Cs*) сосредоточены не в «массе» породы, а в отдельных минералах-носителях: сподумене, колумбите-танталите и микролите, касситерите, а также в фосфатах и бериллии. Наиболее продуктивные по редким металлам типы связаны со сподумен-содержащими и альбитизированными (альбит-мусковитовыми) пегматитами, где минерализация часто проявляется в виде гнезд, прожилков и мелких вкрапленников рудных минералов. Выбраны эталонные месторождения для применения ДЗЗ и создания спектрального профиля по месторождениям.





**Рис. 1. Геологическая карта Центрально-Калбинского рудного района и расположение месторождений редкометалльных пегматитов [5].**

**Сурет 1. Орталық Қалба кенді ауданының геологиялық картасы және сирек металды пегматиттік кен орындарының орналасуы [5].**

**Figure 1. Geological map of the Central Kalba ore district and location of rare-metal pegmatite deposits [5].**

2. Исследование основано на анализе данных ASTER, полученных 2 мая 2002 года (сцена AST\_07\_00405302002053830). Использованы VNIR (B01-B03N) и SWIR (B04-B09) каналы с пространственным разрешением 15 м и 30 м соответственно. Данные предварительно обработаны до уровня AST\_07 (Surface Reflectance) с коррекцией атмосферных эффектов. Спутниковые снимки ASTER от 2002 года были выбраны для анализа из-за минимального облачного покрова, что является критическим фактором для мультиспектральных дистанционных

исследований, поскольку облачность значительно влияет на качество данных и точность спектрального анализа [9]. Применены стандартные спектральные соотношения каналов для выявления различных типов гидротермальных изменений. Эти соотношения каналов широко используются в геологических исследованиях и показали высокую эффективность для картирования минеральных ассоциаций [10].

Процесс обработки данных включает несколько этапов:

1. Сбор геологических данных. По результатам исследований [2, 3, 5, 6] собрана информация о минерализации эталонных месторождений редкометалльных пегматитов Юбилейный и Белая Гора Центрально-Калбинского рудного района. Калба-Нарымская зона характеризуется позднегерцинскими гранитоидами (295–285 млн лет) и пегматитами альбит-кварцевого типа с мусковитом/лепидолитом и турмалином. Редкие элементы (*Li, Ta, Nb, Sn, Be, Cs*) сосредоточены в минералах-носителях: сподумене, колумбите-танталите, микролите, касситерите [5, 6]. На основе этой минералогии выполнен подбор целевых минералов для спектральных соотношений каналов: **Al-OH** (мусковит, серицит), **Li-Al-OH** (пегматит/сподумен), **Fe-Mg-Al-OH** (турмалин), что соответствует грейзеновым и слюдястым изменениям в пегматитовых системах района.

2. Предварительная обработка. Удаление пикселей NoData (черные границы сцены), геометрическая коррекция и приведение к единой системе координат UTM Zone 44N (EPSG:32644), соответствующей центральной части Восточного Казахстана [1, 5]. Коррекция обеспечивает совмещение снимков с геологическими картами Центрально-Калбинского рудного района [5] и корректное наложение границ разломов (Гремячинско-Киинский, Асубулак, Первомайско-Белогорский) для анализа пространственной связи минерализации с тектоникой.

3. Удаление растительности. Расчет NDVI и применение маски ( $NDVI < 0,3$ ) для исключения влияния растительного покрова [1, 7]. Спектральные сигнатуры растительности в VNIR и SWIR маскируют полосы поглощения OH-групп в целевых минералах (мусковит, сподумен, хлорит). Очистка данных от растительности позволяет выделить сигнатуру обнажений пегматитов и зон гидротермальных изменений, особенно в районах с развитой слюдястой и грейзеновой альтерацией [10].

**Таблица 1**

**Стандартные соотношения каналов ASTER (часть содержащая силикаты)**

**Кесте 1**

**ASTER стандартты арналар қатынастары (құрамында силикаттар бар бөлік)**

**Table 1**

**ASTER standard Band Ratio (the part containing silicates)**

| Минерал                | Спектральное соотношение каналов (CCK) | Целевой элемент       | Источник     |
|------------------------|----------------------------------------|-----------------------|--------------|
| Серицит/мусковит/иллит | (5+7)/6                                | <b>Fe-Mg-Al-OH</b>    | Rowan&Hewson |
| Мусковит усиленный     | 5/6                                    | <b>Al-OH</b>          | Hewson       |
| Пегматит               | 7/6                                    | <b>Li-Al-OH</b>       | Hewson       |
| Алтерация              | 4/5                                    | <b>Al-OH-переходы</b> | Volsky       |

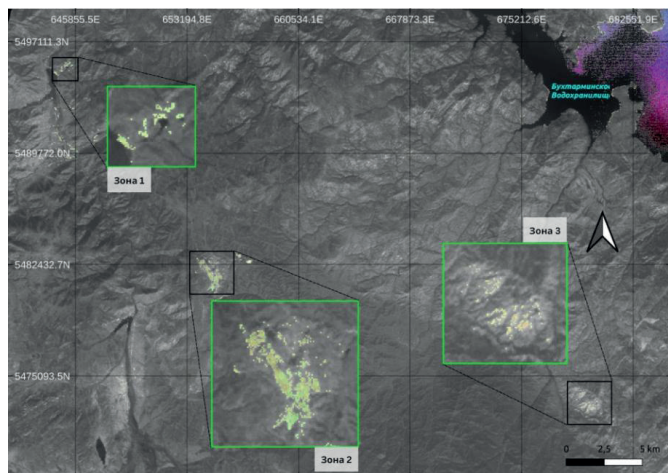


4. Расчет спектральных соотношений каналов (ССК). Применение стандартных формул Kalinowski и Oliver [10], основанных на соотношениях Rowan и Mars [7], для выявления гидротермальных изменений (таблица 1) с использованием QGIS. Рассчитаны соотношения:  $(5+7)/6$  – **Fe-Mg-Al-OH** (турмалин ± сподумен);  $5/6$  – **Al-OH** (мусковит, грейзены);  $7/6$  – **Li-Al-OH** (ядро пегматитов со сподуменом/лепидолитом);  $4/5$  – **Al-OH** переходы. Эти ССК согласованы с минералогией Калбинских пегматитов (кварц – альбит – мусковит ± турмалин) и нацелены на картографирование слюдисто-грейзеновых и альбитизированных зон, ассоциированных с редкометалльной минерализацией.

### Результаты

Анализ спектральных соотношений каналов выявил выраженные пегматитовые зоны в исследуемом районе. Соотношение каналов показало высокие значения ( $> 1,0$ ) в зонах, типичных для пегматитовых систем, таких как мусковит, сподумен, турмалин.

В ходе выполнения исследования выявлены три зоны с различными спектральными характеристиками (рис. 2). Во всех зонах выделяются сильные сигнатуры B07/B06 (средние значения от 1,359 до 1,456), что указывает на преобладание **OH** богатых пегматитовых систем. Зоны 1 и 2 характеризуются умеренными значениями B05/B06 и B04/B05, в то время как в Зоне 3 выделяются наиболее высокие значения по всем спектральным соотношениям каналов, что делает ее наиболее перспективной для дальнейшего изучения.



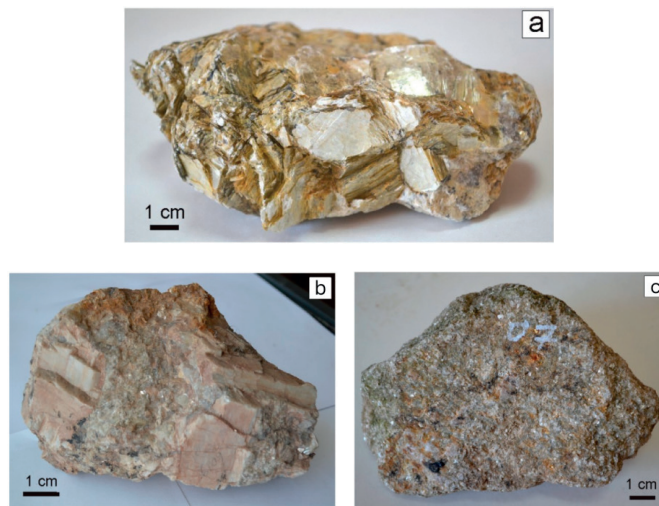
**Рис. 2. Участки пегматитов, выявленные спектральным соотношением каналов.**

**Сурет 2. Спектрлік арналар қатынастарымен анықталған пегматиттердің учаскелері.**

**Figure 2. Zones of pegmatites identified by spectral Band Ratio.**

Мусковит в пегматитах Юбилейного месторождения (Зона 1) (рис. 3) является типичным минералом слюдисто-грейзенового (**Al-OH**) изменения, которое нередко сопровождается формированием редкометалльной (**Li-Ta-Nb-Sn**) пегматитовой минерализации и поэтому может рассматриваться как косвенный индикатор ее проявлений. Месторождение Белая Гора (Зона 2) относится к такому

же типу месторождений, как Юбилейное и Асубулак, но в настоящее время законсервировано. При обработке спутниковых снимков проводится спектральный анализ для выявления мусковитизации в окрестностях Белой Горы, где ожидается высокая пространственная концентрация соответствующего отражения.



**Рис. 3. Минералы из Асубулакского рудного поля:**  
а) микроклин с мусковитом и кварцем; б) кварц-альбит-мусковит; в) кристаллы сподумена и кварц в слюде [5].

**Сурет 3. Асубулак кенді ауданының минералдары:**

а) микроклин мусковитпен және кварцпен бірге;  
б) кварц-альбит-мусковит; в) сподумен кристалдары және слюдадағы кварц [5].

**Figure 3. Minerals from the Asubulak ore field:**

а) microcline with muscovite and quartz; б) quartz-albite-muscovite; в) spodumene crystals and quartz in mica [5].

Анализ Зоны 1 (месторождение Юбилейное) показал повышенные значения B07/B06 (среднее = 1,359) при умеренных значениях B05/B06 (0,971) и B04/B05 (0,940), что указывает на развитие **OH**-содержащих изменений, прежде всего **Al-OH** (слюды/мусковитизация – серицитизация). Это согласуется с опубликованными данными о преобладании в пегматитах Юбилейного кварц-полевошпат-мусковитовых ассоциаций и локальной альбитизации/грейзенизации, характерных для пегматитовых систем района.

Зона 2 характеризуется высокими значениями B07/B06 (среднее = 1,465) при умеренных значениях B05/B06 (0,992) и B04/B05 (0,985), что отражает более контрастный **Al-OH**-отклик и/или более «чистую» экспозицию слюдистых изменений по сравнению с Зоной 1. С учетом минералогического разнообразия Калбинских пегматитов (кварц-альбит, мусковит ± турмалин и др.) такая картина может соответствовать участкам с более развитой слюдистой (грейзеновой) составляющей и требует проверки по геологическим данным и положению относительно известных пегматитовых тел.

Анализ Зоны 3 показал наиболее высокие значения по всем спектральным соотношениям каналов: B05/B06 (среднее = 1,052), B07/B06 (среднее = 1,456) и B04/B05 (среднее = 1,001), что свидетельствует о наиболее перспектив-

Таблица 2

## Глобальная и зональная статистика ASTER

Кесте 2

## ASTER жаһандық және аймақтық статистикасы

Table 2

## ASTER Global and Zonal Statistics

| Спектральный признак             | ССК                 | Глобальный min–max | Зоны интереса | Среднее значение | Интерпретация                                           |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|---------------|------------------|---------------------------------------------------------|
| Мусковит усиленный               | B05/B06             | 0,64–1,19          | 0,82–1,13     | $1,02 \pm 0,03$  | Филлическая альтерация, мусковитовые грейзеновые зоны   |
| Tourmaline<br><i>Fe-Mg-Al-OH</i> | (B05 + B07)/<br>B06 | 0,79–1,90          | 1,07–1,71     | $1,39 \pm 0,07$  | Комплексы турмалина $\pm$ сподумена, <i>Fe-Mg-Al-OH</i> |
| Пегматит<br>( <i>Li-Al-OH</i> )  | B07/B06             | 0,00–1,50          | 0,83–1,06     | $0,99 \pm 0,02$  | Ядра литийсодержащих пегматитов (сподумен, лепидолит)   |

ном пегматитовом объекте с выраженными сигнатурами гидротермальных изменений. Результаты по третьей зоне не уступают известным месторождениям в отражательной способности на пегматит и мусковит (таблица 2).

## Обсуждение

Гранитные поверхности и антропогенные материалы могут демонстрировать спектральные характеристики, схожие с гидротермальными изменениями, что требует осторожного подхода к интерпретации данных. Для минимизации таких ошибок необходимо углубленное знание геологической обстановки и объектов исследования [8].

В данном исследовании проведена гомогенизация пространственного разрешения VNIR (15 м) и SWIR (30 м) каналов до 30 м. Хотя геодезические задачи требуют максимально точного пространственного разрешения, для геологических исследований такое разрешение является адекватным, поскольку минеральные образования пегматита и мусковита занимают значительные площади, что позволяет эффективно выявлять необходимые отражательные характеристики даже при пониженном пространственном разрешении. Для пегматитовых минералов, которые наиболее эффективно различаются в SWIR диапазоне, выбранное разрешение 30 м обеспечивает достаточную детальность анализа.

Гиперспектральное картографирование позволит выявить тонкие спектральные различия и улучшить точность идентификации пегматитовых минералов. Исследования показывают, что гиперспектральные данные обеспечивают возможность прямого сравнения со спектральными библиотеками и более точного картирования изменений минералов [11].

## Заключение

Использование стандартных соотношений каналов ASTER продемонстрировало высокую эффективность в определении перспективных зон пегматитовой минерализации

в Калба-Нарымской металлогенической зоне. Ключевые достижения:

1) Подтверждена эффективность стандартных соотношений каналов Kalinowski и Oliver (2004) для картирования гидротермальных изменений в пегматитовых системах на участках месторождений Юбилейный и Белая Гора Калба-Нарымского пояса.

2) Выявлена одна перспективная зона с высокими значениями соотношений каналов в отношении B06 ( $> 1,0$ ), сравнимая с показателями по вышеуказанным месторождениям.

3) Установлена применимость стандартных соотношений каналов для пегматитовой минерализации при выявлении мусковитовых изменений.

4) Обоснована необходимость интеграции с гиперспектральными данными для повышения точности минералогической идентификации, как в пространственном, так и в спектральном разрешении.

Стандартные соотношения каналов могут быть рекомендованы для поиска пегматитовых месторождений в аналогичных геологических условиях и способствуют повышению эффективности геологоразведочных работ в регионе. Метод особенно эффективен для предварительной оценки больших территорий и оптимизации затрат на разведку. Полученные результаты подтверждают перспективность применения дистанционного зондирования для решения задач геологоразведки в условиях ограниченных финансовых ресурсов.

## Благодарность

Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта «Жас Ғалым» грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP25795761 «Разработка комбинированного метода для прогнозирования золоторудных МПИ на основе спутниковых технологий, ГИС и ИИ глубокого обучения».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. Руководство пользователя ASTER. Версия 2. – Калифорния, 2002. – 135 с. (на английском языке)

2. D'yachkov B. A. и др. (10 июня 2022 г.). Геологическая история Большого Алтая: значение для изучения полезных ископаемых. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12060744> (на английском языке)
3. Oitseva T. A. и др. (15 июля 2025 г.). Редкометалльное оруденение (Li-Ta-Nb) и возраст кварцевого месторождения пегматитов (Восточный Казахстан). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min15070737> (на английском языке)
4. Shen P. и др. (14 мая 2025 г.). Крупномасштабное пермско-юрское редкометалльное оруденение в Алтайском орогенном поясе: обзор. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106669> (на английском языке)
5. Khrutukh S. V. и др. (16 ноября 2020 г.). Месторождения редкометалльных пегматитов в Калбинском районе Восточного Казахстана: возраст, состав и петрогенетические особенности. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min10111017> (на английском языке)
6. Zimanovskaya N. A. и др. (22 ноября 2022 г.). Геология, минералогия и возраст литий-содержащих пегматитов: на примере месторождения Точка (Восточный Казахстан). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12121478> (на английском языке)
7. Rowan L. C., Mars J. C. Литологическое картографирование в районе Маунтин-Пасс, Калифорния, с использованием данных передового космического радиометра теплового излучения и отражения (ASTER) // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – № 84 (3). – С. 350–366 (на английском языке)
8. Библиотека спектральных данных ASTER, версия 2.0 / A. M. Baldridge [и др.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – № 113 (4). – С. 711–715 (на английском языке)
9. Topinka H., Tachikawa T. (26 ноября 2019 г.). Оценка облачного покрытия ASTER и анализ операций миссии с использованием продуктов Terra/MODIS Cloud Mask. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs11232798> (на английском языке)
10. Kalinowski A., Oliver S. Руководство по обработке минерального индекса ASTER. – Австралия, 2004. – 36 с. (на английском языке)
11. Asadzadeh S. и др. (1 января 2024 г.). Картирование минеральных изменений в медно-золотом порфировом месторождении Шадан (Иран) с использованием данных аэрофотосъемки: последствия для разведочного бурения. *Economic Geology*. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5009> (на английском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER пайдаланушы нұсқаулығы. 2-нұсқа. – Калифорния, 2002. – 135 б. (ағылшын тілінде)
2. D'yachkov B. A. және т.б. (10 маусым 2022 ж.). Үлкен Алтайдың геологиялық тарихы: пайдалы қазбаларды зерттеудің маңызы. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12060744> (ағылшын тілінде)
3. Oitseva T. A. және т.б. (15 шілде 2025 ж.). Сирек металды кендеу (Li-Ta-Nb) және пегматит кварц кен орнының жасы (Шығыс Қазақстан). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min15070737> (ағылшын тілінде)
4. Shen P. және т. б. (14 мамыр 2025 ж.). Алтай орогендік белдеуіндегі кең ауқымды Пермь-Юра сирек металды кендеу: шолу. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106669> (ағылшын тілінде)
5. Khrutukh S. V. және т.б. (16 қараша 2020 ж.). Шығыс Қазақстанның Қалба ауданындағы сирек металды пегматит кен орындары: жасы, құрамы және петрогенетикалық ерекшеліктері. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min10111017> (ағылшын тілінде)
6. Zimanovskaya N. A. және т. б. (22 қараша 2022 ж.). Құрамында литий бар пегматиттердің геологиясы, минералогиясы және жасы: Точка кен орнының мысалында (Шығыс Қазақстан). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12121478> (ағылшын тілінде)
7. Rowan L. C., Mars J. C. Жылу сәулеленуі мен шағылысудың озық ғарыштық радиометрінің деректерін (ASTER) пайдаланумен Калифорния штатындағы Маунтин-Пас ауданындағы литологиялық картаға түсіру // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – № 84 (3). – Б. 350–366 (ағылшын тілінде)
8. ASTER спектрлік деректер кітапханасы, 2.0 нұсқасы / A. M. Baldridge [және т. б.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – № 113 (4). – Б. 711–715 (ағылшын тілінде)
9. Topinka H., Tachikawa T. (26 қараша 2019 ж.). ASTER бұлтты қамтуды бағалау және Terra/MODIS Cloud Mask өнімдерін қолданумен миссия операцияларын талдау. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs11232798> (ағылшын тілінде)
10. Kalinowski A., Oliver S. ASTER минералды индексін өңдеу бойынша нұсқаулық. – Австралия, 2004. – 36 б. (ағылшын тілінде)
11. Asadzadeh S. және т. б. (1 қантар 2024 ж.). Аэрофототүсіріс деректерін пайдаланумен Шадан (Иран) мыс-алтын порфир кен орнындағы минералды өзгерістерді картаға түсіру: барлау бұрғылауының салдары. *Economic Geology*. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5009> (ағылшын тілінде)



## REFERENCES

1. Abrams M., Hook S., Ramachandran B. *ASTER User Handbook. Version 2.* – California, 2002. – 135 p. (in English)
2. D'yachkov B. A. et al. (10 June 2022). Geological history of the Great Altai: Implications for mineral exploration. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12060744> (in English)
3. Oitseva T. A. et al. (15 July 2025). Rare metal (Li–Ta–Nb) mineralization and age of the Kwartsevoye pegmatite deposit (Eastern Kazakhstan). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min15070737> (in English)
4. Shen P. et al. (14 May 2025). Large-scale Permian–Jurassic rare-metal mineralization in the Altai Orogenic Belt: A review. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106669> (in English)
5. Khromykh S. V. et al. (16 November 2020). Rare-metal pegmatite deposits of the Kalba region, Eastern Kazakhstan: Age, composition and petrogenetic implications. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min10111017> (in English)
6. Zimanovskaya N. A. et al. (22 November 2022). Geology, mineralogy, and age of Li-bearing pegmatites: Case study of Tochka deposit (East Kazakhstan). *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min12111478> (in English)
7. Rowan L. C., Mars J. C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data // *Remote Sensing of Environment*. – 2003. – No. 84 (3). – P. 350–366 (in English)
8. The ASTER spectral library version 2.0 / A. M. Baldridge et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – No. 113 (4). – P. 711–715 (in English)
9. Tonooka H., Tachikawa T. (26 November 2019). ASTER cloud coverage assessment and mission operations analysis using Terra/MODIS cloud mask products. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs11232798> (in English)
10. Kalinowski A., Oliver S. *ASTER Mineral Index Processing Manual. Remote Sensing Applications.* – Australia, 2004. – 36 p. (in English)
11. Asadzadeh S. et al. (1 January 2024). Alteration mineral mapping of the Shadan porphyry Cu–Au deposit (Iran) using airborne imaging spectroscopic data: Implications for exploration drilling. *Economic Geology*. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5009> (in English)

## Сведения об авторах:

**Ескалиев Е. Т.**, постдокторант по образовательной программе 8D07201 – Геология и разведка месторождений полезных ископаемых, Школа наук о Земле, ВКТУ им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), [uyeskaliyev@edu.ektu.kz](mailto:uyeskaliyev@edu.ektu.kz); <https://orcid.org/0000-0003-0899-601X>  
**Рахымбердина М. Е.**, доктор Ph.D, ассоциированный профессор, декан школы наук о Земле, ВКТУ им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), [MRahymberdina@edu.ektu.kz](mailto:MRahymberdina@edu.ektu.kz); <https://orcid.org/0000-0002-2196-6512>

**Вач К.**, доктор Ph.D, директор ООО «EuroGV» (г. Прага, Чешская Республика), профессор школы наук о Земле, ВКТУ им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), [vach@eurogv.cz](mailto:vach@eurogv.cz); <https://orcid.org/0009-0001-7575-9105>

**Шульц Р.**, д. т. н., доктор Ph.D, ассоциированный профессор, научный сотрудник, заведующий лабораторией дистанционного зондирования и анализа, Междисциплинарный исследовательский центр авиации и космических исследований, Университет нефти и минералов им. короля Фахда (г. Дахран, Королевство Саудовская Аравия), [roman.shults@kfupm.edu.sa](mailto:roman.shults@kfupm.edu.sa); <https://orcid.org/0000-0003-2581-517X>

## Авторлар туралы мәліметтер:

**Ескалиев Е. Т.**, постдокторант, 8D07201 – Геология және пайдалы қазба кен орнын барлау білім беру бағдарламасы бойынша докторант, Жер туралы ғылымдар мектебі (Өскемен қ., Қазақстан)

**Рахымбердина М. Е.**, Ph.D докторы, қауымдастырылған профессор, Жер туралы ғылымдар мектебінің деканы, Д. Серикбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Өскемен қ., Қазақстан)

**Вач К.**, Ph.D докторы, «EuroGV» ЖШС директоры (Прага қ., Чех Республикасы), Жер туралы ғылымдар мектебінің профессоры, Д. Серикбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Өскемен қ., Қазақстан)

**Шульц Р.**, т. ғ. д., Ph.D докторы, қауымдастырылған профессор, ғылыми қызметкер, қашықтықтан зондтау және талдау зертханасының меңгерушісі, авиация және ғарышты игеру пәнаралық ғылыми-зерттеу орталығы, Фахд Патша атындағы мұнай және пайдалы қазбалар университеті (Дахран қ., Сауд Аравия Патшалығы)

## Information about the authors:

**Yeskaliyev Ye. T.**, Postdoctoral fellow in the educational program 8D07201 – Geology and Exploration of Mineral Deposits at the School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

**Rakhymberdina M. Ye.**, Ph.D, Associate Professor, Dean of School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

**Vach K.**, Ph.D, EuroGV, spol. s r.o. (Praga, Czech Republic), Professor of School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

**Shults R.**, DSc, Ph.D, Associate Professor, Research Scientist, Head of the Remote Sensing and Analysis Lab, Interdisciplinary Research Center for Aviation and Space Exploration, King Fahd University of Petroleum and Minerals (Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia)

Код МРНТИ 52.01.05

Г. С. Мадимарова<sup>1</sup>, \*Д. Н. Сулейменова<sup>2</sup>, Т. Б. Нурпеисова<sup>1</sup>, А. Е. Ормамбекова<sup>1</sup><sup>1</sup>Горно-металлургический институт имени О. А. Байконурова, КазННТУ им. К. И. Сатпаева  
(г. Алматы, Казахстан),<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан)

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ГОРНОГО МАССИВА В ПРИБОРТОВОЙ ЗОНЕ КАРЬЕРА

**Аннотация.** В статье представлены результаты комплексного геодезического и геомеханического исследования устойчивости бортов карьеров «Каратау-1» и «Каратау-2» фосфоритноносного бассейна Каратау. Исследование основано на интеграции ГНСС-наблюдений, аэрогеодезической съемки БПЛА, лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния массива. Сформирован цифровой геомеханический двойник карьера, включающий облако точек, цифровую модель рельефа и конечно-элементную модель по критерию Кулона – Мора. Коэффициент устойчивости борта, определенный методом касательных сил, составил  $K_y = 1,333$ , что превышает нормативное значение 1,25. Выявлен потенциально опасный юго-западный участок и сформирован его геодинамический риск-профиль. Результаты исследования могут быть использованы при организации геодезического мониторинга и прогнозирования деформационных процессов при открытой разработке месторождений.

**Ключевые слова:** геомеханическое моделирование, цифровой геомеханический двойник, интегральный индекс устойчивости, морфодинамическая сегментация, ГНСС-мониторинг, метод касательных сил, напряженно-деформированное состояние.

**Карьердің борт маңы аймағындағы тау жыныстары массивінің тұрақтылығын геомеханикалық модельдеу және басқару**

**Аңдатпа.** Мақалада Каратау фосфорит бассейніндегі «Каратау-1» және «Каратау-2» карьерлері борттарының тұрақтылығын кешенді геодезиялық және геомеханикалық зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеу ГНСС бақылауларын, БПЛА арқылы аэрогеодезиялық түсірілімді, лазерлік сканерлеуді және тау жыныстары массивінің кернеу-деформациялық күйін шектеулі элементтер әдісімен модельдеуді біріктіруге негізделген. Карьердің нүктелер бұлттын, сандық рельеф моделін және Кулон – Мор критерийі бойынша құрылған шектеулі элементтер моделін қамтитын цифрлық геомеханикалық егізі жасалды. Жанама күштер әдісімен анықталған борт тұрақтылығы коэффициенті  $K_y = 1,333$  болып, нормативтік 1,25 мәнінен жоғары екені анықталды. Потенциалды қауіпті оңтүстік-батыс учаске анықдалып, оның геодинамикалық тәуекел профилі қалыптастырылды. Зерттеу нәтижелері ашық кен өндіру жағдайында геодезиялық мониторингті ұйымдастыру мен деформациялық процестерді болжауда қолданылуы мүмкін.

**Түйінді сөздер:** геомеханикалық модельдеу, сандық геомеханикалық егіз, интегралды тұрақтылық индексі, морфодинамикалық сегментация, ГНСС мониторинг, тангенциалдық күш әдісі, кернеу-деформациялық күй.

### Geomechanical modelling and management of rock mass stability in the peripheral zone of an open-pit mine

**Abstract.** The article presents the results of a comprehensive geodetic and geomechanical study of slope stability at the Karatau-1 and Karatau-2 open-pit mines of the Karatau phosphorite basin. The study is based on the integration of GNSS observations, UAV aerial surveying, laser scanning, and finite element modeling of the stress-strain state of the rock mass. A digital geomechanical twin of the quarry was created, including a point cloud, a digital terrain model, and a finite element model based on the Coulomb – Mohr criterion. The slope stability factor determined by the tangential force method was  $K_y = 1.333$ , exceeding the standard value of 1.25. A potentially hazardous southwestern section was identified, and its geodynamic risk profile was developed. The obtained results can be used for organizing geodetic monitoring and forecasting deformation processes during open-pit mining operations.

**Key words:** geomechanical modeling, digital geomechanical twin, integral stability index, morphodynamic segmentation, GNSS monitoring, tangential force method, stress-strain state.

### Введение

Освоение фосфоритоносных месторождений Каратау-ского бассейна сопровождается формированием сложной геомеханической обстановки, обусловленной моноклиналильным залеганием рудных тел, выраженной расчлененностью рельефа и неоднородностью физико-механических характеристик массива. В условиях интенсивной открытой разработки возрастает необходимость перехода от локальных расчетов устойчивости к созданию интегрированной пространственно-аналитической модели массива.

Современная концепция геомеханического сопровождения горных работ предполагает формирование цифрового геомеханического двойника объекта – динамической трехмерной модели, объединяющей данные инструментальных измерений, дистанционного зондирования и численного анализа. Такой подход позволяет перейти от статической оценки коэффициента запаса устойчивости к формированию геодинамического риск-профиля борта карьера.

Цель исследования – разработка комплексной методики оценки устойчивости карьерных откосов на основе синтеза ГНСС-позиционирования, аэролазерного сканирования и конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния массива с введением интегральных показателей устойчивости.

### Методы и материалы

#### Объект исследования

Объектом исследования являются горные выработки открытого типа, расположенные в юго-восточной части фосфоритоносного бассейна Каратау на территории Таласского района Жамбылской области Республики Казахстан, разрабатываемые карьерами «Каратау-1» (Шиилибулак) и «Каратау-2» (Аксай) (рис. 1).

Основными полезными ископаемыми являются фосфатные и кремнистые руды, использующиеся для производства желтого фосфора и концентрированных удобрений [1].

Мощность рудных тел (при нормальном залегании) колеблется от 5,74 м до 21,2 м, суммарная мощность фосфоритных слоев достигает 45 м. Четкой закономерности в изменчивости мощности по падению и простиранию не наблюдается. Рудные тела представляют собой моноклиналино падающий пласт фосфоритов с опрокинутым залеганием на юго-запад под углами  $60^\circ$ – $80^\circ$ .

В пределах месторождения широко развиты наносы, представленные элювиальными, пролювиальными и аллювиальными образованиями, перекрывающими чехлом породы малокарской и чулактауской свиты. Наносы развиты в пределах долинной части месторождения и их мощность изменяется от 1,5 до 40 м.



**Рис. 1. Пространственная 3D-визуализация карьеров «Каратау-1» и «Каратау-2» с размещением опорных геодезических пунктов.**

**Сурет 1. Каратау-1 және Каратау-2 карьерлерінің кеңістіктік 3D визуализациясы, эталондық геодезиялық нүктелердің орналасқан жерімен.**

**Figure 1. Spatial 3D visualization of the Karatau-1 and Karatau-2 quarries with the location of reference geodetic points.**

В настоящее время на месторождении Каратау 1 ведутся горнопроходческие и добычные работы открытым способом, а на месторождении Каратау 2 – как открытым, так и подземным способом.

Фосфоритовые рудные тела приурочены к моноклинально падающим пластам с опрокинутым залеганием в юго-западном направлении и углами падения  $60^{\circ}$ – $80^{\circ}$ . Значительная крутизна залегания определяет специфику формирования карьерного контура, параметры уступов и объемы вскрышных работ, оказывая существенное влияние на проектирование системы разработки.

Мощность отдельных рудных пластов при условно нормальном залегании изменяется в пределах от 5,74 до 21,2 м, при этом суммарная мощность фосфоритных горизонтов достигает 45 м. Пространственная изменчивость мощности по простиранию и падению носит неупорядоченный характер, что указывает на структурную и литологическую неоднородность массива.

*Карьер «Каратау-1» (открытый способ разработки)*

Глубина вскрытия рудных тел относительно дневной поверхности составляет 10–25 м в пределах склоновых участков. В долинных зонах, где развиты элювиально-пролювиальные отложения, глубина залегания увеличивается и может достигать 40 м.

Максимальная текущая глубина горных работ по рельефу составляет порядка 180–200 м. Средняя глубина расположения промышленного горизонта в пределах действующей выемки варьирует в диапазоне 35–60 м относительно условной отметки верхней бровки.

*Карьер «Каратау-2» (комбинированная схема разработки)*

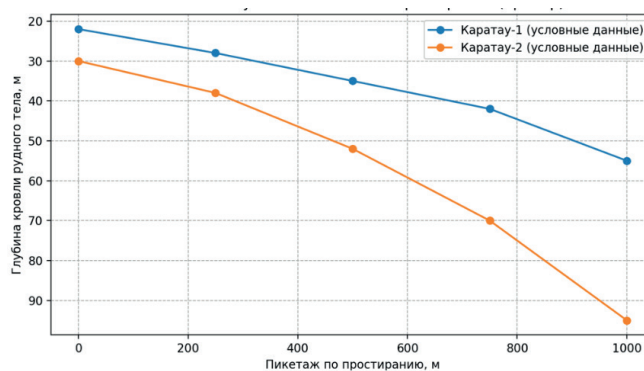
Начальное залегание рудных тел фиксируется на глубинах 15–30 м. В центральной части карьера глубина промышленного горизонта увеличивается до 70–90 м, а в зонах перехода к подземной отработке превышает 100 м.

С учетом совмещенной открыто-подземной схемы разработки максимальная глубина горных работ достигает 220–240 м.

Перекрывающие наносные образования характеризуются значительной изменчивостью мощности: от 1,5 м на

склоновых участках до 40 м в пределах долинных понижений. Данная вариабельность оказывает влияние на глубину вскрытия руд и формирование локальных геомеханических условий.

На рис. 2 показано изменение глубины залегания по простиранию.



**Рис. 2. Изменение глубины залегания по простиранию.**

**Сурет 2. Жатпа бағыты бойымен тереңдіктің өзгеруі.**

**Figure 2. Change in depth along strike.**

Пространственные параметры залегания представлены в таблице 1.

Значительные углы падения рудных пластов ( $60^{\circ}$ – $80^{\circ}$ ) в сочетании с большой глубиной горных работ обуславливают рост горного давления и интенсификацию напряженного состояния массива. В нижних частях бортов карьера формируются зоны концентрации главных сжимающих напряжений  $\sigma_1$ , что повышает вероятность развития глубинных поверхностей скольжения.

Увеличение глубины разработки существенно влияет на характер перераспределения напряженно-деформированного состояния массива, отражаясь на устойчивости уступов и способствуя формированию потенциальных оползневых клиньев в пределах ослабленных структурных зон.



**Таблица 1**  
**Пространственные параметры залегания**

*Таралудың кеңістіктік параметрлері*

*Spatial parameters of occurrence*

| Показатель                      | Каратау-1   | Каратау-2 |
|---------------------------------|-------------|-----------|
| Угол падения пласта             | 60°–80°     | 60°–80°   |
| Мощность рудного тела           | 5,74–21,2 м | 6–22 м    |
| Суммарная мощность горизонтов   | до 45 м     | до 45 м   |
| Глубина промышленного горизонта | 35–60 м     | 50–90 м   |
| Максимальная глубина разработки | 200 м       | 220–240 м |
| Мощность наносов                | 1,5–40 м    | 2–35 м    |

#### Методы исследования

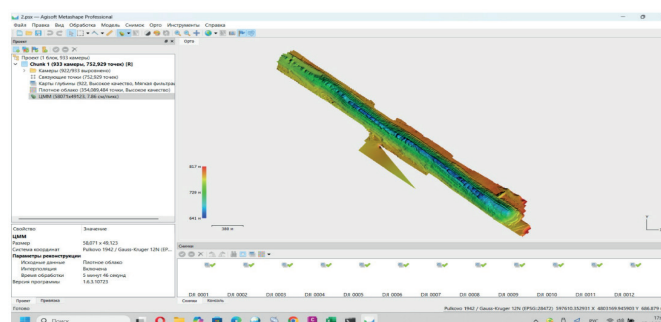
Измерения выполнялись ГНСС оборудованием в режиме Статика, методом сетевого позиционирования. В процессе работы соблюдены следующие необходимые условия наблюдений: максимальное расстояние между приемниками 5,0 км; минимальное количество наблюдаемых спутников для обработки 8; интервал записи 5 сек; маска по углу возвышения 10 градусов; точность получения координат: в плане 0,002 м; по высоте 0,002 м; GDOP (геометрия спутников) менее 5; длительность наблюдений на точке 80 минут. Параметры трансформации с WGS-84 в местную систему координат и высот приведены на рисунке 3 м [2].

Съемка БПЛА была обработана в Agisoft Metashape. Съемка со сканера обработана в Reconstructor. Обе съемки соединены в одно ПО Cloud Compare. Облако точек и 3D модель созданы на основе двух средств измерений (сканер + БПЛА) и представлены на рис. 3.

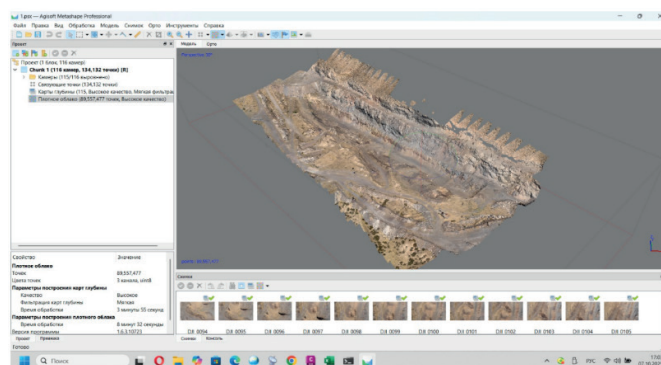
Построена цифровая модель рельефа (ЦМР / DEM) с градиентной цветовой кодировкой абсолютных высот, позволяющая наглядно отразить форму выработки и бортов карьера, а также выполнить количественный анализ перепадов высот, уклонов и потенциально опасных зон деформаций (рис. 3а, 3б). Красно-оранжевые тона соответствуют наибольшим отметкам верхней бровки борта, желто-зеленые – промежуточным уровням уступов, синие и голубые – пониженным участкам откосов и зонам возможной концентрации деформаций [3, 4].

Для построения геомеханической модели использованы оцифрованные контуры карьеров «Каратау-1» (Шилибулак) и «Каратау-2» (Аксай) месторождения фосфоритоносного бассейна Каратау. Путем их совмещения в единой системе координат сформирована трехмерная конечно-элементная модель массива. Граничные условия заданы следующим образом: плоскость  $XY$  закреплена по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ; плоскость  $YZ$  – по осям  $X$  и  $Y$ ; плоскость  $XZ$  – по оси  $Y$ .

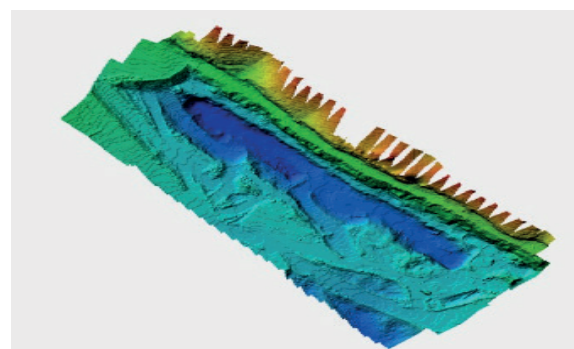
Определение напряженно-деформированного состояния массива и коэффициента запаса устойчивости бортов карьера выполнено методом конечных элементов в упруго-пластической постановке с использованием критерия



а



б



в

**Рис. 3. 3D модель месторождения фосфоритоносного бассейна Каратау.**

**Сурет 3. Каратау фосфориттік бассейнінің кен орнының 3D моделі.**

**Figure 3. 3D model of the Karatau phosphate-bearing basin deposit.**

прочности Кулона – Мора, реализованного в программном комплексе Geostab.

В ходе визуального обследования карьерных откосов карьера «Каратау-1» выявлены ослабленные участки. Физико-механические характеристики ослабленного участка откоса высотой 15 м по данным геологоразведочных работ приведены в таблице 2.

По результатам расчета установлено, что поверхность скольжения имеет кругло-цилиндрический характер с координатами центра  $X_c = 43,80$  м и  $Y_c = 109,19$  м при радиусе  $R = 7,89$  м. Расчет устойчивости борта выполнен методом касательных сил. Полученный коэффициент устойчивости составляет 1,333, что превышает допустимое нормативное значение 1,25, вследствие

чего рассматриваемый участок откоса можно считать устойчивым.

Таблица 2

Физико-механические характеристики грунтов

Кесте 2

Топырақтың физикалық және механикалық қасиеттері

Table 2

Physical and mechanical characteristics of soils

| № ИГЭ                                                                             | Наименование грунта | $\rho$ , г/см <sup>3</sup><br>плотность<br>грунта | $c$ , кПа<br>удельное<br>сцепление<br>грунта | $\varphi$ , град<br>угол<br>внутреннего<br>трения |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|  | Суглинок            | 2.65                                              | 25.0                                         | 23.0                                              |
|  | Известняк           | 2.70                                              | 500.0                                        | 38.0                                              |
|  | Доломит             | 2.89                                              | 420.0                                        | 35.0                                              |
|  | Песчаник            | 2.78                                              | 70.0                                         | 33.0                                              |

Площадь призмы возможного сдвижения составляет 33,52 м<sup>2</sup>, при этом расчетная схема включает 30 элементарных призм, что обеспечивает достаточную детальность анализа. Направление возможного сдвига породного массива характеризуется движением слева направо, что соответствует геометрии откоса и ориентации поверхности скольжения [5, 6].

В целом результаты расчета подтверждают наличие достаточного запаса устойчивости откоса и позволяют использовать полученные параметры для дальнейшей инженерно-геомеханической интерпретации и мониторинга.

### Результаты

На основе интеграции данных ГНСС-наблюдений, БПЛА и лазерного сканирования сформирована высокоточная цифровая модель рельефа (DEM) с плотностью облака точек, обеспечивающей детальность анализа уступов и бортов карьера [7–9].

По результатам выполненного морфометрического анализа установлено, что разность абсолютных отметок между верхней бровкой и подошвой откоса достигает 200 м. Средние значения углов наклона бортов изменяются в пределах 32–41°, при этом на юго-западном участке выявлены локальные зоны увеличения крутизны до 44°, что свидетельствует о формировании морфодинамически напряженных сегментов откоса.

Выполненное конечно-элементное моделирование в упруго-пластической постановке позволило выявить характер перераспределения главных напряжений в пределах исследуемого откоса.

Анализ полученных результатов показал, что максимальные касательные напряжения локализуются в средней части откоса, тогда как концентрация главных сжимающих напряжений  $\sigma_1$  формируется преимущественно в основании борта. В зоне контакта рыхлых наносов с коренными породами фиксируется область пониженной прочности, характеризующаяся снижением сопротивления сдвигу и повышенной деформационной восприимчивостью.

Установлен эффект геомеханической анизотропии массива, обусловленный различием физико-механических свойств фосфоритов, известняков и доломитов. Литологическая неоднородность и контраст прочностных параметров способствуют формированию потенциальной поверхности скольжения кругло-цилиндрического типа.

Расчетная поверхность скольжения характеризуется следующими параметрами: координаты центра  $X_c = 43,80$  м и  $Y_c = 109,19$  м, радиус  $R = 7,89$  м. Площадь призмы возможного сдвижения составляет 33,52 м<sup>2</sup>, а ее ориентировочный объем – 168–185 м<sup>3</sup> с учетом средней мощности вовлеченного массива.

Для выявления потенциально опасной поверхности скольжения выполнено сечение 3D модели по наиболее опасному участку. Потенциальная поверхность скольжения представлена на рис. 4.

Для оценки устойчивости откоса использована методика предельного равновесия с разбиением призмы возможного сдвижения на элементарные отсеки. Каждый отсек рассматривается как самостоятельный расчетный элемент с осредненными геометрическими и физико-механическими характеристиками грунта (таблица 3).

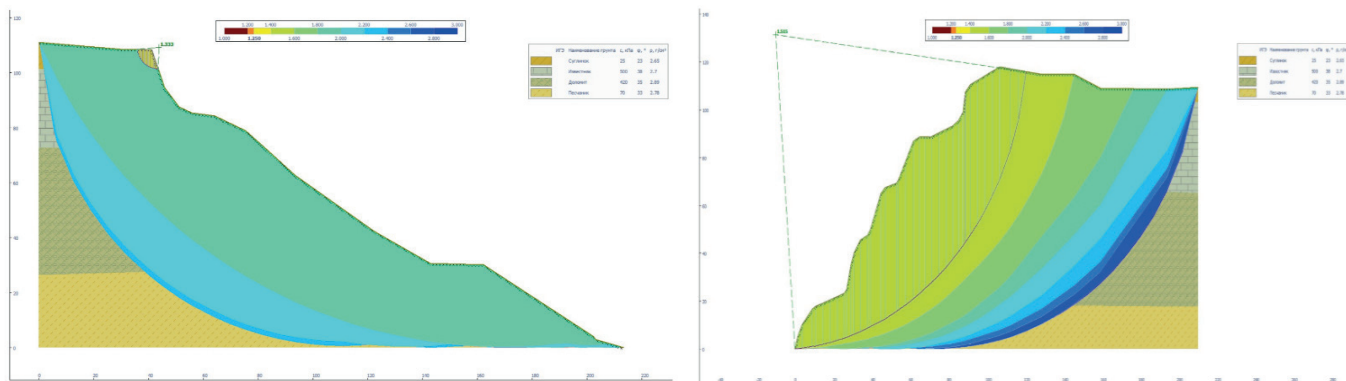


Рис. 4. Поверхность скольжения.

Сурет 4. Беттік жылжыма.

Figure 4. Sliding surface.

Таблица 3

Таблица расчета коэффициента устойчивости. Метод касательных сил

Кесте 3

Тұрақтылық коэффициентін есептеу кестесі. Жанама күш әдісі

Table 3

Stability coefficient calculation table. Tangential force method

| Порядковый номер отсека | $T_{акт\ i}$<br>кН/м<br>касательная проекция к основанию i-го отсека равнодействующей внешних сил | $T_{реакт\ i\ тр/сцепл.}$<br>кН/м<br>касательная проекция равнодействующей сил трения и сцепления i-го отсека | $T_{реакт\ i\ арм.}$<br>кН/м<br>касательная проекция равнодействующей сил от армирующих элементов i-го отсека | $T_{реакт\ i}$<br>кН/м<br>касательная проекция всех реактивных сил i-го отсека | $\Delta E_{оп\ i}$<br>кН/м изменение оползневое давления в пределах i-го отсека<br>$\Delta E_{оп\ i} = K_{акт} * T_{акт\ i} - T_{реакт\ i}$ | $E_{оп\ i}$<br>кН/м<br>оползневое давление i-го отсека. $E_{оп\ i} = \sum \Delta E_{оп\ i}$ |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1–20                    | 441.9                                                                                             | 588.9                                                                                                         | 0.0                                                                                                           | 588.9                                                                          | 0.0                                                                                                                                         |                                                                                             |

На основании комплексного анализа введен показатель – геодинамический риск-профиль участка, учитывающий: коэффициент запаса устойчивости, градиент высот, концентрацию касательных напряжений и наличие ослабленных зон.

Юго-западный участок отнесен к категории потенциально активных сегментов второго уровня риска, что не требует немедленного укрепления, но предполагает усиленный инструментальный мониторинг.

Таблица 4

Обобщенный количественный итог

Кесте 4

Қорытынды сандық нәтижелер

Table 4

Summary quantitative results

| Показатель                     | Значение             |
|--------------------------------|----------------------|
| Коэффициент устойчивости $K_y$ | 1,333                |
| Нормативное значение           | 1,25                 |
| Резерв устойчивости            | 6,64%                |
| Радиус поверхности скольжения  | 7,89 м               |
| Площадь призмы сдвига          | 33,52 м <sup>2</sup> |
| Количество отсеков             | 30                   |
| Максимальный угол откоса       | до 44°               |

Получен коэффициент устойчивости:

$$K_y = \Sigma T_{реакт\ i} / \Sigma T_{акт\ i}$$

$$K_y = 588.9 / 441.9 = 1.333$$

Результаты расчета методом касательных сил: призма возможного сдвига разбита на 30 элементарных отсеков, что обеспечило высокий уровень дискретизации расчетной схемы.

Суммарные значения:  $\Sigma T_{акт} = 441,9$  кН/м;  $\Sigma T_{реакт} = 588,9$  кН/м;  $K_y = 1,333$ .

Полученный коэффициент превышает нормативное значение 1,25, что соответствует категории «устойчивое состояние с допустимым геодинамическим резервом» [10–12].

Дополнительно рассчитан:

коэффициент структурного резерва устойчивости ( $K_{sr}$ )

$$K_{sr} = \frac{K_y - K_{norm}}{K_{norm}} = 0,0664,$$

что соответствует резерву устойчивости 6,64%.

Комплексный анализ геометрических, геомеханических и расчетных параметров позволил сформировать интегрированную количественную характеристику устойчивости бортов карьеров Бассейна Каратау в таблице 4.

#### Обсуждение результатов

Полученное значение коэффициента устойчивости свидетельствует о наличии достаточного запаса прочности, однако морфодинамический анализ указывает на локальные зоны перераспределения напряжений.

Интеграция данных БПЛА и лазерного сканирования позволила повысить точность построения геометрии откоса и минимизировать аппроксимационные погрешности конечно-элементной модели.

Применение цифрового геомеханического двойника обеспечивает переход от дискретной оценки устойчивости к динамическому мониторингу. Выявленный юго-западный участок характеризуется повышенной концентрацией касательных напряжений и требует включения в приоритетный контур наблюдений.

Предложенный интегральный индекс устойчивости позволяет учитывать не только коэффициент запаса, но и пространственные характеристики массива, что расширяет аналитический инструментарий геомеханической интерпретации.

#### Выводы

Выполненное исследование, представленное в работе «Геомеханическое моделирование и управление устойчивостью горного массива в приборотовой зоне карьера», позволило сформировать научно обоснованную мето-



дическую основу оценки устойчивости бортов карьеров «Каратау-1» и «Каратау-2» фосфоритоносного бассейна Каратау.

Установлено, что сложные геолого-структурные условия месторождения – крутое моноклинальное залегание рудных пластов (60–80°), значительная глубина разработки (до 240 м), изменчивая мощность рудных тел и наносных образований – формируют напряженное и пространственно неоднородное состояние массива. Численное моделирование в упруго-пластической постановке по критерию Кулона – Мора выявило зоны концентрации главных напряжений в нижних частях бортов и подтвердило возможность формирования кругло-цилиндрической поверхности скольжения.

Расчет устойчивости методом касательных сил показал коэффициент запаса устойчивости  $K_u = 1,333$ , что превышает нормативное значение 1,25 и соответствует категории устойчивого состояния с допустимым геодинамическим резервом (6,64%). При этом морфометрический и геомеханический анализ позволил выделить юго-западный участок как сегмент повышенной геодинамической чувствительности второго уровня риска, требующий усиленного инструментального контроля.

Интеграция ГНСС-наблюдений, БПЛА, лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования позволила сформировать цифровой геомеханический двойник карьера, обеспечивающий переход от статической оценки устойчивости к адаптивному мониторингу и прогнозированию деформационных процессов.

Таким образом, предложенный комплексный подход к геомеханическому моделированию и управлению устойчивостью горного массива обеспечивает повышение надежности инженерных решений, позволяет своевременно выявлять потенциально опасные зоны и может быть рекомендован для внедрения в практику геомеханического сопровождения открытых горных работ в условиях Каратауского фосфоритоносного бассейна.

#### Благодарность

*Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета Науки Министерства науки и высшего образования РК в рамках грантового финансирования ИРН №АР23489372 «Исследование геотехнического состояния горного массива и разработка методики геомеханического комплексного мониторинга для прогноза деформационных процессов при освоении недр».*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Передовые методы топографической и геодезической съемки и GNSS в городском планировании / G. Madimarova [и др.] // *Journal of Applied Geodesy*. – 2024. – С. 1–14 (на английском языке)
2. Проверка точек государственной геодезической сети и ГНСС-мониторинг в Казахстане / G. Madimarova [и др.] // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Series of Geology and Technical Sciences*. – 2024. – Т. 1. – С. 179–189 (на английском языке)
3. Исследование изменений окислительно-восстановительного потенциала при обогащении окисленных полиметаллических руд / A. Mambetaliyeva [и др.] // *Applied Sciences Switzerland*. – 2025. – Т. 15. – С. 1–12 (на английском языке)
4. Мадимарова Г. С. Инновационные подходы к геомеханическому мониторингу при разработке минеральных ресурсов : монография. – Алматы: Изд-во Казахский технологический университет имени К. И. Сатпаева, 2024. – 157 с. (на казахском языке)
5. Нурпеисова М. Б. [и др.] Экологическая и промышленная безопасность освоения недр. – Алматы: Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, 2016. – 456 с. (на русском языке)
6. Трубецкой К. Н. Состояние и основные направления комплексного освоения и сохранения ресурсов земных недр // *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: IV Междунар. науч. конф. ИПКОН РАН*. – М., 2020. – С. 5–11 (на русском языке)
7. Нурланқызы Т., Сулейменова Д. Н., Жантуева Ш. А. Изучение физико-механических свойств пород месторождения бассейна Каратау // *Маркшейдерия и недропользование*. – 2024. – № 2. – С. 46–50 (на русском языке)
8. Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Э. О геодинамической безопасности горных работ в удароопасных условиях на примере Хибинских апатитовых месторождений // *ФТПРПИ*. – 2018. – № 5. – С. 33–44 (на русском языке)
9. Проект № АР23489372 «Исследование геотехнического состояния горного массива и разработка методики геомеханического комплексного мониторинга для прогноза деформационных процессов при освоении недр» (2024–2026 гг.) (на русском языке)
10. Использование индекса NDVI при мониторинге земель фосфоритовых месторождений / Г. С. Мадимарова [и др.] // *Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева*. – 2023. – № 3. – С. 88–96 (на русском языке)
11. Исследование влияния оставления пустой породы в выработанном пространстве на геомеханическое состояние горной массы, окружающей забой длинной стены / A. Smoliński [и др.] // *Energies*. – 2022. – Т. 15. – С. 2–17 (на английском языке)

12. Tereshchuk R. M., Khoziaikina N. V., Babets D. V. Обоснование рациональных параметров крепления кровли // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2018. – № 1. – С. 19–26 (на английском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Қалалық жоспарлау саласындағы жетілдірілген топографиялық-геодезиялық түсірулер және FHCЖ әдістемелері / G. Madimarova [және т. б.] // *Journal of Applied Geodesy*. – 2024. – Б. 1–14 (ағылшын тілінде)
2. Қазақстанда мемлекеттік геодезиялық желінің нүктелерін тексеру және GNSS мониторингін жүргізу / G. Madimarova [және т. б.] // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Series of Geology and Technical Sciences*. – 2024. – Б. 179–189 (ағылшын тілінде)
3. Тотықтырылған полиметалл рудаларын байыту кезіндегі тотықтыру–тотықсыздану потенциалының өзгерістерін зерттеу / Mambetaliyeva A. [және т. б.] // *Applied Sciences Switzerland*. – 2025. – Т. 15. – Б. 1–12 (ағылшын тілінде)
4. Мадимарова Г. С. Пайдалы қазбаларды игерудің геомеханикалық мониторинг жүргізудегі инновациялық тәсілдер : монография. – Алматы: Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 2024. – 157 б. (қазақ тілінде)
5. Нұрпейісова М. Б. жалпы редакциясын басқарған. Жер қойнауын игерудің экологиялық және өнеркәсіптік қауіпсіздігі. – Алматы: Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 2016. – 456 б. (орыс тілінде)
6. Трубецкой К. Н. Жер асты ресурстарын кешенді игеру мен сақтаудың жағдайы және негізгі бағыттары // Жер асты ресурстарын кешенді игеру мен сақтау мәселелері мен перспективалары: Ресей Ғылым академиясының академигі К. Н. Трубецкой атындағы IV Халықаралық ғылыми мектеп конференциясының материалдары. – Мәскеу: PFA IPKON, 2020. – Б. 5–11 (орыс тілінде)
7. Нұрланқызы Т., Сүлейменова Д. Н., Жантөева Ш. А. Қаратау бассейнінің кен орнындағы жыныстардың физикалық-механикалық қасиеттерін зерттеу // *Маркшейдерия және жер қойнауын пайдалану*. – 2024. – № 2. – Б. 46–50 (орыс тілінде)
8. Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Е. Хибини апотит кен орындарының мысалында соққы қауіп бар жағдайларда тау-кен жұмыстарының геодинамикалық қауіпсіздігі туралы // *FTPRI*. – 2018. – № 5. – Б. 33–44 (орыс тілінде)
9. AR23489372 нөмірлі жоба «Тасты массаның геотехникалық жағдайын зерттеу және жер асты пайдалы қазбаларды өндіру кезінде деформациялық процестерді болжауға арналған кешенді геомеханикалық мониторинг әдістемесін әзірлеу» (2024–2026 жж.) (орыс тілінде)
10. Фосфат кен орындарындағы жерді мониторингтеуде NDVI индексін қолдану / Г. С. Мадимарова [және т. б.] // Д. Серікбаев Батыс Қазақстан техникалық университетінің хабаршысы. – 2023. – № 3. – Б. 88–96 (орыс тілінде)
11. Ұзақ қабырғалы бетті қоршаған тау жынысы массасының геомеханикалық күйіне қазып алынған кеңістікте қалған қалдық жыныстардың әсерін зерттеу / A. Smoliński [және т. б.] // *Energies*. – 2022. – Т. 15. – Б. 2–17 (ағылшын тілінде)
12. Tereshchuk R. M., Khoziaikina N. V., Babets D. V. Шатырдың болттық қосылыстарының ұтымды параметрлерін негіздеу // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2018. – № 1. – Б. 19–26 (ағылшын тілінде)

#### REFERENCES

1. Advanced topographic-geodetic surveys and GNSS methodologies in urban planning / G. Madimarova et al. // *Journal of Applied Geodesy*. – 2024. – P. 1–14 (in English)
2. Inspection and carrying out GNSS monitoring of points of the state geodetic network in the territory of Kazakhstan / G. Madimarova et al. // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Series of Geology and Technical Sciences*. – 2024. – Vol. 1. – P. 179–189 (in English)
3. Study of Oxidative–Reductive Potential Changes in the Enrichment of Oxidized Polymetallic Ores / A. Mambetaliyeva et al. // *Applied Sciences Switzerland*. – 2025. – Vol. 15. – P. 1–11 (in English)
4. Madimarova G. S. Innovative approaches to geomechanical monitoring in mineral resource development: monograph. – Almaty : Kazakh Technological University named after K. I. Satpayev, 2024. – 157 p. (in Kazakh)
5. Nurpeisova M. B. et al. *Jekologicheskaja i promyshlennaja bezopasnost' osvoenija nedr [Environmental and industrial safety of subsoil development]*. – Almaty: Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, 2016. – 456 p. (in Russian)
6. Trubeckoj K. N. *Sostojanie i osnovnye napravlenija kompleksnogo osvoenija i sohraneniya resursov zemnyh nedr [Status and main directions of comprehensive development and conservation of subsoil]*

- resources]. In: *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sohraneniya zemnyh neдр: materialy IV konferencii Mezhdunar. nauch. shkoly akad. RAN K. N. Trubeckogo [Problems and Prospects of Integrated Development and Conservation of Mineral Resources: IV International Scientific Conference of IPKON RAS]*. – Moscow: IPKON RAN, 2020. – P. 5–11 (in Russian)
7. Nurlanқызы Т., Sulejmenova D.N., Zhantueva Sh.A. *Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh svojstv porod mestorozhdeniya bassejna Karatau [Study of the physical and mechanical properties of rocks in the Karatau basin deposit]. Marksheideriya i nedropol'zovanie [Mine Surveying and Subsoil Use]*. – 2024. – No. 2. – P. 46–50 (in Russian)
  8. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. Je. *O geodinamicheskoy bezopasnosti gornyh rabot v udaroopasnyh usloviyah na primere Hibinskih apatitovyh mestorozhdenij [On the geodynamic safety of mining operations in shock-hazardous conditions, using the example of the Khibiny apatite deposits]. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh [Physical and Technical Problems of Mineral Development]*. – 2018. – No. 5. – P. 33–44 (in Russian)
  9. *Proekt №AR23489372 «Issledovanie geotekhnicheskogo srostojanija gornogo massiva i razrabotki metodiki geomehanicheskogo kompleksnogo monitoringa dlja prognoza deformacionnyh processov pri osvoenii neдр» (2024–2026 gg.) [Research into the geotechnical stability of rock masses and development of a comprehensive geomechanical monitoring methodology for predicting deformation processes during subsoil development (2024–2026 gg.)]* (in Russian)
  10. *Ispol'zovanie indeksa NDVI pri monitoringe zemel' fosforitovyh mestorozhdenij [Use of the NDVI index in monitoring land with phosphate deposits]* G. S. Madimarova et al. // *Vestnik VKTU im. D. Serikbaeva [Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University]*. – 2023. – No. 3. – P. 88–96 (in Russian)
  11. *Research into impact of leaving waste rocks in the mined-out space on the geomechanical state of the rock mass surrounding the longwall face* / A. Smoliński et al. // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 2–17 (in English)
  12. *Tereshchuk R. M., Khoziaikina N. V., Babets D. V. Substantiation of rational roof-bolting parameters* // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2018. – No. 1. – P. 19–26 (in English)

#### Сведения об авторах:

**Мадимарова Г. С.**, к. т. н., ассоциированный профессор, Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова, КазННТУ им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), [madimarovagulmira69@gmail.com](mailto:madimarovagulmira69@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-9155-6332>

**Сулейменова Д. Н.**, Ph.D, ст. преподаватель, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, факультет географии и природопользования, кафедра «Картография и геоинформатика» (г. Алматы, Казахстан), [suleymenovad81@gmail.com](mailto:suleymenovad81@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-1880-0615>

**Нурпеисова Т. Б.**, к. т. н., доцент, профессор, Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова, КазННТУ им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), [t.nurpeissova@satbayev.university](mailto:t.nurpeissova@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0001-8162-6053>

**Ормамбекова А. Е.**, Ph.D, магистр техн. наук, ассоциированный профессор, Горно-металлургический институт имени О. А. Байконурова, КазННТУ им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), [a.ormambekova@satbayev.university](mailto:a.ormambekova@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0003-2735-0257>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Мадимарова Г. С.**, т. ғ. к., қауымдастырылған профессор, О. А. Байқоңыров атындағы тау-кен металлургия институты, ҚазҰТЗУ Қ. И. Сәтбаев (Алматы қ., Қазақстан)

**Сулейменова Д. Н.**, Ph.D, аға оқытушы, Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби, география және табиғатты пайдалану факультеті, «Картография және геоинформатика» кафедрасы (Алматы қ., Қазақстан)

**Нұрпеисова Т. Б.**, т. ғ. к., доцент, О. А. Байқоңыров атындағы тау-кен металлургия институтының профессоры, ҚазҰТЗУ Қ. И. Сәтбаев (Алматы қ., Қазақстан)

**Ормамбекова А. Е.**, Ph.D, техн. ғылымдарының магистрі, қауымдастырылған профессор, О. А. Байқоңыров атындағы тау-кен металлургия институты, ҚазҰТЗУ Қ. И. Сәтбаев (Алматы қ., Қазақстан)

#### Information about the authors:

**Madimarova G. S.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, O. A. Baikonurov Mining and Metallurgical Institute, K. I. Satpayev KazNITU (Almaty, Kazakhstan)

**Suleimenova D. N.**, Ph.D, Senior Lecturer, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Geography and Natural Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics (Almaty, Kazakhstan)

**Nurpeisova T. B.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor O.A. Baikonurov Mining and Metallurgical Institute, K.I. Satpayev KazNITU (Almaty, Kazakhstan)

**Ormambekova A. E.**, Ph.D, Master of Technical Sciences, Associate Professor, O. A. Baikonurov Mining and Metallurgical Institute, K. I. Satpayev KazNTU (Almaty, Kazakhstan)





ВАШ  
**ПАРТНЁР**  
В СВАРКЕ  
**И РЕЗКЕ**

[almaty.sales@esab.com](mailto:almaty.sales@esab.com) / [esab.com](http://esab.com)



Код МРНТИ 52.13.15

E. R. Khalikova, \*A. E. Zhumabekova, V. F. Demin, D. S. Syzdykbaeva  
 NJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

## STUDY OF THE PRODUCTION MINE WORKINGS STABILITY SUPPORTED AT THE BOUNDARY WITH THE MINED-OUT SPACE OF THE WORKING FACES

**Abstract.** Study was conducted on the stability of the reused development workings by managing the geomechanics of the marginal massif from increased stresses using anchor support, including production workings supported at the boundary with the mined-out space of the working faces. The geomechanical state of the massif of underground mine workings on coal seams was studied for their efficient and safe operation in the mines of the Karaganda basin, ensuring stability with minimal consumption of supporting materials and labor intensity during subsequent maintenance at the boundary with the mined-out space of the working faces during mining development work. Deformation zones in the host rock were identified for intervention to ensure their stable support under challenging mining conditions and to determine support schemes for the cutting workings and adjacent coal-rock massif.

**Key words:** mining works, technology, strength parameters, lining, workings, rock pressure, massif geomechanics, mining-geological and mining-technical conditions, deformed state.

**Жұмыс беттерінің өндірілген кеңістігімен шекарада бекітілген өндірістік шахта қазбаларының тұрақтылығын зерттеу**

**Аннотация.** Қайта пайдаланылған игеру жұмыстарының тұрақтылығы туралы зерттеу шекті массивтің геомеханикасын зәкірлік тіреуішті қолдана отырып, кернеулердің жоғарылауынан, оның ішінде жұмыс беттерінің қазылған кеңістігімен шекарада бекітілген өндірістік қазбаларды басқару арқылы жүргізілді. Көмір қабаттарындағы жерасты шахталары массивінің геомеханикалық жағдайы Олардың Қарағанды бассейнінің шахталарында тиімді және қауіпсіз жұмыс істеуі үшін зерттелді, бұл тау-кен жұмыстарын жүргізу кезінде жұмыс беттерінің өндірілген кеңістігімен шекарада кейінгі техникалық қызмет көрсету кезінде тірек материалдарды минималды тұтынумен және еңбек сыйымдылығымен тұрақтылықты қамтамасыз етті. Тау жыныстарындағы деформация аймақтары күрделі тау-кен жағдайларында олардың тұрақты қолдауын қамтамасыз ету және кесу жұмыстары мен іргелес көмір-тау массивін қолдау схемаларын анықтау үшін араласу үшін анықталды.

**Түйінді сөздер:** тау-кен жұмыстары, технологиясы, беріктік параметрлері, төсемі, қазбалары, тау жыныстарының қысымы, массив геомеханикасы, тау-кен-геологиялық және тау-кен-техникалық жағдайлары, деформацияланған күйі.

**Исследование устойчивости эксплуатационных выработок, поддерживаемых на границе с выработанным пространством очистных забоев**

**Аннотация.** Произведено исследование устойчивости повторно используемых подготовительных выработок за счет управления геомеханикой приконтурного массива от повышенных напряжений с применением анкерной крепи, в т. ч. эксплуатационных выработок, поддерживаемых на границе с выработанным пространством очистных забоев. Исследовано геомеханическое состояние массива подземных горных выработок на угольных пластах для их эффективной и безопасной эксплуатации на шахтах Карагандинского бассейна с обеспечением устойчивости при минимальном расходе крепежных материалов и трудоемкости при последующем поддержании на границе с выработанным пространством очистных забоев при горно-подготовительных работах. Определены области деформаций во вмещающих породах для воздействия, для обеспечения стабильного поддержания их в сложных условиях разработки и для определения схем крепления присечных эксплуатационных выработок и прилегающего углетеродного массива.

**Ключевые слова:** горные работы, технология, прочностные параметры, крепление, выработка, горное давление, геомеханика массива, горно-геологические и горнотехнические условия, деформированное состояние.

### Introduction

The efficiency of coal seam development depends significantly on the development plan and mining system. When developing gently sloping seams, the non-core technology is widely used. Its use at deep horizons is accompanied by deterioration of the development workings. The costs of protection and maintenance often exceed the costs of excavation by 2.0 to 2.5 times. This is due to the increased and uneven distribution of rock pressure, significantly more complex conditions for maintaining the workings, insufficient bearing capacity, and the high labor intensity of supporting maintenance works. Increasing the efficiency of existing mines while maintaining the existing volume of coal production is possible by increasing the load on the working faces, by advancing them by 8–12 m/day, and to recreate prepared reserves, the rate of development of development workings should be at least 15–25 m/day.

In modern mines, three pillarless mining schemes are used: with the preservation of workings for reuse; with the construction of new workings adjacent to the mined-out space; with the construction of paired workings with the extraction of a pillar between them by an adjacent longwall.

The most progressive design of the non-pillar technology is the technology of preparing and developing seams by preserv-

ing the workings on the border with the working space during the development of the adjacent longwall.

The transition of mining operations to deeper levels is accompanied by a change in the manifestation of rock pressure. Unlike at shallow depths, where a collapse arch forms at the roof of the working, at greater depths, noticeable deformation occurs along the entire perimeter of the working. Development workings deform under the influence of stresses, both during excavation and during operation. Furthermore, workings reused fall within the zone of influence of stope operations, leading to increased deformation of the rock and support structures, necessitating their re-support.

In this regard, the development of new and improvement of existing methods for maintaining workings during their service life with minimal costs is relevant.

### Research materials and methods

In accordance with the recommendations [1], permanent artificial barriers should be used to protect workings at the border with mined-out spaces: organ rows, row of pillars, fires made of sleeper beams filled with rock, fires with an organ row, organ rows with a rubble strip, high-strength supports with limited flexibility, etc., and portable protective supports made of metal friction pillars, hydraulic pillars, etc.

When maintaining a working face for reuse, reinforcement support – two hydraulic props (HP or F friction props) – was installed ahead of the working face. Behind the working face, the support was reinforced with a third prop, and in the spaces between the main support props on the mined-out side, a series of two props was installed between the main support frames. After the active stage of rock movement had passed, the hydraulic props or friction props were removed and moved forward to the longwall, while the wooden props remained until the working face was abandoned. This method ensured the working surface remained operational until its abandonment.

At the Vorkutinskaya mine (Russia), a method of protecting workings using strips of lightweight gold-cement blocks was successfully tested during development of the «Chetverty» seam [2]. The seam thickness is 1.48 m. Roof displacements in the experimental section of the workings were reduced by 1.5–2.0 times compared to the original.

At the «Zyryanovskaya» mine of the «Yuzhkuzbassugol» Production Association [3], portable hydraulic pillar support was used as reinforcement. The main support for the workings consisted of three bolts with metal caps under a metal mesh. At the junction of the roadway with the longwall, on the mined-out side, a row of wooden hydraulic pillar support was installed at a rate of 3 frames per meter. A row of hydraulic pillars was used as reinforcing cut-off support at a distance of 5–6 m behind the longwall face. At a distance of 100 m behind the longwall face, the hydraulic pillar was removed and moved forward to the longwall face, and a leg of the standard support was installed in its place. The condition of the workings was satisfactory. This method is recommended for use in seams up to 3.5 m thick.

At the «Glubokaya» mine of the «Donetskugol» Production Association, the 35th eastern passage was protected by an 8-meter wide rubble strip. The working support was an AP-3 arched metal one.

Hydraulic prop reinforcement was installed under the support frames, with a total bearing capacity of 500 kN/m. The roof rock is 13 m thick clay shale. Roof and soil displacements were reduced by a factor of 1.5. At the «Krasnoarmeyskaya – Kapitalnaya» mine, at depths of 850–950 m, the use of reinforcement with a bearing capacity of 700 kN/m reduces heaving of sandy shale in the soil by 20–35%.

There is also experience in protecting reused workings with artificial fencing [5, 6, 7], for example, single or double rubble strips, reinforced concrete blocks, rolling fires, wooden organ 1–3-row supports, bollards made of expanded clay concrete, sawdust concrete, and reinforced concrete blocks enclosed in wooden fires (PA «Donbassanthracite», PA «Rostovugol»). These types of structures are often destroyed at some distance behind the longwall by thick sandstones lying in the roof or are pressed into weak soil rocks, failing to ensure a satisfactory state of the workings. Research Institute of Mining has developed П-shaped structures of reinforced concrete blocks filled with sand or rock intended for seams up to 2.5 m thick.

Cast strips constructed from hardening materials are considered highly rigid artificial protective structures [8]. Strips at least 0.7 times the seam thickness wide are mechanized behind the working face and, due to the high rate of material hardening, begin to quickly absorb loads. This is a typical support-cut

artificial barrier, performing both cutoff functions due to its high rigidity and support functions due to its high load-bearing capacity.

In some cases, it is advisable to carry out workings towards the existing working face, adjacent to the mined-out space [9], or to carry out (design) them in it.

In the most challenging mining and geological conditions, development workings were typically constructed and maintained using arched supports. Currently, bollards made of reinforced concrete blocks, reinforced concrete blocks, and fire supports combined with organ supports are widely used.

However, despite scientific and technological progress, the problem of maintaining workings using pillarless technology with the reuse of mining workings has not been fully resolved. This is primarily due to the fact that the currently used method of supporting workings using framed metal arched and trapezoidal supports with reinforcing props is highly labor-intensive and metal-intensive. However, in conditions where the coal seam roofs contain layered fractured rocks over 3–4 meters thick, and the main roof contains difficult-to-break rock, maintenance-free workings cannot be ensured for the entire service life of the working.

Statement of the research problem. The change in the length of the consoles on the side of the mined-out space directly affects the stress-strain state of the near-edge massif, the size of the displacement zones in the edge zones of the longwall face and the load on the support that outlines the workings.

The conduct of cleaning operations leads to a periodic change in the length of the hanging consoles, which entails a periodic change in stresses, under the influence of which complex geo-mechanical processes occur in the marginal zones of the longwall, as well as in the rocks enclosing the workings, the result of which is a decrease in the stability of the workings in question.

Changes in the velocities and magnitudes of displacements in the contour of the workings depend on their protection methods, the physical and mechanical properties of the host rock, the shape and size of the workings' cross-section, and the technological features of the mining operations. During non-core mining, workings for reuse must be sufficiently stable and meet safety regulations regarding the cross-sectional area. This can be achieved if the deformations and stresses in the marginal zone of the workings in question do not exceed permissible values. To reduce the costs of protecting and maintaining the workings, it is necessary to reduce the stresses in the marginal zone of the workings, thereby reducing the load on the protective structures.

A promising approach to reducing the labor and metal consumption of supporting workings and increasing their stability is the use of roof bolts. However, experience has shown that using conventional rigid roof bolts 1.8–2 meters long is effective only for roofs with low thicknesses and small displacements during development outside the working zone. Large rock movements in the bearing pressure zone of the first face, and especially during periods of supporting workings at the boundary with the mined-out space, have led to the breakout of locks or failure of rods, necessitating the installation of frame supports in these workings as well. Therefore, the urgent problem of reliably supporting reusable, non-bolted workings using cost-effective roof bolts remains unresolved.



To determine the stability of the workings supported behind the production face, a selection of technical documentation from various mines in the Karaganda basin was made for the development of thin and complex seams. The parameters and design features of the lining reinforcement and workings protection against the effects of mining operations were identified. Analysis showed that the selection of these means for specific mining and geological conditions is often made in an unsystematic manner, ignoring such an important factor as the extracted seam thickness, and failing to achieve the required workings stability. Analysis of the measurement results [10] made it possible to determine the stress-strain state of the coal and rock mass around the workings for specific mining and geological conditions, depending on the lining reinforcement and protection methods. In terms of magnitude and distribution of stress concentration at a seam thickness of 1 to 2 m and protection of the workings with wooden fires and block walls: the maximum values on the coal massif side and on the mined-out space side are approximately the same and amount to 150–170 kN/m<sup>2</sup>, and with organ support they decrease to 130–150 kN/m<sup>2</sup> (Table 1). At a coal seam thickness of 2.0–2.5 m and protection with organ support: on the massif side, the stress concentration is 160–170 kN/m<sup>2</sup>, and on the mined-out space side – 230–250 kN/m<sup>2</sup>, above the working head – 50–70 kN/m<sup>2</sup> (Figures 1, 2). Moreover, an increase in the number of organ rows reduces the rigidity of the support and the use of more than one organ row is irrational.

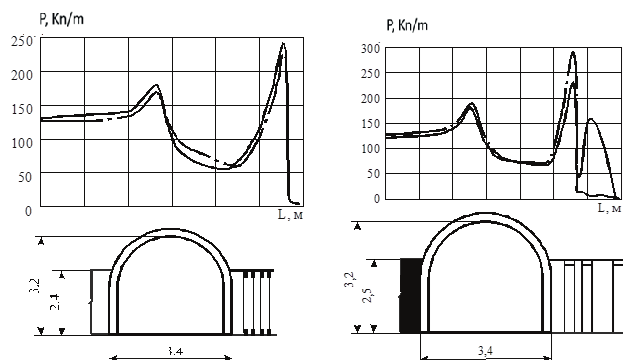
**Table 1**  
**Maximum stresses in a rock mass, surrounding the workings**

**Кесте 1**  
**Қазбаларды қоршап тұрған тау жыныстарының массасындағы максималды кернеулер**

**Таблица 1**  
**Максимальные напряжения в горном массиве, окружающем горные выработки**

| Seam thickness, m | Security equipment                        | Maximum stress values, kN/m <sup>2</sup> |                                      |
|-------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|
|                   |                                           | from the side of the massif              | from the side of the mined-out space |
| 2.0–2.5           | Double-row organ support                  | 170–250                                  | 150–240                              |
|                   | Three-row organ support with rubble strip | 150                                      | 230                                  |
|                   | Three-row organ support with rubble strip | 170                                      | 300                                  |
| 1.0–1.9           | Wooden fires                              | 170                                      | 180                                  |
|                   | Wooden wall                               | 170                                      | 180                                  |
|                   | Single-row organ support                  | 145                                      | 130                                  |
|                   | Double-row organ support                  | 150                                      | 140                                  |

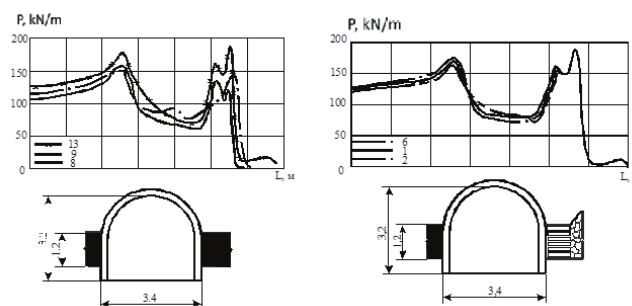
The nature of the pressure distribution depends on the extracted thickness of the seam; for example, the displacement and convergence of roof and soil rocks with an increase in the thickness of the seam from 1.0 to 2.0 m increases by an average of 10–20%.



**Figure 1. Distribution of rock pressure stresses P at protection of mine workings with organ rows.**

**Сурет 1. Тау-кен қазбаларын органикалық қатарлармен қорғау кезінде тау-кен қысымының P кернеуін бөлу.**

**Рис. 1. Распределение напряжений P горного давления при защите горных выработок органическими рядами.**



**Figure 2. Distribution of rock pressure stresses P for different methods of protecting mine workings.**

**Сурет 2. Тау-кен қазбаларын қорғаудың әртүрлі әдістері үшін P жынысындағы қысым кернеуін бөлу.**  
**Рис. 2. Распределение напряжений давления в породе P для различных методов защиты горных выработок.**

Reduction of vertical displacements is ensured by increasing the bearing capacity of the workings support and increasing the rigidity of the reinforcement and protection means. Comparing the obtained data with the values of the load on the workings support in relation to the VNIMI classification, according to which loads from the roof for workings up to 60 kN/m<sup>2</sup> are classified as favorable support conditions; 60–120 kN/m<sup>2</sup> – as average; 120–350 kN/m<sup>2</sup> – as severe, it can be concluded that the conditions for supporting the workings behind the longwall in the Karaganda basin are relatively difficult.

To establish patterns of influence of mining and geological factors on the operational characteristics of mine workings, conditions and costs of maintenance, possible ranges of their variation were considered based on the physical and mechanical properties of roof and soil rocks, water inflow, etc., using

the example of the conveyor intermediate roadway 43K2-3 of the K2 seam of the Kostenko mine of the Karaganda coal basin. Statistical data were established on the nature of heaving of the mine working soil, displacement of roof rocks, and deformation of the working support elements. With soft soil rocks made of siltstones and argillites with a strength of up to 2 MPa, soil heaving was up to 2.5–2.9 m along the entire cross-section of the working, and with strong soil rocks, its fractures in the internal cross-section of the working occurred with a displacement from the axis of the working by 0.5 m towards the intact coal massif. Flattening (squeezing out) of the upper logs into the cavity of the working was observed from the side of the mined-out space (10% of the length of the working – E1); ruptures of lock joints (stirrups and strips) on the elements of the support reinforcement of the UKR: from the side of the pillar (0.2% – E6), from the side of the mined-out space (2.5%), upper UKR (33% – E5). Along the length of the working, the extrusion of the lateral legs was observed: on the pillar side at 8.8% (E2) of the working length, which led to the loss of the bearing capacity of the working support and required its re-supporting over 6.7% of its length or at least replacement of the lateral arched legs; on the mined-out side, the extrusion of the lateral legs of the arched metal support occurred at 2.1% (E3) of the working length. The extrusion of both lateral legs of the arched support occurred at 1.6% (E4) of the working length, necessitating re-supporting in this area. In a number of sections – 1.2% of the working length, due to secondary roof settlements, the lateral posts of the arched support and, in part, the frame as a whole are inclined in the direction opposite to the direction of movement of the working face.

The following factors are accepted as influencing factors: the presence of zones of increased rock pressure; the strength characteristics of the roof and soil rocks of the formation and their thickness; the structure and water saturation of the rocks; the step of the main roof settlement; the presence of geological disturbances of a disjunctive nature; the speed of movement of the longwall face; the power characteristics of the lining of the workings.

The dependence of the costs ( $T_3$ ) for maintaining the observed conveyor intermediate drift 43K<sub>2-3</sub> on the influence of

the HMP zones ( $P_{HMP}$ ) is exponential, the formation disturbances ( $P_D$ ) and the characteristics of the soil rocks ( $P_{SR}$ ) are inversely proportional, and the roof rocks ( $P_R$ ) are parabolic. The general form of the dependence is as follows (with a correlation coefficient of 0.97):

$$T_3 = 0,153e^{0.264P_{HMP}} + 0,234 - \frac{0,152}{P_D} + 0,0008P_R^2 - 0,0042P_R - \frac{0,468}{P_{SR}}.$$

Of the above factors, the maximum stress increases (up to 70% of the total values) are caused by the PGD zones.

The calculations made allowed us to establish that the cost of maintaining a conveyor intermediate drift in the conditions of the K2 seam of the Kostenko mine amounts to 10 to 15% of the initial cost of the working, taking into account the costs of installing reinforcement in the working.

To compare the expected displacements of roof and ground rocks under various technological schemes for mining thin, flat seams in the Karaganda basin, geomechanical studies were conducted (Table 2) using averaged actual data for the technological parameters of the extraction. The length of the extraction pillar is 1800 m, the rate of advance of the working faces is 60–70 m/month, the speed of development of the workings is 250–300 m/month, with a downtime between the end of the excavation and the start of extraction pillar development of 5–7 months.

The results of the analysis indicate that the conditions for maintaining workings formed behind the longwall face are 1.3–2.5 times more severe and are reused 1.7–3.5 times compared to the cuttings and workings driven in the coal massif.

Note –  $V_{ozimo}$  and  $V_{zerp}$  are the rates of rock displacement, respectively, outside the zone of influence of mining operations and in the zone of established rock pressure;  $U_{01}$ ,  $U_{02}$ ,  $U_a$ ,  $U_o$  are rock displacements in the zone of, respectively, temporary support pressure in front of the first and second longwall faces; active roof displacements behind the first longwall face; the total value of expected convergence.

Table 2

**Expected roof and soil displacements in mine workings**

Кесте 2

**Қазбаларды қоршап тұрған тау жыныстарының массасындағы максималды кернеулер**

Таблица 2

**Максимальные напряжения в горном массиве, окружающем горные выработки**

| Nature of the event<br>extraction workings | Calculated values       |                        |                  |                  |               |               |
|--------------------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------|------------------|---------------|---------------|
|                                            | $V_{ozimo}$ ,<br>mm/day | $V_{zerp}$ ,<br>mm/day | $U_{01}$ ,<br>mm | $U_{02}$ ,<br>mm | $U_a$ ,<br>mm | $U_o$ ,<br>mm |
| Passed in the massif                       | 0.5                     | -                      | 60               | -                | -             | 250           |
| Cutting mine workings                      | 1.1                     | -                      | 110              | -                | -             | 500           |
| Designed behind the lava                   | -                       | 1.5                    | -                | 110              | 160           | 680           |
| Supported by lava:                         |                         |                        |                  |                  |               |               |
| – organ ranks                              | 0.5                     | 1.5                    | 60               | 110              | 160           | 850           |
| – rock support                             | 0.9                     | 0.9                    | 60               | 110              | 140           | 850           |
| – rubble fires                             | 0.6                     | 0.7                    | 60               | 110              | 150           | 850           |





5. *Technology of Controlling Geometric Processes for Increasing Stability of Coal-Rock Massive Around Workings* / V. F. Demin et al. // *Proceedings of Karaganda State Technical University*. – 2018. – No. 3. – P. 64–67 (in English)
6. *Deformirovanie vmeshchayushchikh porod vokrug gornyykh vyrabotok v zavisimosti ot vliyayushchikh faktorov* [Deformation of host rocks around mine workings depending on influencing factors] V. F. Demin et al. *Nauchnyi vestnik NGU* [Scientific Bulletin of NSU]. – 2015. – No. 4 (148). – P. 35–38 (in Russian)
7. Zubov V. P. *Sostoyanie i napravleniya sovershenstvovaniya sistem razrabotki ugol'nykh plastov na perspektivnykh ugol'nykh shakhtakh Kuzbassa* [The state and directions of improving coal seam mining systems at promising coal mines in Kuzbass]. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute]. – 2017. – Vol. 225. – P. 292–297 (in Russian)
8. Musin R. A., Asanova Zh. M., Khalikova E. R. *Razrabotka tekhnologicheskikh kriteriev otsenki dlya vybora perspektivnykh uchastkov dobychi ugol'nogo metana* [Development of technological evaluation criteria for the selection of promising coal methane mining sites]. *Ugol'* [Coal]. – 2024. – No. 4. – P. 102–108 (in Russian)
9. *Development of technological schemes for strengthening weakened zones of rock mas* / E. R. Khalikova et al. // *Mining Journal of Kazakhstan*. – 2025. – No. 2. – P. 50–60 (in Kazakh)
10. Budi G., Rao K. N., Mokhanti P. *Field and numerical modeling of stability of underground strata in lava workings* // *Energy Geoscience*. – 2023. – Vol. 4. – No. 1. – P. 1–12 (in English)

#### ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Көмір қазбалары үшін тез қазу үшін төмен тығыздықтағы шатырды бекіту технологиясын зерттеу және қолдану / Н. Yang [және т.б.] // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2020. – Т. 38. – Б. 389–401 (ағылшын тілінде)
2. Mustapaevich D. K., Mnadzhatdin M. D. Көмірдің қасиеттері, көмір өндіруші компаниялардағы процестер, әлемдегі көмір өндіру әдістері // *Journal NX*. – 2021. – Т. 7. – № 10. – Б. 231–236 (ағылшын тілінде)
3. Көмір қабаттарының тектоникалық бұзылыстарының анкерлік бекітпемен бекітілетін тау-кен қазбалары параметрлеріне әсерін зерттеу / V. F. Demin [және т.б.] // *Scientific Bulletin of the National Mining University*. – 2019. – № 5. – Б. 16–21 (ағылшын тілінде)
4. Қазақстанның Қарағанды көмір бассейніндегі тау-кен қазбаларын қоршаған тау жыныстары массивінің қауіпсіз геомеханикалық жағдайын қамтамасыз ету / N. Zholmagambetov [және т.б.] // *MMD*. – 2023. – Т. 17. – № 1. – Б. 74–83 (ағылшын тілінде)
5. Тау-кен қазбалары айналасындағы көмір-жыныс массивінің тұрақтылығын арттыруға арналған геомеханикалық процестерді басқару технологиясы / V. F. Demin [және т.б.] // *Proceedings of Karaganda State Technical University*. – 2018. – № 3. – Б. 64–67 (ағылшын тілінде)
6. Әсер етуші факторларға байланысты тау-кен қазбалары айналасындағы жанасушы жыныстардың деформациялануы / В. Ф. Демин [және т.б.] // *НМУ ғылыми хабаршысы*. – 2015. – № 4 (148). – Б. 35–38 (орыс тілінде)
7. Зубов В. П. Құзбастың перспективалы көмір шахталарындағы көмір қабаттарын игеру жүйелерін жетілдірудің жай-күйі мен бағыттары // *Тау-кен институтының жазбалары*. – 2017. – Т. 225. – Б. 292–297 (орыс тілінде)
8. Мусин Р. А., Асанова Ж. М., Халикова Э. Р. Көмір метанын өндірудің перспективалы учаскелерін таңдау үшін технологиялық бағалау критерийлерін әзірлеу // *Көмір*. – 2024. – № 4. – Б. 102–108 (орыс тілінде)
9. Тау жыныстары массивінің әлсіреген аймақтарын нығайтудың технологиялық схемаларын әзірлеу / Э. Р. Халикова [және т.б.] // *Қазақстанның тау-кен журналы*. – 2025. – № 2. – Б. 50–60 (қазақ тілінде)
10. Budi G., Rao K. N., Mohanty P. *Лавалық қазбалардағы жерасты қабаттарының тұрақтылығын далалық және сандық модельдеу* // *Energy Geoscience*. – 2023. – Т. 4. – № 1. – Б. 1–12 (ағылшын тілінде)

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Исследование и применение технологии крепления кровли низкой плотности для быстрой выемки грунта для угольных выработок* / Н. Yang [и др.] // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2020. – Т. 38. – С. 389–401 (на английском языке)
2. Mustapaevich D. K., Mnadzhatdin M. D. *Свойства угля, процессы на угледобывающих компаниях, методы добычи угля в мире* // *Journal NX*. – 2021. – Т. 7. – № 10. – С. 231–236 (на английском языке)

3. Изучение влияния тектонических нарушений залегания угольных пластов на параметры крепления горных выработок анкерной крепью / V. F. Demin [и др.] // *Scientific Bulletin of the National Mining University*. – 2019. – № 5. – С. 16–21 (на английском языке)
4. Обеспечение безопасного геомеханического состояния массива горных пород, окружающих горные выработки в Карагандинском угольном бассейне, Казахстан / N. Zholtmagambetov [и др.] // *MMD*. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 74–83 (на английском языке)
5. Технология управления геомеханическими процессами для повышения устойчивости угленородного массива вокруг горных выработок / V. F. Demin [и др.] // *Proceedings of Karaganda State Technical University*. – 2018. – № 3. – С. 64–67 (на английском языке)
6. Деформирование вмещающих пород вокруг горных выработок в зависимости от влияющих факторов / В. Ф. Демин [и др.] // *Научный вестник НГУ*. – 2015. – № 4 (148). – С. 35–38 (на русском языке)
7. Зубов В. П. Состояние и направления совершенствования систем разработки угольных пластов на перспективных угольных шахтах Кузбасса // *Записки Горного института*. – 2017. – Т. 225. – С. 292–297 (на русском языке)
8. Мусин Р. А., Асанова Ж. М., Халикова Э. Р. Разработка технологических критериев оценки для выбора перспективных участков добычи угольного метана // *Уголь*. – 2024. – № 4. – С. 102–108 (на русском языке)
9. Разработка технологических схем укрепления ослабленных зон горного массива / Э. Р. Халикова [и др.] // *Горный журнал Казахстана*. – 2025. – № 2. – С. 50–60 (на казахском языке)
10. Budi G., Rao K. N., Mohanty P. Полевое и численное моделирование устойчивости подземных пластов в лавовых выработках // *Energy Geoscience*. – 2023. – Т. 4. – № 1. – С. 1–12 (на английском языке)

#### Information about the authors:

**Khalikova E. R.**, Ph.D., Associate Professor of the Department of Mineral Deposit Development, NJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan), [salyahova\\_e@mail.ru](mailto:salyahova_e@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1501-8492>

**Zhumabekova A. Ye.**, Ph.D., Associate Professor of the Department of Mineral Deposit Development, NJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan), [aila1980@mail.ru](mailto:aila1980@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1501-5382>

**Demin V. F.**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mineral Deposit Development, NJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan), [vladfdemin@mail.ru](mailto:vladfdemin@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1718-856X>

**Syzdykbayeva D. S.**, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, NJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan), [dikow-1290@mail.ru](mailto:dikow-1290@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0673-0384>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Халикова Э. Р.**, Ph.D., «Пайдалы қазбалар кен орындарын игеру» кафедрасының доценті міндетін атқарушы, «Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Жумабекова А. Е.**, Ph.D., «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ «Пайдалы кенорындарын қазып өндіру» кафедрасының доцент м. а. (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Демин В. Ф.**, техн. ғылым. докторы, «Пайдалы қазбалар кен орындарын игеру» кафедрасының профессоры, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Сыздықбаева Д. С.**, т. ғ. м., аға оқытушы, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)

#### Сведения об авторах:

**Халикова Э. Р.**, Ph.D., ассоциированный профессор (доцент) кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылқаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)

**Жумабекова А. Е.**, Ph.D., ассоциированный профессор (доцент) кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылқаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)

**Демин В. Ф.**, д. т. н., профессор кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылқаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)

**Сыздықбаева Д. С.**, м. т. н., ст. преподаватель, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылқаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)





# AMM CONGRESS 2026

МАУСЫМ ИЮНЬ  
**11.12**

Астана, Қазақстан

«Hilton Astana»

[www.amm.kz](http://www.amm.kz)

16-ШІ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТАУ-КЕН МЕТАЛЛУРГИЯ КОНГРЕСІ

## ASTANA MINING AND METALLURGY

16-Й МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОНГРЕСС





Код МРНТИ 53.37.13

Т. А. Чепуштанова<sup>1</sup>, \*Э. Ж. Алтмышбаева<sup>1</sup>, Е. С. Меркибаев<sup>1</sup>, Б. Мишра<sup>2</sup><sup>1</sup>Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),<sup>2</sup>Вустерский политехнический институт (Вустер, Массачусетс, США)

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ХЛОРИДОВОЗГОНКИ ПИРИТНО-КОБАЛЬТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

**Аннотация.** В работе представлен термодинамический анализ хлоридовозгонки пиритно-кобальтовых концентратов в широком интервале температур с целью прогнозирования селективности хлорирования основных металлов. На основе расчетов  $\Delta G^\circ$ ,  $\Delta H^\circ$ ,  $\Delta S^\circ$  и  $\log K$  для ключевых реакций установлены температурные области формирования летучих хлоридов **Pb** и **Cu**, а также сохранения оксидной формы **Fe**, **Ni** и **Co**. Построены температурные зависимости термодинамических параметров и карта стабильности оксидно-хлоридных фаз. Показано, что переход **Pb** в газофазные хлориды начинается при 500–650 °С, меди – при 700–800 °С, тогда как железо, никель и кобальт сохраняют устойчивость вплоть до 900 °С и выше. Полученные результаты позволяют обосновать оптимальные температурные режимы хлоридовозгонки и прогнозировать селективность процесса при переработке пиритно-кобальтового сырья.

**Ключевые слова:** хлоридовозгонка, пиритно-кобальтовый концентрат, термодинамика, хлорирование металлов, оксидно-хлоридные фазы, свободная энергия, равновесие реакций, селективность, карта стабильности.

### Пиритті-кобальтты концентраттарды хлоридті айдау процесін термодинамикалық болжау

**Андатпа.** Бұл жұмыста пиритті-кобальтты концентраттарды хлоридті айдау процесінің термодинамикалық талдауы ұсынылған. Негізгі металдардың хлорлану селективтілігін болжау мақсатында негізгі реакциялар үшін  $\Delta G^\circ$ ,  $\Delta H^\circ$ ,  $\Delta S^\circ$  және  $\log K$  мәндері есептеліп, олардың температуралық өзгерістері анықталды. **Pb** мен **Cu** хлоридтерінің 500–650 °С аралығында, мыс хлоридінің 700–800 °С температурада түзілуі басым екені көрсетілді. **Fe**, **Ni** және **Co** оксидтік түрінде 900 °С және одан жоғары температураларда тұрақты болып қалады. Оксидті-хлоридті фазалардың тұрақтылық картасы құрылып, процесінің үш температуралық аймағы анықталды. Алынған нәтижелер пиритті-кобальтты шикізатты өңдеудің тиімді режимдерін негіздеуге және хлоридті айдау процесінің селективтілігін болжауға мүмкіндік береді.

**Түйінді сөздер:** хлоридті айдау, пиритті-кобальтты концентрат, термодинамика, металдардың хлорлануы, оксидті-хлоридті фазалар, бос энергия, реакция теңгерімі, селективтілік, тұрақтылық картасы.

### Thermodynamic prediction of chloride volatilization processes of pyrite-cobalt concentrates

**Abstract.** This study presents a thermodynamic assessment of the chloride volatilization of pyrite-cobalt concentrates aimed at predicting the selective chlorination behavior of major metals. Temperature-dependent values of  $\Delta G^\circ$ ,  $\Delta H^\circ$ ,  $\Delta S^\circ$  and  $\log K$  were calculated for key reactions, enabling the identification of temperature intervals responsible for the formation of volatile chlorides of **Pb** and **Cu**, as well as the persistence of **Fe**, **Ni** and **Co** in oxide form. Temperature trends of the thermodynamic parameters and a stability map of oxide-chloride phases were constructed. The results show that **Pb** begin forming gaseous chlorides at 500–650 °C, while **Cu** becomes reactive at 700–800 °C. **Fe**, **Ni** and **Co** remain thermodynamically stable as oxides up to 900 °C and above. These findings allow defining optimal temperature regimes and predicting the selectivity of the chloride volatilization process for pyrite-cobalt feed materials.

**Key words:** chloride volatilization, pyrite-cobalt concentrate, thermodynamics, metal chlorination, oxide-chloride phases, free energy, reaction equilibrium, selectivity, stability map.

### Введение

Пиритно-кобальтовые концентраты относятся к сложным многокомпонентным системам, содержащим наряду с пиритом и кобальтсодержащими фазами значимые количества примесных металлов (**Pb**, **Cu**), которые затрудняют дальнейшую переработку и ухудшают качество целевых продуктов [1, 2, 8]. Одним из эффективных подходов к селективному удалению примесей является хлоридовозгонка – термическая обработка с участием хлоридсодержащих реагентов, приводящая к образованию летучих хлоридов и их переходу в газовую фазу [3, 4]. Несмотря на наличие работ, посвященных хлорированию пиритных огарков и различных техногенных материалов, поведение металлов именно в пиритно-кобальтовом сырье недостаточно изучено, а термодинамические закономерности представлены фрагментарно.

Термодинамическое прогнозирование позволяет оценить склонность металлов к хлорированию, определить температурные зоны, в которых возможно образование летучих хлоридов, и обосновать селективность удаления примесных компонентов [5, 6]. Для переходных металлов **Fe**, **Ni** и **Co** такие данные особенно важны, поскольку они могут образовывать различные оксидные и хлоридные фазы, но их летучесть существенно ниже по сравнению с **Pb** и **Cu** [6, 7]. Таким образом, системное изучение поведения ключевых металлов пиритно-кобальтовых концентратов в условиях высокотемпературного взаимодействия

с **CaCl<sub>2</sub>** является актуальным как с научной, так и с практической точки зрения.

**Цель работы** – выполнить термодинамическое прогнозирование хлоридовозгонки пиритно-кобальтовых концентратов на основе анализа  $\Delta G^\circ$ ,  $\log K$  и характеристик стабильности оксидно-хлоридных фаз в интервале температур 600–1100 °С, а также определить селективные температурные зоны удаления примесных металлов [8].

### Методы исследования

Термодинамические расчеты выполнены для модельной системы **Me-O-Cl-CaCl<sub>2</sub>**, включающей оксидные формы **Pb**, **Cu**, **Fe**, **Ni** и **Co**, характерные для пиритно-кобальтового сырья после предварительного окислительно-го нагрева. Для каждого металла рассмотрены типовые реакции взаимодействия оксида с **CaCl<sub>2</sub>** с образованием хлоридов соответствующей стехиометрии и **CaO** как побочного продукта. Расчеты выполнялись в программной среде HSC Chemistry в диапазоне температур 600–1100 °С с шагом 100 °С [3, 5].

В рамках анализа оценивались:

- стандартная энергия Гиббса  $\Delta G^\circ$ ;
- логарифм константы равновесия  $\log K$ ;
- изменение энтальпии  $\Delta H^\circ$  и энтропии  $\Delta S^\circ$ ;
- устойчивость оксидных и хлоридных форм металлов.

Критериями предпочтительности хлоридообразования принимались отрицательные значения  $\Delta G^\circ$  и положитель-

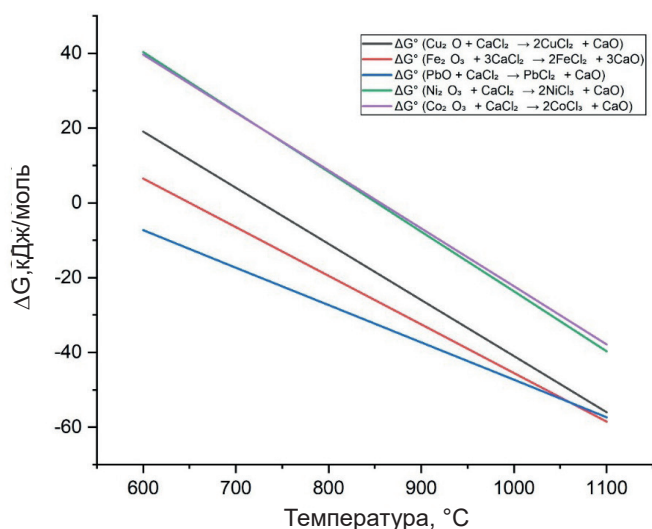
ные значения  $\log K$ . Для интегральной оценки устойчивости оксидных и хлоридных форм металлов была построена качественная карта стабильности, отражающая температурные области, в которых оксиды теряют устойчивость и уступают место летучим хлоридам. Такой подход позволяет выявить общие тенденции поведения металлов в многокомпонентной системе и служит инструментом для анализа селективности процесса.

### Результаты

Термодинамический анализ показал существенные различия в поведении металлов пиритно-кобальтовых концентратов при взаимодействии с  $\text{CaCl}_2$ . Полученные зависимости  $\Delta G^\circ(T)$ ,  $\log K(T)$  и данные о фазовой устойчивости отражают выраженную селективность хлоридообразования, что позволяет выделить группы металлов по их склонности к переходу в летучие хлоридные формы.

#### Температурная зависимость $\Delta G^\circ$ и термодинамическая вероятность реакций

Анализ кривых  $\Delta G^\circ$  показал, что реакции образования хлоридов **Pb** сопровождаются отрицательными значениями энергии Гиббса во всем исследованном температурном интервале.



**Рис. 1. Температурные зависимости стандартной энергии Гиббса  $\Delta G^\circ$  для реакций хлоридообразования **Pb**, **Cu**, **Fe**, **Ni** и **Co**.**

**Сурет 1. **Pb**, **Cu**, **Fe**, **Ni** және **Co** хлорид түзу реакциялары үшін  $\Delta G^\circ$  стандартты Гиббс энергиясының температуралық тәуелділігі.**

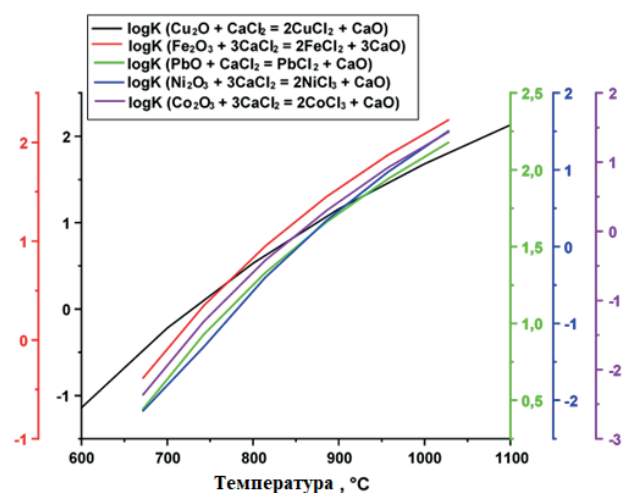
**Figure 1. Temperature dependence of the standard Gibbs energy  $\Delta G^\circ$  for chlorination reactions of **Pb**, **Cu**, **Fe**, **Ni** and **Co**.**

Это подтверждает высокую термодинамическую вероятность их хлорирования уже при 600 °C. Для **Cu** переход  $\Delta G^\circ$  в отрицательную область наблюдается при температурах порядка 700–800 °C, что указывает на умеренную реакционную способность меди [1, 2, 3]. Оксиды **Fe**, **Ni** и **Co** характеризуются значительно более высокими значениями  $\Delta G^\circ$ ; отрицательные значения достигаются только

при  $T \geq 900$  °C, что свидетельствует о низкой склонности этих металлов к хлоридообразованию в условиях хлоридовозгонки.

#### Изменение константы равновесия $\log K$ с температурой

Зависимости  $\log K(T)$  демонстрируют согласованное с  $\Delta G^\circ$  распределение термодинамической вероятности процессов. Значения  $\log K$  для **PbCl<sub>2</sub>** положительны во всем исследованном интервале, что соответствует смещению равновесия в сторону образования летучих хлоридов. Для меди положительные значения  $\log K$  достигаются при 700–800 °C, что соответствует переходу реакции в область термодинамической реализуемости.



**Рис. 2. Температурные зависимости логарифма константы равновесия  $\log K$  для реакций хлорирования металлов.**

**Сурет 2. Металдардың хлорид түзу реакциялары үшін тепе-теңдік константасының логарифмі  $\log K$ -нің температуралық өзгерісі.**

**Figure 2. Temperature variations of the equilibrium constant logarithm  $\log K$  for metal chlorination reactions.**

В противоположность этому реакции образования хлоридов железа, никеля и кобальта характеризуются  $\log K < 0$  вплоть до высоких температур. Положительные значения фиксируются только в интервале выше 900 °C, но даже в этих условиях показатель остается значительно ниже по сравнению с **Pb** и **Cu**. Это подтверждает ограниченную способность переходных металлов к хлорированию и объясняет их сохранение в твердой фазе при хлоридовозгонке.

Сопоставление кривых  $\log K$  позволяет упорядочить металлы по склонности к хлорированию в следующем виде: **Pb** → **Cu** → **Fe** → **Ni** → **Co**.

Эта последовательность отражает уменьшение термодинамической вероятности хлоридообразования и определяет селективность процесса [3, 4, 9].

#### Карта устойчивости оксидно-хлоридных фаз

Построенная карта стабильности оксидных и хлоридных форм металлов показывает, что в условиях хлоридирующей атмосферы оксиды **Pb** теряют устойчивость

первыми, переходя в газофазные хлориды. **Cu** занимает промежуточное положение, демонстрируя переходную область стабильности. **Fe**, **Ni** и **Co** сохраняют устойчивость оксидной формы вплоть до высокотемпературной зоны. Хлориды **Ni** и **Co** возможны термодинамически, однако их реальное образование ограничено конкурирующими процессами образования стабильных оксидных фаз [4, 6, 9].

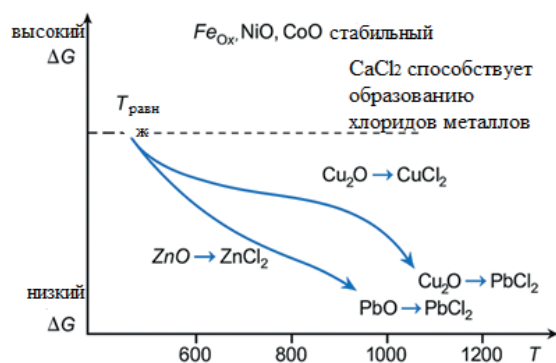


Рис. 3. Интегральная карта стабильности оксидных и хлоридных форм металлов в системе **Me-O-Cl**.

Сурет 3. **Me-O-Cl** жүйесіндегі металдардың оксидті және хлоридті формаларының тұрақтылығының интегралды картасы.

Figure 3. Integrated stability map of oxide and chloride forms of metals in the **Me-O-Cl** system.

*Температурно-стадиальная характеристика процесса*  
Сопоставление термодинамических параметров позволяет выделить три характерные температурные зоны процесса:

- 500–650 °C – максимальная склонность **Pb** к образованию летучих хлоридов при минимальной реакции со стороны **Fe**, **Ni** и **Co**;
- 700–800 °C – начало хлорирования **Cu** при завершении перехода **Pb** и **Zn** в газовую фазу;
- ≥ 850–900 °C – область, в которой термодинамически возможны хлориды **Ni** и **Co**, но их образование в реальных условиях ограничено устойчивостью оксидов [1, 2, 3, 8].

Эти закономерности определяют селективную природу хлоридовозгонки и позволяют уточнить температурные режимы удаления примесных металлов.

### Обсуждение

Полученные результаты согласуются с литературными данными, где отмечается преимущественная летучесть хлоридов свинца и меди при сравнительно низких температурах и повышенная устойчивость оксидов железа, никеля и кобальта [1, 3]. Характер температурных зависимостей  $\Delta G^\circ$  и  $\log K$  подтверждает, что **Pb** и **Zn** являются наиболее реакционноспособными в хлоридизирующей среде, тогда как **Cu** демонстрирует умеренную склонность к хлорированию, проявляющуюся при более высоких температурах. Поведение **Fe**, **Ni** и **Co** определяется высокой стабильностью оксидных фаз и ограниченной термодинамической выгодностью образования их хлоридов [4, 6].

Селективность процесса объясняется различием в термодинамической устойчивости оксидов металлов и их хлоридов, а также различием в летучести образующихся

Таблица 1

Термодинамические параметры ключевых реакций хлоридовозгонки в характерных температурных зонах процесса

Кесте 1

Процестің сипаттамалық температуралық аймақтарындағы негізгі хлоридті сублимациялау реакцияларының термодинамикалық параметрлері

Table 1

Thermodynamic parameters of key chlorination reactions in the characteristic temperature zones of the process

| Стадия     | T, °C    | Реакция                                          | $\Delta H^\circ$ , кДж/моль | $\Delta G^\circ$ , кДж/моль | $\Delta S^\circ$ , Дж/(моль·К) | K      | $\log K$ | Техническое решение                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------|----------|--------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I стадия   | 500–650  | $PbO + CaCl_2 \rightarrow PbCl_2 + CaO$          | 80                          | -7.32                       | 100                            | 2.7392 | 0.44     | Режим предварительного хлорирования для вывода <b>Pb</b> и <b>Zn</b> в летучие хлориды при сохранении <b>Fe</b> , <b>Co</b> и <b>Ni</b> в твердом остатке; газоочистка и улавливание конденсатов <b>PbCl<sub>2</sub></b> и <b>ZnCl<sub>2</sub></b>                          |
| II стадия  | 700–750  | $Cu_2O + CaCl_2 \rightarrow 2 CuCl_2 + CaO$      | 800                         | 150                         | -10.97                         | 3.4206 | 0.53     | Селективное хлорирование меди; доочистка концентрата от остаточных <b>Pb</b> и <b>Zn</b> ; формирование оксидного остатка, обогащенного <b>Fe</b> , <b>Co</b> и <b>Ni</b> для последующей переработки                                                                       |
|            |          | $Fe_2O_3 + 3CaCl_2 \rightarrow 2 FeCl_2 + 3 CaO$ | 120                         | -6.51                       | 130                            | 2.2357 | 0.35     |                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| III стадия | 850–900+ | $Ni_2O_3 + 3CaCl_2 \rightarrow 2 NiCl_2 + 3 CaO$ | 180                         | -7.70                       | 160                            | 2.2031 | 0.34     | Высокотемпературная выдержка для структурирования оксидной матрицы ( <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b> + оксиды <b>Co</b> , <b>Ni</b> ); подготовка к дальнейшему восстановлению и получению пигментов при минимальных потерях ценных металлов |
|            |          | $Co_2O_3 + 3CaCl_2 \rightarrow 2CoCl_2 + 3CaO$   | 175                         | -6.84                       | 155                            | 2.0160 | 0.30     |                                                                                                                                                                                                                                                                             |



соединений. Хлориды **Pb** и **Cu** обладают высокой парциальной упругостью, что способствует их переходу в газовую фазу; хлориды **Fe**, **Ni** и **Co** менее летучи и формируются лишь в экстремальных условиях. Обобщенная карта стабильности позволяет интегрально оценить термодинамическое поведение металлов и служит инструментом для проектирования оптимальных режимов хлоридовозгонки.

Важно отметить, что термодинамическая возможность образования хлоридов **Ni** и **Co** не гарантирует их практической возгонки: реальные технологические условия ограничены кинетикой, временем выдержки и конкурирующими реакциями [8]. Это подтверждает, что пиритно-кобальтовые концентраты могут эффективно очищаться от **Pb** и **Cu** при минимальных потерях **Ni** и **Co**.

### Заключение

Проведен термодинамический анализ поведения **Pb**, **Cu**, **Fe**, **Ni** и **Co** при хлоридовозгонке пиритно-кобальтовых концентратов в присутствии **CaCl<sub>2</sub>**.

Установлено, что **Pb** переходит в летучие хлориды при 500–650 °С, **Cu** – при 700–800 °С, тогда как **Fe**, **Ni** и **Co** сохраняют оксидную форму вплоть до 900 °С и выше.

Построены температурные зависимости  $\Delta G^\circ$  и  $\log K$ , а также карта стабильности оксидно-хлоридных фаз, демонстрирующая различие в реакционной способности металлов.

Определены три характерные температурные зоны процесса, отражающие селективность хлорирования и позволяющие оптимизировать условия удаления примесных компонентов [10].

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации технологических схем комплексной переработки пиритно-кобальтовых концентратов с селективным удалением токсичных примесных металлов и сохранением ценных компонентов в твердой фазе для дальнейшего получения железистоокисных пигментов и других продуктов.

### Благодарность

Статья подготовлена в рамках грантового финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23490117 «Разработка технологии комплексной переработки пиритных концентратов с получением железистоокисных пигментов и ультрадисперсных порошков металлов»).

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Qin H. и др. (2020). Пирит-усиленный хлоридизирующий обжиг и его эффективность при извлечении золота и серебра из хвостов золотодобычи. *Separation and Purification Technology*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586620314509> (на английском языке)
2. Использование золотоносного и железосодержащего пиритного огарка посредством процесса хлорирования – волатилизации / J. Ding [и др.] // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. – 2017. – Т. 24. – № 11. – С. 1241–1250 (на английском языке)
3. Zhang B. K. Механизм и кинетика хлоридизирующего обжига медеплавильного шлака // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2023. – Т. 33. – № 2. – С. 563–575 (на английском языке)
4. Извлечение металлов из железосодержащих хвостов горных работ методом хлоридизирующего обжига и водного выщелачивания / S. Pramanik [и др.] // *Waste Management Bulletin*. – 2024. – Т. 2. – № 2. – С. 113–121 (на английском языке)
5. Gao T. и др. (2025). Новый процесс хлоридизирующего обжига с **CaCl<sub>2</sub>** для высокоэффективной очистки кварцевого песка. *Minerals*. <https://www.mdpi.com/2075-163X/15/11/1127> (на английском языке)
6. Zhao K., Gao F., Yang Q. Комплексный обзор металлургических процессов обогащения сульфидных никелевых руд // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2022. – Т. 8. – С. 37–50 (на английском языке)
7. Обзор процесса прямого восстановления – магнитной сепарации для производства ферроникеля из латеритных никелевых руд / W. Lui [и др.] // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2025. – Т. 11. – № 1. – С. 3–28 (на английском языке)
8. Cherushtanova T. и др. (2025). Разработка технологии переработки пирит-кобальтовых концентратов с получением пигментов состава **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** и **Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**. *Metals*. <https://www.mdpi.com/2075-4701/15/8/886> (на английском языке)
9. Ge J. и др. (2022). Прогресс исследований хлоридизирующего обжига тяжелых металлов в твердых отходах. *Surfaces and Interfaces*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468023022002575> (на английском языке)
10. Nabashi F. (2021). Термодинамические основы хлоридизирующего обжига и селективного извлечения металлов из минерального сырья и техногенных материалов. *Processes*. <https://www.mdpi.com/journal/processes> (на английском языке)

### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Qin H. және т. б. (2020). Алтын өндіру қалдықтарынан алтын мен күмісті алудағы пиритпен күшейтілген хлоридизирлеуші күйдірудің тиімділігі. *Separation and Purification Technology*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586620314509> (ағылшын тілінде)

2. Хлорлау – ұшпалау процесі арқылы алтынқұрамды және темірге бай пирит оғарогын пайдалану / J. Ding [және т. б.] // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. – 2017. – Т. 24. – № 11. – Б. 1241–1250 (ағылшын тілінде)
3. Zhang B. K. Мыс балқыту илағын хлоридизирлеуші күйдірудің механизмі мен кинетикасы // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2023. – Т. 33. – № 2. – Б. 563–575 (ағылшын тілінде)
4. Темірге бай кен қалдықтарынан металдарды хлоридизирлеуші күйдіру және сумен шаймалау арқылы алу / S. Pramanik [және т. б.] // *Waste Management Bulletin*. – 2024. – Т. 2. – № 2. – Б. 113–121 (ағылшын тілінде)
5. Gao T. және т. б. (2025). Кварц құмын жоғары тиімді тазартуға арналған  $\text{CaCl}_2$  негізіндегі жаңа хлоридизирлеуші күйдіру процесі. *Minerals*. <https://www.mdpi.com/2075-163X/15/11/1127> (ағылшын тілінде)
6. Zhao K., Gao F., Yang Q. Никель сульфидті кендерін металлургиялық байыту процесі бойынша кешенді шолу // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2022. – Т. 8. – Б. 37–50 (ағылшын тілінде)
7. Латеритті никель кендерінен ферроникель өндіруге арналған тікелей тотықсыздандыру – магниттік бөлу процесіне шолу / W. Lui [және т. б.] // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2025. – Т. 11. – № 1. – Б. 3–28 (ағылшын тілінде)
8. Chepushtanova T. және т. б. (2025).  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  және  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  құрамды пигменттер алу мақсатында пирит-кобальт концентраттарын өңдеу технологиясын әзірлеу. *Metals*. <https://www.mdpi.com/2075-4701/15/8/886> (ағылшын тілінде)
9. Ge J. және т. б. (2022). Қатты қалдықтардағы ауыр металдарды хлоридизирлеуші күйдіру бойынша зерттеулердің дамуы. *Surfaces and Interfaces*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468023022002575> (ағылшын тілінде)
10. Habashi F. (2021). Минералдық шикізат пен техногендік материалдардан металдарды селективті алу үшін хлоридизирлеуші күйдірудің термодинамикалық негіздері. *Processes*. <https://www.mdpi.com/journal/processes> (ағылшын тілінде)

#### REFERENCES

1. Qin H. et al. (2020). Pyrite enhanced chlorination roasting and its efficacy in gold and silver recovery from gold tailing. *Separation and Purification Technology*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586620314509> (in English)
2. Utilization of gold-bearing and iron-rich pyrite cinder via a chlorination – volatilization process / J. Ding et al. // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. – 2017. – Vol. 24. – No. 11. – P. 1241–1250 (in English)
3. Zhang B. K. Mechanism and kinetics for chlorination roasting of copper smelting slag // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2023. – Vol. 33. – No. 2. – P. 563–575 (in English)
4. Extraction of metal values from iron-rich mine tailings via chloridized roasting and water leaching / S. Pramanik et al. // *Waste Management Bulletin*. – 2024. – Vol. 2. – No. 2. – P. 113–121 (in English)
5. Gao T. et al. (2025). A novel  $\text{CaCl}_2$  chlorination roasting process for high-efficiency purification of quartz sand. *Minerals*. <https://www.mdpi.com/2075-163X/15/11/1127> (in English)
6. Zhao K., Gao F., Yang Q. Comprehensive review on metallurgical upgradation processes of nickel sulfide ores // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2022. – Vol. 8. – P. 37–50 (in English)
7. A Review of Direct Reduction – Magnetic Separation Process for Ferronickel Production from Nickel Laterite / W. Lui et al. // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2025. – Vol. 11. – No. 1. – P. 3–28 (in English)
8. Chepushtanova T. et al. (2025). Development of technology for processing pyrite – cobalt concentrates to obtain pigments of the composition  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . *Metals*. <https://www.mdpi.com/2075-4701/15/8/886> (in English)
9. Ge J. et al. (2022). Research progress of chlorination roasting of heavy metals in solid waste. *Surfaces and Interfaces*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468023022002575> (in English)
10. Habashi F. (2021). Thermodynamic fundamentals of chlorination roasting and selective metal recovery from mineral and secondary resources. *Processes*. <https://www.mdpi.com/journal/processes> (in English)

## Сведения об авторах:

**Чепуштанова Т. А.**, доктор Ph.D, профессор, кафедра «МиОПИ», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [t.chepushtanova@satbayev.university](mailto:t.chepushtanova@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0002-6526-0044>

**Алтымышбаева Ә. Ж.**, ст. преподаватель, кафедра «МиОПИ», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [a.altmyshbayeva@satbayev.university](mailto:a.altmyshbayeva@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0002-4483-4635>

**Меркібаев Е. С.**, Ph.D, ст. преподаватель, кафедра «МиОПИ», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [e.merkibayev@satbayev.university](mailto:e.merkibayev@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0003-3869-6835>

**Бражendra М.**, профессор, директор Института обработки металлов, Вустерский политехнический институт (г. Вустер, США), [bmishra@wpi.edu](mailto:bmishra@wpi.edu); <https://orcid.org/0000-0001-7897-1817>

## Авторлар туралы мәліметтер:

**Чепуштанова Т. А.**, Ph.D, профессор, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

**Алтымышбаева Ә. Ж.**, т. ғ. м., аға оқытушы, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

**Меркібаев Е. С.**, Ph.D, аға оқытушы, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

**Бражendra М.**, профессор, Металл өңдеу институтының директоры, Вустер политехникалық институты (Вустер қ., АҚШ)

## Information about the authors:

**Chepushtanova T. A.**, Ph.D, Professor, Department of Metallurgy and Mineral Processing, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Altmyshbayeva A. Zh.**, Senior Lecturer, Department of Metallurgy and Mineral Processing, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Merkibayev Y. S.**, Ph.D, Senior Lecturer, Department of Metallurgy and Mineral Processing, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Brajendra M.**, Professor, Director of the Metal Processing Institute, Worcester Polytechnic Institute (Worcester, Massachusetts, USA)



# ГОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РОССИЯ

[www.techmining.ru](http://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 53.31.21

\*Zh. K. Saulebek<sup>1</sup>, R. T. Toleukadyr<sup>2</sup>, Zh. O. Sadyk<sup>1</sup>, Onuralp Yucel<sup>3</sup><sup>1</sup>Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan),<sup>2</sup>LLP «QazMetals Engineering» (Karaganda, Kazakhstan),<sup>3</sup>Istanbul Technical University (Istanbul, Turkey)

## CARBON-FREE SMELTING OF CHROME-CONTAINING FERROALLOY USING FERROALUMOSILICOCALCIUM AND FERROSILICOCHROME DUST

**Abstract.** The study examines carbon-free smelting of chromium-containing ferroalloy using ferroaluminosilicocalcium (*FeAlSiCa*) and ferrosilicochrome dust (*FeSiCr*) as complex metallothermic reductants aimed at reducing the carbon footprint of conventional ferrochrome production. Four charge variants with reductant contents ranging from 10% deficiency to 20% excess relative to stoichiometry were investigated. Smelting was conducted at 1650 °C followed by SEM, EDS, and chemical analyses of the obtained products. *Cr-Fe* solid solutions and *Cr-V-N* nitride phases were formed, while silicon excess promoted *Cr-Si* silicides. Chromium recovery reached 86%, and impurity levels remained low ( $C \leq 0.10\%$ ). The alloys satisfied ISO 5448-81 requirements. The optimal composition corresponded to a 10% excess of reductants.

**Key words:** ferroalloy, ferrochrome, low-carbon ferrochrome, metallothermy, ferroaluminosilicocalcium, ferrosilicochrome, calcium, complex reducing agents, carbon footprint.

### Ферроалюмосиликокальций және ферросиликохром шанын қолдана отырып хром феррокорытпасын көміртегісіз балқыту

**Аннотация.** Зерттеуде дәстүрлі феррохром өндірісінің көміртегісіз ізіне тәуелділігін төмендету мақсатында ферроалюмосиликокальций (*FeAlSiCa*) және ферросиликохром шаны (*FeSiCr*) кешенді металлтермиялық тотықсыздандығыштар ретінде қолданылған көміртегісіз балқыту үдерісі қарастырылды. Тотықсыздандығыштардың мөлшері стехиометрияға қатысты 10% кемнен 20% артыққа дейін өзгертілген төрт шихта нұсқасы зерттелді. Балқыту 1650 °C температурада жүргізіліп, алынған өнімдер СЭМ, ЭДС және химиялық талдау әдістерімен зерттелді. Нәтижесінде Cr-Fe қатты ерітінділері мен Cr-V-N нитридтік фазалары түзілді, ал кремнийдің артық мөлшері Cr-Si силицидтерінің пайда болуына әкелді. Хромның алыну дәрежесі 86%-ға жетті, ал қоспалар мөлшері төмен болды ( $C \leq 0,10\%$ ). Қорытпалар ISO 5448-81 талаптарына сәйкес келеді. Оңтайлы құрам тотықсыздандығыштардың 10% артық мөлшеріне сәйкес анықталды.

**Түйінді сөздер:** феррокорытпа, феррохром, төмен көміртекті феррохром, металлтермия, ферроалюмосиликокальций, ферросиликохром, кальций, күрделі тотықсыздандығыштар, көміртегісіз ізі.

### Безуглеродная выплавка хромсодержащего ферросплава с применением ферроалюмосиликокальция и пыли ферросиликохрома

**Аннотация.** В работе исследована возможность безуглеродной выплавки хромсодержащего ферросплава с использованием ферроалюмосиликокальция (*FeAlSiCa*) и пыли ферросиликохрома (*FeSiCr*) в качестве комплексных металлтермических восстановителей с целью снижения углеродного следа традиционного производства феррохрома. Рассмотрены четыре варианта шихты с содержанием восстановителей от 10% недостатка до 20% избытка относительно стехиометрии. Плавка проводилась при 1650 °C, полученные продукты исследованы методами СЭМ, ЭДС и химического анализа. Установлено формирование твердых растворов *Cr-Fe* и нитридных фаз *Cr-V-N*, при избытке кремния образуются силициды *Cr-Si*. Степень извлечения хрома достигла 86%, содержание примесей было низким ( $C \leq 0,10\%$ ). Полученные сплавы соответствуют требованиям ISO 5448-81. Оптимальной признана шихта с 10% избытком восстановителей.

**Ключевые слова:** ферросплав, феррохром, низкоуглеродистый феррохром, металлтермия, ферроалюмосиликокальция, ферросиликохрома, кальций, комплексные восстановители, углеродный след.

### Introduction

Modern ferrochrome production relies heavily on the carbothermic reduction of chromium oxides, making the process one of the most carbon-intensive in the ferroalloy industry. The use of coke and other carbon-containing reducing agents results in high  $CO_2$  emissions, significant energy costs, and process limitations, particularly in the production of low-carbon ferrochrome for corrosion-resistant steels. Increasing environmental requirements and the transition to low-carbon metallurgy are stimulating the search for alternatives to traditional carbothermic reduction [1–3].

One promising area is the use of metal-thermal reducing agents, which completely eliminate carbon from the process. However, the use of pure *Al*, *Si*, or *Ca* is limited by their cost and the energy intensity of production. Therefore, interest in complex man-made reducing agents with high reactivity and availability is relevant [4–6].

Ferroaluminosilicocalcium (*FeAlSiCa*) is a reducing agent containing active elements with a high affinity for oxygen – *Ca*, *Al*, and *Si*. Its use allows for lower process temperatures, increased  $Cr_2O_3$  reduction, and a reduced carbon footprint, while simultaneously utilizing metallurgical waste. Research into the mechanisms of reduction, phase formation, and product properties using *FeAlSiCa* is an important step

toward developing carbon-free smelting technologies for chromium-containing ferroalloys [6–8].

### Materials and methods

During the carbon-free smelting of chromium-containing ferroalloy, chromium concentrate, *FeAlSiCa* and *FeSiCr* dust were used as charge materials.

Chemical analysis of chromium concentrate and metal reducing agents has the following values, %: chromium concentrate:  $Cr_2O_3$  – 52.91;  $Al_2O_3$  – 7.801;  $SiO_2$  – 4.65;  $MgO$  – 17.51;  $CaO$  – 0.58;  $Fe_2O_3$  – 12.91;  $S$  – 0.022;  $P$  – 0.003; calcination loses – 15.021; *FeAlSiCa*: *Fe* – 8.13; *Al* – 13.45; *Si* – 66.16; *Ca* – 10.03;  $C$  – 0.69;  $S$  – 0.017;  $P$  – 0.041; *Ti* – 1.08;  $V$  – 0.42; *FeSiCr*: *Fe* – 9.11; *Al* – 4.03; *Si* – 48.08; *Ca* – 1.15;  $C$  – 2.00;  $S$  – 0.056;  $P$  – 0.025;  $Cr$  – 1.1;  $V$  – 38.73.

*FeAlSiCa* and *FeSiCr* were introduced in equal proportions in four variants: 10% deficient reducing agents (variant 1); in a stoichiometric amount sufficient for the complete reduction of the main oxides of *Cr* concentrate (variant 2); and also with 10% (variant 3) and 20% (variant 4) excess. A more detailed composition is presented below:

– variant 1, %: 52.3 *Cr* concentrate; 7.8 *FeAlSiCa*; 7.8 *FeSiCr* dust; 31.9 lime;

– variant 2, %: 44.7 *Cr* concentrate; 8.9 *FeAlSiCa*; 8.9 *FeSiCr* dust; 37.4 lime;

– variant 3, %: 39.0 **Cr** concentrate; 9.7 **FeAlSiCa**; 9.7 **FeSiCr** dust; 41.4 lime;

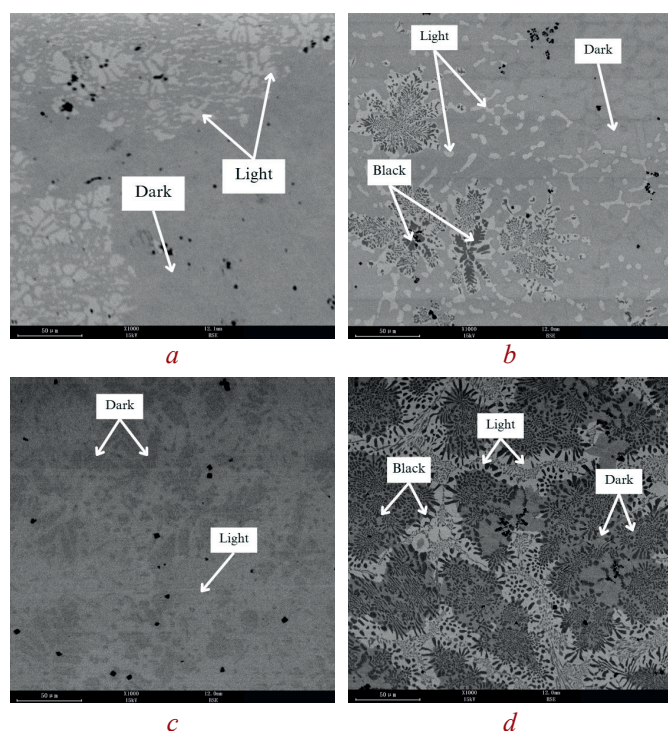
– variant 4, %: 34.6 **Cr** concentrate; 10.3 **FeAlSiCa**; 10.3 **FeSiCr** dust; 44.6 lime.

Melting was carried out in alundum crucibles immersed in a **MgO** backfill (to protect the furnace chamber from potential splashes resulting from violent exothermic reactions) in a chamber furnace in an air atmosphere at a heating rate of 10 °C/min with an isothermal hold at 1650 °C for 30 minutes, followed by cooling in the furnace to room temperature. The charge was a mixture of ground powders with particle sizes  $\leq 120 \mu\text{m}$ .

The resulting metal and slag samples were examined using a ZepTools ZEM20 scanning electron microscope (SEM) with an Oxford energy-dispersive spectroscopy (EDS) attachment. Individual elements were analyzed using analytical chemistry methods.

### Results

Figure 1 shows SEM images of metals obtained by melting using four different methods of introducing **FeAlSiCa** and **FeSiCr**. The images were obtained in backscattered electron detection mode at a magnification of  $\times 1000$ .



**Figure 1. SEM images of metal samples obtained by introducing **FeAlSiCa** and **FeSiCr** from batch variants: 1 (a), 2 (b), 3 (c) and 4 (d).**

**Сурет 1. **FeAlSiCa** және **FeSiCr**-ді партиялық нұсқалардан енгізу арқылы алынған металл үлгілерінің СЭМ кескіндері: 1 (a), 2 (b), 3 (c) және 4 (d).  
Рис. 1. Изображения образцов металла, полученные методом СЭМ, с добавлением **FeAlSiCa** и **FeSiCr** из пакетных вариантов: 1 (a), 2 (b), 3 (c) и 4 (d).**

The figure shows that two main phases are formed in variants 1 and 3, and three in variants 2 and 4. According to the averaged EDS results for the light and dark areas (Table 4), the light area

represents the phase with a lower chromium content, while the dark area has a higher chromium content. Another characteristic of the dark phase is the presence of nitrogen or silicon.

Table 1 also presents the results of EDS when analyzing the total spectrum of the entire observed image.

**Table 1**  
**Results of EDS analysis of metal samples\*, %**

**Кесте 1**  
**Металл үлгілерінің ЭДС талдау нәтижелері\*, %**  
**Таблица 1**  
**Результаты EDS-анализа образцов металлов\*, %**

| Figure                           | Plot       | Cr           | Fe           | Si          | V           | N           |
|----------------------------------|------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Fig. 1, a<br>(1st batch variant) | <b>Sum</b> | <b>64.47</b> | <b>30.88</b> | <b>0.66</b> | <b>1.07</b> | <b>2.92</b> |
|                                  | Light      | 60.08        | 38.63        | 0.89        | 0.40        | -           |
|                                  | Dark       | 76.66        | 14.16        | -           | 2.92        | 6.26        |
| Fig. 1, b<br>(2nd batch variant) | <b>Sum</b> | <b>66.31</b> | <b>28.52</b> | <b>0.14</b> | <b>0.91</b> | <b>4.12</b> |
|                                  | Light      | 53.61        | 46.06        | 0.33        | -           | -           |
|                                  | Dark       | 78.09        | 11.82        | -           | 2.72        | 7.37        |
|                                  | Black      | 79.51        | 9.20         | 1.87        | 4.40        | 5.02        |
| Fig. 1, c<br>(3rd batch variant) | <b>Sum</b> | <b>63.53</b> | <b>31.87</b> | <b>0.92</b> | <b>2.05</b> | <b>1.63</b> |
|                                  | Light      | 58.58        | 40.12        | 0.70        | 0.60        | -           |
|                                  | Dark       | 85.14        | 4.87         | -           | 5.01        | 4.98        |
| Fig. 1, d<br>(4th batch variant) | <b>Sum</b> | <b>52.19</b> | <b>36.79</b> | <b>7.59</b> | <b>2.22</b> | <b>1.21</b> |
|                                  | Light      | 54.39        | 37.70        | 7.28        | 0.63        | -           |
|                                  | Dark       | 72.46        | 14.29        | 12.22       | 1.03        | -           |
|                                  | Black      | 75.33        | 9.43         | 1.78        | 7.60        | 5.86        |

\* EDS analysis was carried out on several samples and several areas, and the results were within the error limits of the method used, therefore the results presented in Table 4 can be considered averaged

Comparing the characteristic microstructure of the studied samples and their composition according to the results of EDS, it can be concluded that the metal samples obtained with options 1 and 3 of introducing reducing agents consist of two phases: a light solid solution of **Cr-Fe** and a dark one based on nitrides in the **Cr-V-N** system; in options 2 and 4, silicides are also formed in the **Cr-Si** system (**Cr<sub>3</sub>Si** and **Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>**), which is explained by the excess of **Si**, the source of which are reducing agents.

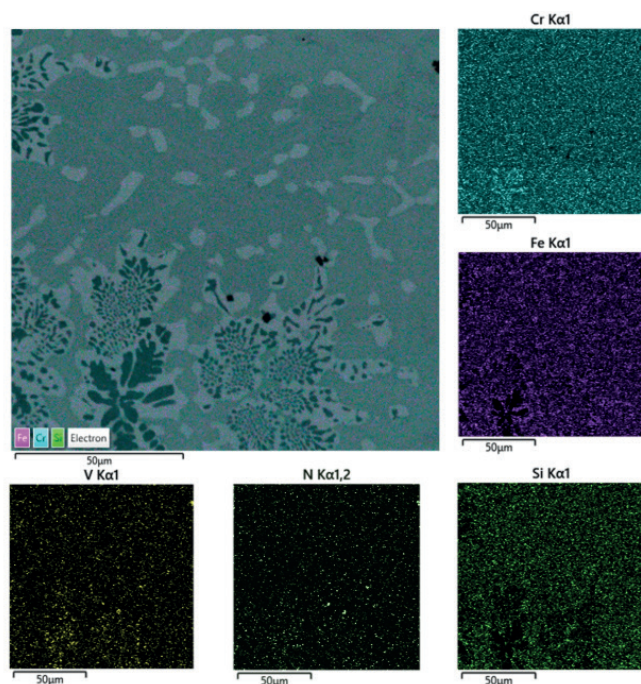
Analyzing the data from the combined spectra, as shown in Table 4, higher chromium contents are observed for charge variants 1 and 2.

Figure 2 shows a map of the element distribution in a metal sample obtained from charge variant 2.

Element distribution maps for variants 1 and 3 are not provided, as they exhibit similar distribution patterns, which is also confirmed by the compositions discussed previously (Table 4).

Nitrogen saturation and the formation of chromium and vanadium nitrides at high temperatures are thermodynamically possible; however, their stability decreases with increasing temperature. High temperatures above 1650 °C can be achieved through exothermic reduction reactions [5], which could result in localized overheating followed by rapid cooling, preventing nitrogen decomposition.





**Figure 2. SEM image of a metal sample obtained from the 2nd batch variant in the backscattered electron detection mode, and a distribution map of chromium, iron, silicon, vanadium and nitrogen.**

**Сурет 2. Кері шашыранқы электронды анықтау режимінде 2-ші партия нұсқасынан алынған металл үлгісінің SEM кескіні және хром, темір, кремний, ванадий және азоттың таралу картасы.**

**Рис. 2. Изображение образца металла, полученного из 2-й партии в режиме детектирования обратнорассеянных электронов, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, и карта распределения хрома, железа, кремния, ванадия и азота.**

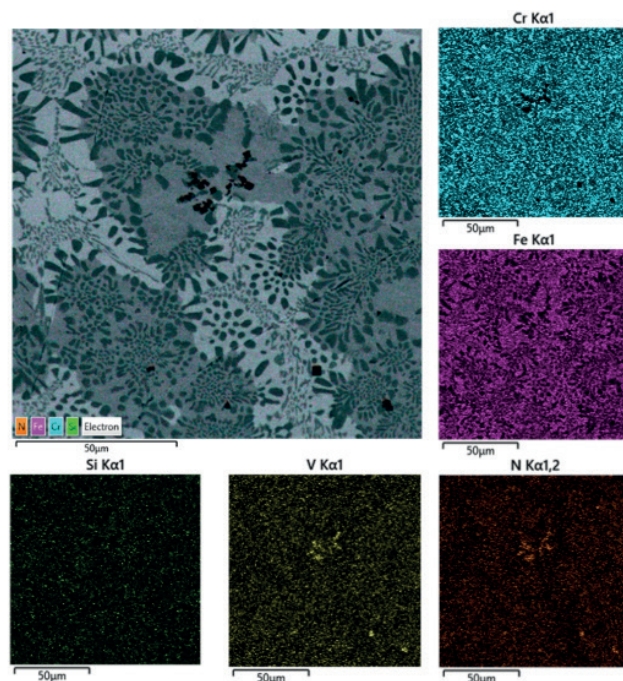
Figure 3 shows a similar element distribution map for a metal sample obtained from batch variant 4.

Figure 3 shows that *Cr* is distributed over the entire surface of the sample, but is more concentrated in dark areas along with *Si* and *N*. *V* is distributed fairly uniformly, primarily rebound with *N*, and is present to a lesser extent in areas enriched in *Si*, which is absent from the black phase.

Using analytical chemistry methods, the content of elements difficult to determine by EDS was determined in all metals, and the average content was:  $C \leq 0.10\%$ ;  $S \leq 0.02\%$ ;  $P \leq 0.03\%$ . Thus, all the metal samples studied were characterized by low contents of these elements. Nitrogen content was determined using titrimetric analysis, which confirmed an average nitrogen content of 2.6; 3.6; 2.6, and 2.1 for metal samples from variants 1, 2, 3, and 4, respectively.

Ferrochrome samples obtained from batch variants 1, 2, and 3 meet the requirements for the *FeCr60C1N3* grade (low-carbon nitrogen-containing ferrochrome) according to ISO 5448-81. This makes the obtained metal samples suitable for alloying nitrogen-containing stainless steels. The metal obtained from batch variant 4 is close to the requirement for *FeCr60C50Si7LP* (high-carbon ferrochrome) according to

ISO 5448-81, but with a low *C* content and increased *N*; it can also be considered as low-carbon nitrogen-containing ferrochrome with an increased *Si* content. The metal samples also met the listed requirements for low-carbon ferrochrome grades in terms of *C*, *S*, and *P* contents.



**Figure 3. SEM image of a metal sample obtained from the 4th batch variant in EDS mode, distribution map of chromium, iron, silicon, vanadium and nitrogen.**

**Сурет 3. ЭДС режимінде 4-ші партия нұсқасынан алынған металл үлгісінің SEM кескіні, хром, темір, кремний, ванадий және азоттың таралу картасы.**

**Рис. 3. Изображение образца металла, полученного из 4-й партии вариантов, полученное с помощью СЭМ в режиме энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), карта распределения хрома, железа, кремния, ванадия и азота.**

### Discussion

The obtained results can be explained by the thermodynamic and kinetic features of metallothermic reduction in the *Cr-Fe-Si-Ca-V-N* system at high temperatures. The formation of *Cr-Fe* solid solutions in all charge variants confirms effective reduction of chromium oxides by silicon, aluminum, and calcium contained in *FeAlSiCa* and *FeSiCr*. The presence of *Cr-V-N* phases indicates active nitrogen dissolution in the melt, while their stabilization is likely associated with rapid cooling after exothermic reactions, preventing nitrogen degassing.

The formation of *Cr<sub>3</sub>Si* and *Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>* silicides in variants with reductant excess is attributed to increased silicon activity. Under moderate reductant content, silicon is primarily consumed in oxide reduction, limiting silicide formation. Thus, the phase composition is strongly governed by the balance between reduction stoichiometry and silicon excess.

The advantages of the proposed approach are related to the use of complex reducing agents that ensure simultaneous par-



ticipation of **Si**, **Al**, and **Ca**, increasing reduction efficiency. The use of ferrosilicochrome dust promotes partial recycling of metallurgical waste. Moreover, eliminating coke reduces carbon contamination and enables the production of low-carbon ferrochrome suitable for nitrogen alloying. The metallothermic mechanism also provides localized temperature intensification without additional external energy input.

Compared with conventional carbothermic ferrochrome production, the developed approach ensures very low carbon content ( $\leq 0.10\%$ ) and high chromium recovery (up to 86%) without direct carbon input. Stable nitrogen alloying was achieved without additional nitrogen injection, which may simplify industrial application.

However, the study has limitations. Laboratory crucible experiments do not fully reproduce industrial heat and mass transfer conditions. Local overheating may lead to phase inhomogeneity, and controlling silicon content remains challenging. Additionally, the absence of detailed thermodynamic modeling limits precise prediction of phase equilibria.

Further work should focus on optimizing reductant ratios, performing thermodynamic simulations, and scaling the process to pilot conditions. Industrial implementation will require control of reaction intensity and economic evaluation of reductant efficiency.

Overall, carbon-free metallothermic reduction using **FeAl-SiCa** and **FeSiCr** dust represents a promising route for producing low-carbon nitrogen-containing ferrochrome, though further optimization and scaling are necessary.

### Conclusions

This study investigated the feasibility of carbon-free smelting of chromium-containing ferroalloy using ferroaluminosilicocalcium (**FeAlSiCa**) and ferrosilicochrome dust (**FeSiCr**) as complex metallothermic reducing agents. It was established

that the application of these reductants ensures efficient reduction of chromium oxides with the formation of **Cr-Fe** metallic phases and **Cr-V-N** nitride phases.

The results demonstrated that the phase composition of the produced alloys depends on the ratio of reductants relative to stoichiometry. Under moderate excess of reductants, predominantly **Cr-Fe** solid solutions and nitride phases are formed, whereas a significant excess of silicon leads to the formation of **Cr-Si** silicides. Therefore, the balance between reduction capacity and silicon activity is a key factor in controlling alloy structure and properties.

All investigated variants produced alloys with low impurity contents: carbon  $\leq 0.10\%$ , sulfur  $\leq 0.02\%$ , and phosphorus  $\leq 0.03\%$ . Chromium recovery reached up to 86%, which is comparable to industrial practice. According to chemical composition, the obtained alloys meet the requirements of ISO 5448-81 for low-carbon nitrogen-containing ferrochrome, confirming their suitability for alloying corrosion-resistant and nitrogen-containing steels.

The charge composition with a 10% excess of reductants was identified as optimal, providing high chromium recovery, stable phase composition, and compliance with standard specifications.

The obtained results confirm the potential of using **FeAlSiCa** and **FeSiCr** dust in carbon-free metallothermic ferrochrome production. Further research should focus on thermodynamic modeling of phase equilibria, optimization of charge composition, and scaling the process to pilot and industrial levels.

### Acknowledgments

*The research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant no. BR24992758).*

### REFERENCES

1. Thongyoung P., Tungtrongpairoj J. Carbothermic Reduction of the Waste Chromium Oxide Rods from Thermal Spray Processes // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 965. – Article 012024 (in English)
2. Gautam M., Pandey B., Agrawal M. Carbon Footprint of Aluminum Production. In *Environmental Carbon Footprints*. – Amsterdam: Elsevier, 2018. – P. 197–228 (in English)
3. Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of High-Carbon Ferrochrome Production / W. Wei et al. // *JOM*. – 2023. – Vol. 75. – P. 1206–1220 (in English)
4. Sommerfeld M., Botinha R., Friedrich B. (May 2024). Enabling CO<sub>2</sub> Neutral Metallurgy for Ferrochromium Production Using Bio-Based Reducing Agents. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61700-4> (in English)
5. Poluchenie kompleksnykh kal'cijsoderzhashhih ferrosplavov iz otval'nykh metallurgicheskikh shlakov i vysokozol'nykh uglej [Production of complex calcium-containing ferroalloys from waste metallurgical slags and high-ash coals], E. N. Mahambetov et al. *STAL [STEEL]*. – 2019. – No. 10. – P. 18–21 (in Russian)
6. Tekhnologiya SVS kompozitsionnykh ferrosplavov chast' I. Metallurgicheskii SVS protsess. Sintez nitridov ferrovanadiya i ferrokhroma [SHS Technology of Composite Ferroalloys, Part I. Metallurgical SHS Process. Synthesis of Ferrovanadium and Ferrochrome Nitrides], M. Kh. Ziatdinov et. al. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii [Chernaya Metallurgiya News of Higher Education Institutions. Ferrous Metallurgy]*. – 2018. – No. 61 (5). – P. 339–347 (in Russian)
7. Mahambetov E. N., Bajsanov A. S., Nabiev A. M. Pererabotka i ispol'zovanie tverdykh tehnogennykh othodov otval'nykh metallurgicheskikh shlakov dlya polucheniya kal'cijsoderzhashhih ferrosplavov [Processing and use of solid technogenic waste of metallurgical slags for the production of calcium-containing ferroalloys]. In: *Trudy kongressa «Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov*

pererabotki i utilizacii tehnogennyh obrazovaniy» «TEHNOGEN – 2017» [Proceedings of the congress «Fundamental research and applied development of processes for processing and utilization of man-made formations» «TECHNOGEN – 2017»]. Ekaterinburg, 2017. – P. 144–147 (in Russian)

8. Fabrication of a complex aluminosilicochrome alloy by a slag-free method / Zh. Ye. Shabanov et. al. // Russian metallurgy (Metally). – 2014. – No. 5. – P. 11–14 (in English)
9. Akhmetov A. (2 June, 2025) Carbon-Free Smelting of Ferrochrome Using FeAlSiCa Alloy. Processes. <https://doi.org/10.3390/pr13061745> (in English)
10. Development of technology of complex aluminum-silicon-chrome alloy with utilization of off grade raw materials / A. Mekhtiev et. al. // Metallurgy. Zagreb. – 2015. – Vol. 54. – No. 1. – P. 157–160 (in English)
11. Bartenev A., Issagulov A., Baisanov A. Studying microstructure and phase composition of a new complex calcium containing alloy // Metallurgy. – 2016. – Vol. 55. – No. 4. – P. 727–729 (in English)
12. Surup G.R., Trubetskaya A., Tangstad M. (November 9, 2020). Charcoal as an Alternative Reductant in Ferroalloy Production: A Review. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/11/1432> (in English)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Thongyoung P., Tungtrongpaioj J. Термиялық бұрку процестерінен қалған хром оксиді өзекшелерін карботермиялық тотықсыздандыру // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Т. 965. – 012024 (ағылшын тілінде)
2. Gautam M., Pandey B., Agrawal M. Алюминий өндірісіндегі көміртегі ізі. Қоршаған ортадағы көміртегі іздері. – Амстердам: Elsevier. – 2018. – Б. 197–228 (ағылшын тілінде)
3. Жоғары көміртекті феррохром өндірісінің энергия тұтынуы және парниктік газ шығарындылары / W. Wei [және т. б.] // JOM. – 2023. – Т. 75. – Б. 1206–1220 (ағылшын тілінде)
4. Sommerfeld M., Botinha R., Friedrich B. (Мамыр, 2024). Биологиялық негіздегі тотықсыздандырғыштарды қолдана отырып, феррохром өндірісі үшін CO<sub>2</sub> бейтарап металлургиясын қамтамасыз ету. Scientific Reports. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61700-4> (ағылшын тілінде)
5. Үйінді металлургиялық қождардан және күлі жоғары көмірден құрамында кальций бар кешенді ферроқорытпаларды алу / Е. Н. Махамбетов [және т. б.] // Болат. – 2019. – № 10. – Б. 18–21 (орыс тілінде)
6. Композиттік ферроқорытпалардың SHS технологиясы, I бөлім. Металлургиялық SHS процесі. Феррованадий мен феррохром нитридтерінің синтезі / М. Х. Зиатдинов [және т. б.] // Қара Металлургия Жоғары оқу орындарының жасаалықтары. Қара металлургия. – 2018. – № 61 (5). – Б. 339–347 (орыс тілінде)
7. Махамбетов Е.Н., Байсанов А.С., Набиев А.М. және т. б. Құрамында кальций бар ферроқорытпаларды алу үшін үйінді металлургиялық қождардың қатты техногендік қалдықтарын өңдеу және пайдалану // «Техногендік түзілімдерді қайта өңдеу және кәдеге жарату процестерінің іргелі зерттеулері және қолданбалы әзірлемелері» «ТЕХНОГЕН – 2017» конгресінің еңбектері. – Екатеринбург, 2017. – Б. 144–147 (орыс тілінде)
8. Қожсыз тәсілмен кешенді алюмосиликохром қорытпасын алу / Zh. Ye. Shabanov [және т. б.] // Russian metallurgy (Metally). – 2014. – № 5. – Б. 11–14 (ағылшын тілінде)
9. Akhmetov A. (2 маусым, 2025 ж.) FeAlSiCa қорытпасын пайдаланып феррохромды көміртегісіз балқыту. Processes. <https://doi.org/10.3390/pr13061745> (ағылшын тілінде)
10. Алюминий-кремний-хром күрделі қорытпасы технологиясын кондициялық емес шикізатты пайдалана отырып әзірлеу / A. Mekhtiev [және т. б.] // Metallurgy. Zagreb. – 2015. – Т. 54. – № 1. – Б. 157–160 (ағылшын тілінде)
11. Bartenev A., Issagulov A., Baisanov A. Құрамында кальций бар жаңа күрделі қорытпаның микроқұрылымы мен фазалық құрамын зерттеу // Metallurgy. – 2016. – Т. 55. – № 4. – Б. 727–729 (ағылшын тілінде)
12. Surup G.R., Trubetskaya A., Tangstad M. (9 қараша 2020 ж.). Ферроқорытпа өндірісіндегі балама тотықсыздандырғыш ретінде көмір қолдану: шолу. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/11/1432> (ағылшын тілінде)

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Thongyoung P., Tungtrongpaioj J. Карботермическое восстановление отходов оксида хрома, образующихся в процессе термического напыления // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Т. 965. – Ст. 012024 (на английском языке)
2. Gautam M., Pandey B., Agrawal M. Углеродный след производства алюминия // Environmental Carbon Footprints. – Амстердам: Elsevier, 2018. – С. 197–228 (на английском языке)

3. Потребление энергии и выбросы парниковых газов при производстве высокоуглеродистого феррохрома / W. Wei [и др.] // JOM. – 2023. – Т. 75. – С. 1206–1220 (на английском языке)
4. Sommerfeld M., Botinha R., Friedrich B. (Май 2024 г.). Обеспечение углеродно-нейтральной металлургии для производства феррохрома с использованием биооснованных восстановителей. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61700-4> (на английском языке)
5. Получение комплексных кальцийсодержащих ферросплавов из отвалных металлургических шлаков и высокозольных углей / Е. Н. Махамбетов [и др.] // Сталь. – 2019. – № 10. – С. 18–21 (на русском языке)
6. Технология СВС композитных ферросплавов, часть I. Металлургический процесс СВС. Синтез нитридов феррованадия и феррохрома / М. Х. Зиятдинов [и др.] // Известия высших учебных заведений Черной металлургии. Черная металлургия. – 2018. – № 61 (5). – С. 339–347 (на русском языке)
7. Махамбетов Е. Н., Байсанов А. С., Набиев А. М. и др. Переработка и использование твердых техногенных отходов отвалных металлургических шлаков для получения кальцийсодержащих ферросплавов // Труды конгресса «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» «ТЕХНОГЕН – 2017». – Екатеринбург, 2017. – С. 144–147 (на русском языке)
8. Получение комплексного алюмосиликохромового сплава бесшлаковым способом // Zh. Ye. Shabanov [и др.] // Russian metallurgy (Metally). – 2014. – № 5. – С. 11–14 (на английском языке)
9. Akhmetov A. (2 июня 2025 г.) Безуглеродная плавка феррохрома с использованием сплава FeAlSiCa. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr13061745> (на английском языке)
10. Разработка технологии сложного сплава алюминий-кремний-хром с использованием некондиционного сырья / A. Mekhtiev [и др.] // Metallurgy. Zagreb. – 2015. – Т. 54. – № 1. – С. 157–160 (на английском языке)
11. Bartenev A., Issagulov A., Baisanov A. Исследование микроструктуры и фазового состава нового комплексного кальцийсодержащего сплава // Metallurgy. – 2016. – Т. 55. – № 4. – С. 727–729 (на английском языке)
12. Surup G.R., Trubetskaya A., Tangstad M. (9 ноября 2020 г.). Древесный уголь как альтернативный восстановитель в производстве ферросплавов: обзор. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/11/1432> (на английском языке)

**Information about the authors:**

**Saulebek Zh. K.**, Ph.D student in the educational program 8D07203 – «Metallurgy», junior research fellow, Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan), [zhaga1998@gmail.com](mailto:zhaga1998@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-3852-7513>

**Toleukadyr R. T.**, Ph.D student in the educational program 8D07203 – «Metallurgy», research fellow, LLP «QazMetals Engineering» (Karaganda, Kazakhstan), [ruslan-94kz@mail.ru](mailto:ruslan-94kz@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5402-0400>

**Sadyk Zh. O.**, Master's student of the educational program 7M07203 – «Mining», engineer, Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev (Karaganda, Kazakhstan), [sadzhad03@gmail.com](mailto:sadzhad03@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0006-8557-1532>

**Onuralp Yucel**, Ph.D, professor, Istanbul Technical University (Istanbul, Turkey), [yucel@itu.edu.tr](mailto:yucel@itu.edu.tr); <https://orcid.org/0000-0002-3879-0410>

**Авторлар туралы мәліметтер:**

**Саулебек Ж. Қ.**, 8D07203 – «Металлургия» білім беру бағдарламасы бойынша Ph.D докторанты, кіші ғылыми қызметкер, Ж. Әбішев атындағы химия-металлургиялық институты (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Төлеуқадыр Р. Т.**, 8D07203 – «Металлургия» білім беру бағдарламасы бойынша Ph.D докторанты, ғылыми қызметкер, ТОО «QazMetals Engineering» (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Садық Ж. О.**, 7M07203 – «Тау-кен ісі» білім беру бағдарламасының магистранты, инженер, Ж. Әбішев атындағы химия-металлургия институты (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Онуралп Юджел**, Ph.D, профессор, Стамбұл техникалық университеті (Стамбұл қ., Түркия)

**Сведения об авторах:**

**Саулебек Ж. Қ.**, докторант Ph.D по образовательной программе 8D07203 – «Металлургия», мл. научный сотрудник, Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан)

**Төлеуқадыр Р. Т.**, докторант Ph.D по образовательной программе 8D07201 – «Металлургия», научный сотрудник, ТОО «QazMetals Engineering» (г. Караганда, Казахстан)

**Садық Ж. О.**, магистрант образовательной программы 7M07203 – «Горное дело», инженер, Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева (г. Караганда, Казахстан)

**Онуралп Юджель**, Ph.D, профессор, Стамбульский технический университет (г. Стамбул, Турция)





**Mining Week**  
KAZAKHSTAN' 2026

**XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА  
ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЛЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
И РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕДР**



**23-25**  
**06.2026**  
**КАРАГАНДА, КАЗАХСТАН**

**INT EXPO**  
TOO «TNT EXPO»

tel:  
+7 (727) 344 00 63

e-mail:  
mintek@tntexpo.kz

inst:  
mining.week.kazakhstan





Код МРНТИ 53.37.91

Н. К. Досмухамедов<sup>1</sup>, Н. К. Айтенов<sup>1</sup>, Л. И. Дитятковский<sup>2</sup>, \*Е. Е. Жолдасбай<sup>3</sup><sup>1</sup>Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),<sup>2</sup>ООО «Институт «Стальпроект»» (г. Москва, Россия),<sup>3</sup>Жезказганский университет им. О. А. Байконурова (г. Жезказган, Казахстан)

## К ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ МНОКОМПОНЕНТНОГО ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ БАЯЛДЫРСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА

**Аннотация.** В работе получены дополнительные сведения о физико-химических характеристиках сложных по составу медь-, свинец содержащих оксидно-сульфидных отходах, полученных в результате деятельности Баялдырского свинцово-цинкового комбината. Приводятся результаты экспериментальных исследований, направленных на разработку технологии переработки вторичной переработки отходов. Показана возможность разделения оксидной и сульфидной фаз путем интенсивной продувки расплава инертным газом (*Ar*) при температуре 1200 °С. Установлено, что при продувке расплава в течение 20 минут достигается полное разделение фаз с получением металлического свинца в донной фазе и что распределение меди в штейн достигает 93,71%, а свинца в черновой свинец – 7%. Подробно изучено распределение меди и свинца между продуктами плавки.

**Ключевые слова:** медь, свинец, отходы, разделение фаз, распределение, барботаж.

### Баялдыр қалдық қорымының техногендік көп компонентті шикізатын өңдеу технологиясына

**Аннотация.** Жұмыста Баялдыр полиметалл комбинатының мырыш-қорғасын фабрикасынан жиналған мыс, қорғасын күрделі құрамды оксидті-сульфидтік қалдықтардың физикалық-химиялық сипаттамалары туралы қосымша мәліметтер алынған. Жиналған құрамы күрделі қоспаларды екіншілеі өңдеудің технологиялық сұлбасын қолға алу мақсатымен жүргізілген тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері берілген. Балкыманы 1200 °С температура кезінде инертті газбен (*Ar*) қарқынды барботаждау арқылы оксидтік және сульфидтік фазалардың бөлінуінің негізгі мүмкіндігі анықталған. Фазалардың металдық қорғасынның түзілуімен толық бөлінуіне балкыманы 20 минут үрлегеннен кейін қол жеткізуге болатыны дәлелденген. Мыстың штейнге бөлініп таралуы 93,71%-ға, ал қорғасынның қаралы қорғасынға 7%-ға жететіні анықталды. Терең деңгейде мыс пен қорғасынның алынған өнімдер арасындағы бөлініп таралуы зерттелді.

**Түйінді сөздер:** мыс, қорғасын, қалдықтар, фазалардың бөлінуі, бөлініп таралу, барботаж.

### To the technology of processing multicomponent man-made raw materials of the Bayaldyr tailings mine

**Abstract.** The work provides additional information on the physico-chemical characteristics of complex copper-, lead-containing oxide-sulfide wastes obtained as a result of the Bayaldyr Lead-Zinc Combine. The results of experimental studies aimed at developing a recycling technology are presented. The possibility of separating the oxide and sulfide phases by intensive purging of the melt with an inert gas (*Ar*) at a temperature of 1200 °C is shown. It was found that when purging the melt for 20 minutes, complete phase separation is achieved with the production of metallic lead in the bottom phase. It was found that the distribution of copper in matte reaches 93.71%, and lead in rough lead – 7%. The distribution of copper and lead between smelting products has been studied in detail.

**Key words:** copper, lead, waste, phase separation, distribution, bubbling.

### Введение

В хвостохранилищах горнопромышленного производства Казахстана накоплено ~6 млрд т техногенных минеральных образований, из которых 21% приходится на отвальные хвосты обогащения руд [1–3].

Технический уровень обогащения руд не обеспечивает комплексность использования сырья. С хвостами обогащения теряется значительная часть цветных, драгоценных, редких и редкоземельных металлов [4, 5].

Известны различные способы переработки хвостов обогатительных фабрик. На практике широко используются способы извлечения золота и серебра из хвостов с использованием цианирования и выщелачивания серной, соляной кислотой [6, 7]. В свое время намечалась активная тенденция по переработке хвостов обогатительных фабрик «ГМК КазахАлтын». Для извлечения из хвостов золота использовали методы кучного выщелачивания, гравитационной сепарации, сорбционного пульпового выщелачивания. Однако эти работы были прекращены ввиду низкой рентабельности и комплексности извлечения ценных металлов.

Изыскание новых технологий, направленных на решение комплексной переработки хвостов обогатительных фабрик, является актуальной задачей. Важность задачи усугубляется необходимостью решения экологических проблем. Негативное воздействие накопленных хвостов на здоровье человека и окружающую среду уже не может оставаться без внимания. Накопленные отходы занимают большие территории и выводятся из землепользования. Годовой выход техногенных минеральных образований

составляет ~250 млн т, из которых 24% приходится на хвосты обогатительных фабрик [1, 2].

Одним из рискованных объектов является Баялдырское хвостохранилище вблизи г. Кентау в Туркестанской области. Накопленный объем хвостов – около 150 млн т. Хвостохранилище занимает ~333,0 га земельной площади с открытой поверхностью [8]. Ликвидация Кентауской и Миргалимсайской обогатительных фабрик привела к прекращению поступления на поверхность хвостохранилища влажных шламов. Поверхностный слой отвала, состоящий из мелких частиц, полностью высох. Интенсивная ветровая эрозия поверхности хвостохранилища – основная экологическая проблема региона. При ветреной погоде образуется роза ветров с мелкими частицами, которые покрывают г. Кентау и окрестности г. Туркестан с густонаселенными селами. Повышенное загрязнение пылью атмосферного воздуха и поверхности почвы прилегающих районов привело к катастрофическим последствиям. В регионе наблюдается резкий рост легочной, сердечно-сосудистой и аспираторной заболеваемости здорового населения и детей. Растет социальная напряженность. В связи с приданием г. Туркестан статуса культурно-исторического и туристического центра, проблема утилизации отходов Баялдырского хвостохранилища как никогда стала обязательным условием поддержки экологически благополучного состояния окружающей среды и здоровья населения. Решение вопроса перешло под жесткий контроль государства.

Основная цель настоящей работы на основании изучения вещественного состава мышьяк-, золотосодержащего многокомпонентного техногенного сырья свинцовых фа-

брик и фазовых превращений, характерных при их термическом нагреве, проведение оценки возможности выделения свинцового продукта в начальной стадии разработки технологии для их переработки.

### Исходные материалы и методы исследования

**Исходные материалы.** Для исследований в работе использованы две пробы свинцово-цинковых отходов Баялдырского хвостохранилища различной крупности: проба № 1 – перемешанные оксидно-сульфидные фазы различной крупности (~200 меш) и проба № 2 – в виде тонкой пыли.

Пробы свинцово-цинковых отходов обогатительных фабрик для исследований отобраны непосредственно на предприятиях, согласно существующим нормам и правилам по отбору проб представителями завода. В работе использован большой объем пробы с проведением многократных измерений на содержание в них искомых элементов. Полученные результаты усреднялись, что позволило снизить погрешность, связанную с локальными колебаниями состава.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждены экспериментальными данными и широким использованием статистических методов обработки результатов и применением комплекса физико-химических методов исследований.

**Методы исследования.** Для определения элементного и фазового состава использовали спектрометр Optima 2000 DV (производство Perkin Elmer Inc., США). Для контрольных измерений применены – рентгеновский дифрактометр D8 Advance; рентгенофлуоресцентный спектрометр с волновой дисперсией Venus 200 PANalytical B.V. (PANalytical B.V.,

Нидерланды), а также уникальный отечественный энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр РПП-21 (ТОО «АспапГЕО», г. Алматы), успешно эксплуатируемый на ряде обогатительных фабриках и металлургических заводах Казахстана. Прибор позволяет определять концентрации элементов в нижних пределах их обнаружения [9].

Содержание благородных металлов в пробах подтверждено методом химического анализа.

Дополнительные исследования фазового анализа исходной пыли проводились с использованием рентгеновского дифрактометра Bruker D8 ADVANCE, излучение  $\alpha$ -Cu, напряжение на трубке 40 кВ, ток 40 мА. Обработка полученных данных дифрактограмм и расчет межплоскостных расстояний проводились с помощью программного обеспечения EVA. Расшифровка проб и поиск фаз проводились по программе Search/match с использованием Базы порошковых дифрактометрических данных PDF-2.

Определение элементного состава проб пыли по вышеописанным методикам проводили дважды. За конечный результат элементного состава принимали среднее значение независимых измерений.

Использование широкого набора оборудования и комплексных методов анализа вещественного состава пыли позволило достичь высокой степени точности и надежности полученных экспериментальных данных.

Результаты элементного состава исходных проб представлены в таблице 1.

В таблице 2 показаны результаты фазового состава по основным компонентам пустой породы проб № 1 и № 2, которые практически идентичны между собой.

Таблица 1

### Результаты элементного состава исходных проб

Кесте 1

### Бастапқы сынамалардың элементтік құрамының нәтижелері

Table 1

### Results of the elemental composition of the initial samples

| Наименование<br>пробы | Содержание, % масс. |           |           |           |          |           |           |           |        |
|-----------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|--------|
|                       | <i>Cu</i>           | <i>Pb</i> | <i>Zn</i> | <i>Fe</i> | <i>S</i> | <i>Au</i> | <i>Ag</i> | <i>As</i> | Прочие |
| Проба № 1             | 0,01                | 0,82      | 4,34      | 1,7       | 3,01     | 0,44      | 2,80      | -         | 44,31  |
| Проба № 2             | 3,04                | 39,06     | 5,91      | 1,35      | 8,19     | -         | -         | 13,0      | 29,45  |

Таблица 2

### Результаты фазового состава исходных проб. Съемка производилась на аппарате D8 Advance (Bruker)

Кесте 2

### Бастапқы сынамалардың фазалық құрамының нәтижелері. Түсірілім D8 Advance (Bruker) аппаратында жүргізілді

Table 2

### Results of the phase composition of the initial samples. The shooting was done on a D8 Advance (Bruker) camera

| Pattern #       | Compound Name           | Formula                      | <i>S-Q</i> |
|-----------------|-------------------------|------------------------------|------------|
| PDF 01-071-1662 | Dolomite                | $CaMg(CO_3)_2$               | 58,0%      |
| PDF 01-089-1304 | Calcite, magnesian, syn | $(Mg_{0.03}Ca_{0.97})(CO_3)$ | 23,0%      |
| PDF 00-046-1045 | Quartz, syn             | $SiO_2$                      | 13,7%      |
| PDF 01-078-1833 | Barium Sulfate          | $Ba(SO_3)_{0.3}(SO_4)_{0.7}$ | 5,3%       |



При организации опытов по разделению фаз необходимо учитывать поведение, по-возможности, всех присутствующих компонентов, изменение которых может повлиять на конечное формирование устойчивых оксидных и сульфидных фаз. Это имеет принципиальное значение для организации общей технологии переработки отходов с целью эффективного извлечения из них ценных металлов в дальнейшем.

Учитывая вышеизложенные положения на первом этапе основной упор был сделан на изучение фазовых превращений, наблюдаемых при нагреве исходного техногенного сырья.

### Результаты и их общее обсуждение

#### Термический анализ исследованных проб при нагреве

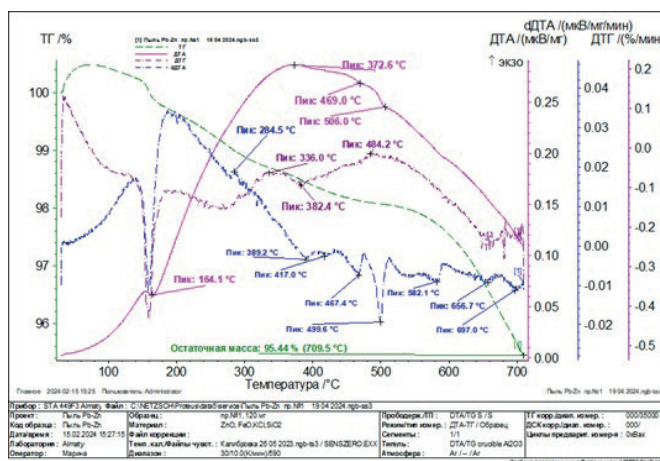
Исследования проведены с использованием прибора синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter. Перед нагревом печное пространство откачивалось (уровень откачанного объема ~92%) и затем продувалось инертным газом в течение 5 минут. Нагрев осуществлялся со скоростью 10 °С/мин. в атмосфере высокоочищенного аргона. Охлаждение велось со скоростью 12 °С/мин. Общий объем поступающего газа выдерживался в пределах 120 мл/мин. Обработка результатов, полученных с помощью STA 449 F3 Jupiter, производилась посредством программного обеспечения NETZSCH Proteus.

Результаты проб № 1 и № 2 при термическом нагреве показаны на рис. 1 и 2.

Интенсивный минимум с максимальным развитием при 164,1 °С на кривой ДТА, сопровождающийся снижением массы навески, может отражать процесс дегидратации  $SiO_2 \cdot nH_2O$ . В наложение, сочетание этого эндотермического эффекта и экзотермического эффекта с пиком при 284,5 °С на кривой dDTA м. б. проявлением аморфного гидроксида железа. Экзотермический эффект с пиком при 372,6 °С на кривой ДТА является проявлением окисления примеси органики (графит, углерод элементный). Сочетание эндотермических эффектов с экстремумами при 469 °С и 506 °С на кривой ДТА м. б. отражением разложения церуссита –  $Pb[CO_3]$ . В области 300–700 °С на кривой dDTA выявлен ряд эндотермических эффектов. На этом температурном отрезке могут идти процессы диссоциации карбонатов –  $Zn_3[CO_3]_2(OH)_6$ ,  $Zn_3Cu_2[CO_3]_2(OH)_6$ ,  $Zn[CO_3]$ ,  $Mg[CO_3]$ , а также десульфатизация  $Pb[Cu,Fe,Al]_3[SO_4]_2(OH)_6$ ,  $KFe[SO_4]_2(OH)_6$ . Максимумы на кривой ДТГ при 336 °С и 484,2 °С могут отражать процесс поэтапного окисления  $Fe^{2+}$  в вюстите.

Расхождение данных термического анализа объясняется тем, что часть фаз не имеет эффектов в интервале температур 20–700 °С ( $KCl$ ), часть фаз термоинертны – ( $ZnO$ ,  $CaFeO_2$ ,  $ZnOFeO$ ). Поэтому проявились соединения, содержащиеся в пробе в небольших концентрациях.

Экзотермический эффект с пиком при 469,3 °С на кривой ДТА, сопровождающийся снижением массы навески, отражает окисление органики с образованием газовой фазы. На кривой ДТГ этому процессу соответствует растянутый минимум при 498,7 °С. В наложение, минимум на ДТГ может быть проявлением диссоциации ( $Zn$ ,  $Fe$ )/ $CO_3$ . Эндотермический эффект на кривой ДТА с мак-



Величина навески – 0,120 г.

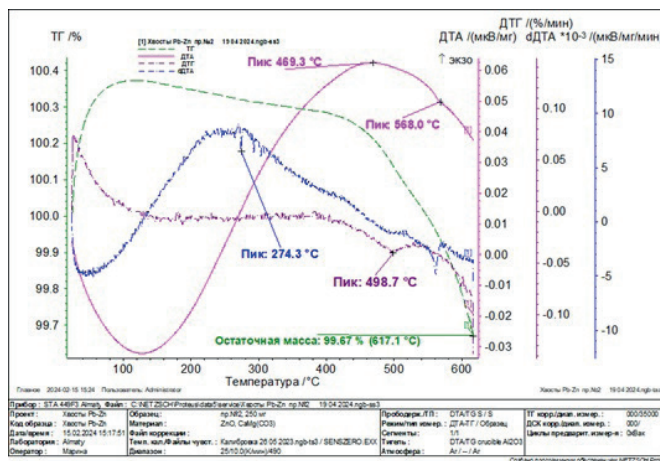
Өлшемдінің мөлшері – 0,120 г.

The value of the suspension is 0.120 g.

Рис. 1. Фазовые изменения в пробе № 1 при нагреве.

Сурет 1. Қыздыру кезіндегі № 1 үлгідегі фазалық өзгерістер.

Figure 1. Phase changes in sample No. 1 during heating.



Величина навески – 0,250 г.

Өлшемдінің мөлшері – 0,250 г.

The value of the suspension is 0.250 g.

Рис. 2. Фазовые изменения в пробе № 2 (пыль, хвосты Pb, Zn) при нагреве.

Сурет 2. Қыздыру кезіндегі № 2 үлгідегі (шан, Pb, Zn қалдықтары) фазалық өзгерістер.

Figure 2. Phase changes in sample No. 2 (dust, tailings of Pb, Zn) during heating.

симальным развитием при 568 °С является проявлением энантиотропного полиморфного превращения кварца. Эндотермический эффект на кривой dDTA с экстремумом при 274,3 °С может быть отражением энантиотропного полиморфного превращения примеси кристобалита.

В диапазоне температур 600–800 °С на кривой ДТА наблюдается ряд слабовыраженных эндо- и экзотермических эффектов, интерпретация которых затруднена из-за возможных наложений процессов десульфатизации и диссо-

циации сложных оксидных фаз. Вероятно, именно в этом интервале температур происходит завершение десульфатизации свинцовых и железосодержащих сульфатов, а также разложение остаточных количеств карбонатов.

На кривой ТГ в области 700–900 °С наблюдается плато, свидетельствующее о прекращении потери массы образцом. Это указывает на то, что к данному этапу основные процессы разложения и окисления завершены, и образуются стабильные оксидные фазы. Небольшие колебания на кривой ДТА в этом диапазоне могут быть связаны с незначительными структурными перестройками в оксидных соединениях.

Сравнение результатов термического анализа проб № 1 и № 2 показывает, что состав и термохимическое поведение существенно различаются. В пробе № 1 преобладают процессы, связанные с дегидратацией кремнезема и окислением органических примесей, в то время как в пробе № 2 более выражены эффекты, обусловленные разложением карбонатов и сульфатов. Это свидетельствует о различиях в минеральном составе и содержании органических веществ в исследуемых образцах.

Таким образом, термический анализ выявил существенные различия в составе и термохимическом поведении проб № 1 и № 2. Проба № 1 характеризуется преобладанием процессов дегидратации кремнезема и окисления органических примесей. Для пробы № 2 более характерны эффекты разложения карбонатов и сульфатов. Расхождение результатов объясняется различной концентрацией соединений в пробах и термохимическими свойствами отдельных фаз. В целом, обе пробы имеют сложный многокомпонентный состав, содержат различные минеральные фазы и органические примеси, подвергающиеся термическому разложению при нагревании. Анализ кривых ДТА, ДТГ и ТГ позволил идентифицировать ряд процессов, таких как дегидратация, окисление органики, разложение карбонатов и сульфатов, а также полиморфные превращения минералов.

*Опыты по выделению свинцового продукта из исходных отходов путем интенсивной продувки расплава инертным газом*

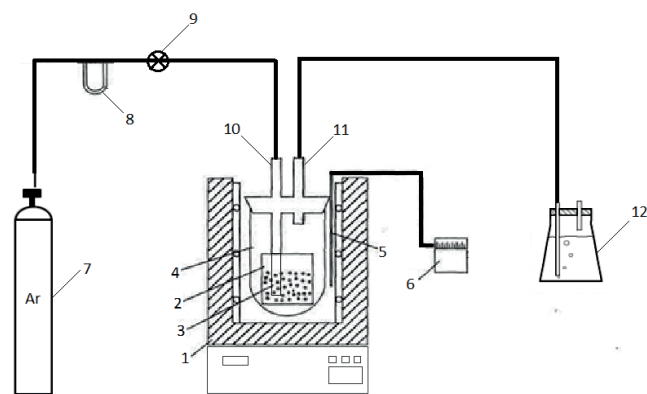
В работах А. В. Ванюкова отмечается, что запутавшиеся капли штейновых частиц из оксидно-сульфидных расплавов можно выделить путем простого перемешивания расплава различными газами [10, 11, 12]. Принимая во внимание это положение, было проведено 5 опытов по продувке пробы № 1 при различном времени обработки расплава – 5, 10, 15, 20 минут.

Температура опытов во всех опытах была постоянной и составляла 1523 К.

Схема установки для проведения опытов показана на рис. 3.

Во всех опытах количество исходной навески составляла 500 г. Во время опытов оценивалась возможность полноты разделения фаз и распределение ценных металлов между продуктами плавки. Суть опытов заключалась в следующем.

Предварительно измельченную и прошедшую минералогические исследования пробу исходного материала массой 500 г загружают в алундовый тигель (2) и помещают



1 – силистовая печь; 2 – алундовый тигель; 3 – исходный материал; 4 – кварцевый реактор; 5 – термопара; 6 – потенциометр; 7 – баллон с аргонном; 8 – реометр; 9 – кран; 10, 11 – алундовые трубки; 12 – емкость с водой  
1 – silite furnace; 2 – alundum crucible; 3 – source material; 4 – quartz reactor; 5 – thermocouple; 6 – potentiometer; 7 – argon cylinder; 8 – rheometer; 9 – faucet; 10, 11 – alund tubes; 12 – water tank

**Рис. 3. Схема лабораторной установки для проведения опытов по разделению фаз из исходного сырья.**

**Сурет 3. Бастанқы шикізаттан фазаларды бөлу бойынша тәжірибелер жүргізуге арналған зертханалық қондырғының сызбасы.**

**Figure 3. Diagram of a laboratory facility for conducting phase separation experiments from feedstock.**

тигель внутри кварцевого реактора (4). Кварцевый реактор герметично закрывают пробкой с двумя отверстиями. Кварцевый реактор с сырьем устанавливают в шахтную силистовую печь (1). Через два отверстия пробки внутри кварцевого реактора вводят две алундовые трубки (10, 11).

Для исследования влияния продолжительности продувки на полноту разделения фаз алундовую трубку (10), соединенную с баллоном с аргонном (7), погружают в жидкий расплав и осуществляют продувку с одновременным перемешиванием. С целью определения эффективной продолжительности продувки аргонном для каждого режима параллельно проводили эксперименты с различной длительностью времени. Для нейтрализации газов, выделяющихся в процессе продувки при заданном времени перемешивания аргонном, вторую трубку соединяют с емкостью с водой (12).

После истечения заданного времени продувки продувку прекращают, а трубку (10) извлекают из жидкого расплава. После продувки, с целью создания условий для разделения фаз, жидкий расплав выдерживали в покое в течение 10 минут. После охлаждения печи алундовый тигель внутри кварцевого реактора вскрывали, а разделившиеся шлаковую и штейновую фазы направляли на химический анализ.

В результате исследований во всех опытах была выделена сульфидная и оксидная фазы. После разделения и измельчения каждая проба подвергалась элементному анализу на содержание цветных металлов и мышьяка. Золото и серебро в сульфидной фазе определяли методом химического анализа.

С целью проверки опытов на воспроизводимость каждый опыт проводился по три раза.

Динамика выделения свинцового продукта в виде сульфидной фазы, концентрированного золотом и серебром, в зависимости от времени продувки расплава, показана на рис. 4.

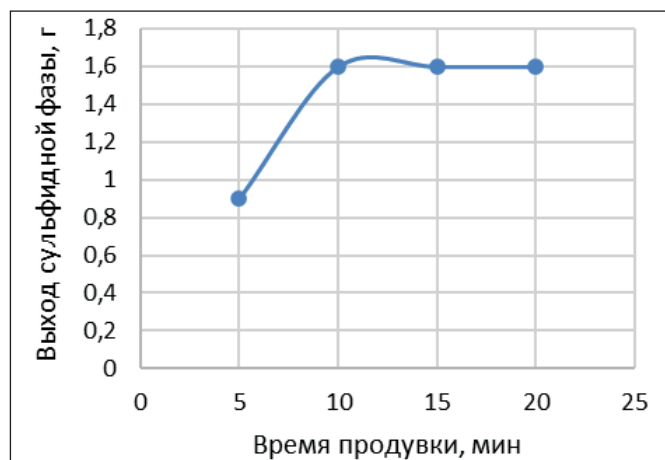
Как видно на рис. 4 (А), при простом перемешивании оксидно-сульфидных хвостов аргонem можно достичь разделения продукта на две фазы: сульфидную и оксидную. При этом свинец, золото и серебро существенно концентрируются в донной сульфидной фазе. Однако при достижении определенного объема и продолжительности продувки (20 мин.), результаты стабилизируются и эффекта разделения фаз не происходит.

Наилучшие результаты по разделению фаз достигнуты при времени обработки расплава аргонem в течение 20 минут. Дальнейшее увеличение времени продувки на выход фаз не влияет. При оптимальной продувке расплава в течение 20 минут выход сульфидной составляющей составил – 3,96 г.

Получен оксидный расплав состава, % масс.:  $\text{CaO}$  – 21,48;  $\text{FeO}$  – 22,08;  $\text{SiO}_2$  – 27,62 и прочие.

Расчетные значения по извлечению ценных металлов по целевым продуктам составили, %: свинец – в сульфидную фазу – 97; медь в штейн – 98; цинк в шлак – 96; серебро в черновой свинец – 98; золото в штейн – 99.

Несмотря на полученные положительные результаты по извлечению цветных и драгоценных металлов по целевым продуктам, в ходе опытов установлена высокая до 90% концентрация мышьяка в сульфидной фазе. Около 10% мышьяка распределяется в шлак. Наличие мышьяка существенно ухудшает качество получаемых продуктов и затрудняет дальнейшую их переработку.



А)

Результаты минералогических исследований полученных продуктов

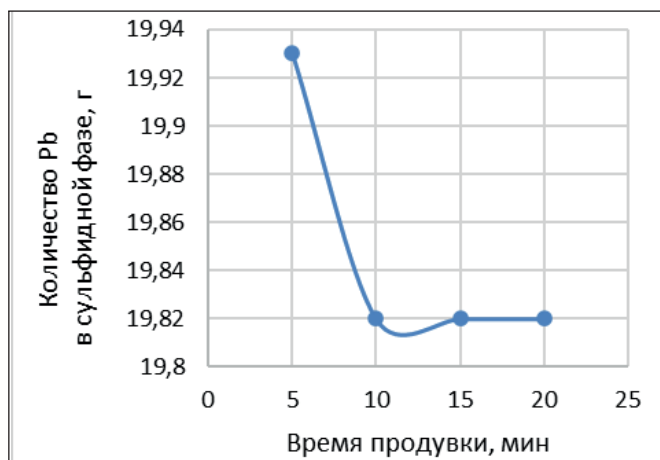
Результаты минералогических исследований, проведенных с целью определения форм нахождения металлов в составе полученных продуктов, представлены на рис. 5 и 6.

На микрошлифах твердой оксидной фазы (рис. 5) на фоне кристобалита ( $\text{SiO}_2$ ), не связанного с фаялитом ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), наблюдаются агрегированные мелкозернистые образования магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), а также скопления тонких игольчатых кристаллов делафоссита ( $\text{CuFeO}_2$ ) и мелкие каплеобразные зерна вюстита ( $\text{FeO}$ ). Четко выявляются соединения геленита ( $\text{Ca}_2\text{AlSiAlO}_7$ ) и в небольшом количестве буро-красные соединения шпинелей ( $(\text{Fe,Mg})(\text{Fe,Al,Cr})_2\text{O}_4$ ). В шлаке встречаются мелкие включения металлического свинца и галенита ( $\text{PbS}$ ).

На микрошлифах образцов также наблюдаются белые образования с высокой отражательной способностью, характерной для металлических соединений, предположительно представляющие собой соединения железа с мышьяком ( $\text{Fe}_3\text{As}$ ).

Структура сульфидной фазы представляется несколько более сложной (рис. 6). Основными компонентами являются твердый пирротинный раствор, моносльфидные твердые растворы свинца, цинка, а также металлические соединения. Подтверждено присутствие в штейне как сростков, так и отдельных зерен магнетита. Обнаружено значительное количество крупных и мелких включений металлической меди, а также включений металлического свинца. В тонком шлифе встречается прозрачный по виду платтнерит ( $\text{PbO}_2$ ).

Обнаружены металлические соединения, характерные для сплавов железа с мышьяком. Кроме того, в штейне присутствуют тонко взаимопереплетенные фазы. Выявлены очень крупные включения шлакового состава, такие как делафоссит ( $\text{CuFeO}_2$ ), магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), фаялит ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) и металлический свинец. Появление одинаковых структурных составляющих свидетельствует о возможности их образования в результате кристаллизации расплава или его перехода в твердое состояние.



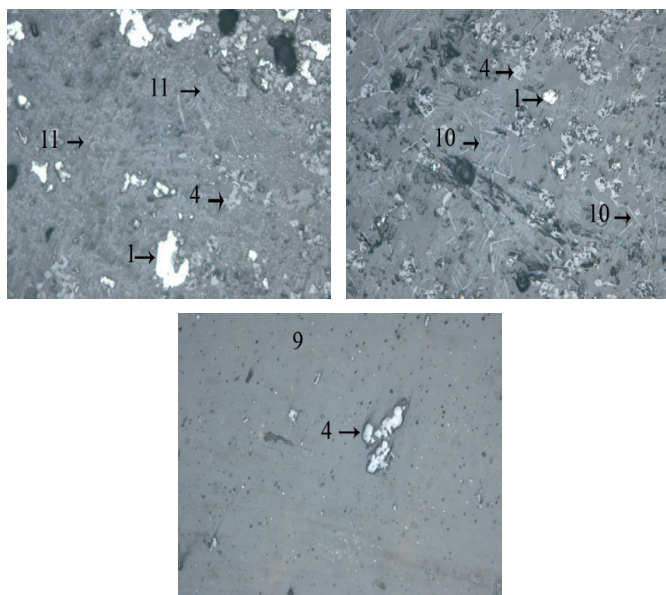
Б)

Рис. 4. Зависимость выхода сульфидной фазы (А) и содержания свинца в сульфидной фазе (Б) от продолжительности продувки.

Сурет 4. Ұрлеу ұзактығына байланысты сульфидті фазаның шығымы (А) мен сульфидті фазадағы қорғасын мөлшерінің (Б) өзгеруі.

Figure 4. Dependence of sulfide phase yield (А) and lead content in the sulfide phase (Б) on blowing duration.





1 – расплав железа с мышьяком ( $Fe_3As$ ); 4 – магнетит ( $Fe_3O_4$ ); 9 – стекло; 10 – дельфоссит ( $CuFeO_2$ ); 11 – вюстит ( $FeO$ )

1 – мышьякпен темірдің балқымасы ( $Fe_3As$ );

4 – магнетит ( $Fe_3O_4$ ); 9 – айна; 10 – дельфоссит ( $CuFeO_2$ ); 11 – вюстит ( $FeO$ )

1 – iron-arsenic melt ( $Fe_3As$ ); 4 – magnetite ( $Fe_3O_4$ ); 9 – glass; 10 – delafossite ( $CuFeO_2$ ); 11 – wustite ( $FeO$ )

**Рис. 5. Микрошлифы полученных оксидных фаз.**

**Сурет 5. Алынған оксид фазаларының микрошлифтері.**

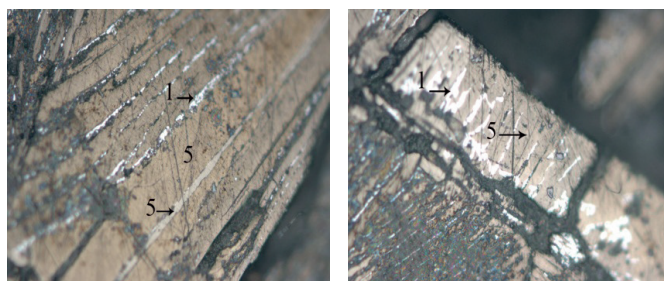
**Figure 5. Microslips of the obtained oxide phases.**

В связи с этим при определении количества элементов и минеральных соединений в составе сульфидной фазы, а также их конечных объемных соотношений, следует учитывать не только состав расплава, но и условия кристаллизации, формирующие минералогию конечных фаз.

Полученные результаты показывают, что при существенном присутствии мышьяка в исходном продукте применение данного способа для выделения свинцового продукта в начальной стадии технологии будет затруднено, и его применение окажется малоэффективным. Тогда, для решения поставленной задачи необходимо изыскания других методов решения, направленных, вначале, на разработку способа для удаления мышьяка, затем – для селективного извлечения свинцового продукта, концентрированного серебром.

### Выводы

1. В работе показана возможность полного разделения чернового свинца, а также оксидной и сульфидной фаз из



1 – металлическое железо или расплавы; 5 – сульфиды железа, меди

1 – металдық темір немесе балқыма; 5 – мыс, темір сульфидтері

1 – metallic iron or melts; 5 – iron and copper sulfides

**Рис. 6. Микрошлифы сульфидной фазы.**

**Сурет 6. Сульфидті фазалық микрошлифтер.**

**Figure 6. Microslips of the sulfide phase.**

некондиционных собранных оксидно-сульфидных отходов сложного состава, содержащих свинец и медь, путем их предварительного плавления и интенсивной продувки жидкого расплава.

2. Экспериментально установлено, что при продувке расплава аргоном в течение 20 минут в черновой свинец переходит 3,14% от общего содержания свинца, а в штейн – 12,22% меди от ее общего количества в исходном материале.

3. По результатам минералогического и рентгеноструктурного анализов продуктов эксперимента определен их фазовый состав. В образцах шлаковой фазы выявлены соединения ( $Fe_2SiO_4$ ), ( $Ca_2AlSiAlO_7$ ) и в небольшом количестве ( $(Fe, Mg)(Fe, Al, Cr)_2O_4$ ),  $PbS$ , тогда как в образцах штейновой фазы обнаружены твердый пирротинный раствор, моносulfидные твердые растворы свинца, а также металлические соединения цинка и мышьяка, сурьмы, связанных с железом и медью.

4. Полученные результаты имеют большое значение для разработки эффективной технологической схемы переработки накопленных некондиционных отходов.

### Благодарность

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2025–2027 годы по приоритетному направлению «Экология, окружающая среда и рациональное природопользование» проекта AP26196599 «Разработка безотходной комбинированной технологии для утилизации отходов свинцово-цинковых обогатительных фабрик с получением новых видов товарной продукции».

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Постановление Правительства Республики Казахстан № 1022 от 16 августа 1996 года «Положение о порядке ведения Государственного кадастра техногенных минеральных образований в Республике Казахстан» (на русском языке)
2. Самакова А. Б. Проблемы отходов производства и потребления и пути решения: доклад министра ООС РК на парламентских слушаниях по вопросам отходов производства и потребления. – Астана, 21 нояб. 2003 г. (на русском языке)

3. Комплексное управление отходами / В. Н. Уманец [и др.] // Промышленность Казахстана. – 2004. – № 2. – С. 60–65 (на русском языке)
4. Аналитическая справка о деятельности МООС РК за 2004 год. – Астана, 2005 (на русском языке)
5. Бекебаева М. О., Канаев А. Т. Влияние антропогенных факторов на состав и структуру растительных сообществ // Вестник современных исследований. – 2019. – № 2–12 (29). – С. 7–14 (на русском языке)
6. Квитка В. В., Кушакова Л. Б., Яковлева Е. П. Переработка лежалых хвостов обогатительных фабрик Восточного Казахстана // Горный журнал. – 2001. – № 9. – С. 57–61 (на русском языке)
7. Прогрессивные (экологически значимые) технологии переработки медно-цинкового минерального сырья техногенных месторождений: проблемы и решения / В. А. Чантурия [и др.] // Инженерная экология. – 2004. – № 5. – С. 3–11 (на русском языке)
8. Кудрявский Ю. П., Черный С. А. Эколого-экономический критерий эффективности технологий переработки производственных отходов в цветной металлургии // Цветные металлы. – 2008. – № 4. – С. 8–11 (на русском языке)
9. Евдокимов С. И., Евдокимов В. С. Переработка лежалых хвостов свинцово-цинковой обогатительной фабрики // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2015. – № 3. – С. 3–11 (на русском языке)
10. Досмухамедов Н. К., Даулетбақов Т. С., Егізекөв М. Г. Оптимизация экологической безопасности медного производства Казахстана. – Алматы: DPS, 2011. – 188 с. (на казахском языке)
11. Досмухамедов Н. К., Жусупбеков С. С., Айтенов К. Д. Экологические проблемы свинцовых предприятий Казахстана // Материалы 8-ой Международной научно-практической конференции «Научное пространство Европы», Прага. – 2012. – С. 5–11 (на русском языке)
12. Плавка в жидкой ванне / А. В. Ванюков, В. П. Быстров, А. Д. Васкевич [и др.]. – М.: Металлургия, 1988. – 208 с. (на русском языке)

#### ПАЙДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. «Қазақстан Республикасында техногендік минералдық түзілімдердің мемлекеттік кадастрын жүргізу тәртібі туралы Ереже» Қазақстан Республикасы Үкіметінің 1996 жылғы 16 тамыздағы № 1022 Қаулысы (орыс тілінде)
2. Самакова А. Б. Өндіріс және тұтыну қалдықтарының проблемалары және шешу жолдары: өндіріс және тұтыну қалдықтары мәселелері бойынша парламенттік тыңдауларда ҚР ҚОҚ министрінің баяндамасы. – Астана, 21 қар. 2003 ж. (орыс тілінде)
3. Қалдықтарды кешенді басқару / В. Н. Уманец [және т. б.] // Қазақстан өнеркәсібі. – 2004. – № 2. – Б. 60–65 (орыс тілінде)
4. ҚР ҚОМ 2004 жылғы қызметі туралы талдамалық анықтама. – Астана, 2005 (орыс тілінде)
5. Бекебаева М. О., Канаев А. Т. Антропогендік факторлардың өсімдіктер қауымдастығының құрамы мен құрылымына әсері // Заманауи зерттеулердің хабаршысы. – 2019. – № 2–12 (29). – Б. 7–14 (орыс тілінде)
6. Квитка В. В., Кушакова Л. Б., Яковлева Е. П. Шығыс Қазақстанның байыту фабрикаларының қалған қалдықтарын қайта өңдеу // Тау-кен журналы. – 2001. – № 9. – Б. 57–61 (орыс тілінде)
7. Техногендік кен орындарының мыс-мырыш минералдық шикізатын өңдеудің прогрессивті (экологиялық маңызды) технологиялары: мәселелері мен шешімдері / В. А. Чантурия [және т. б.] // Инженерлік экология. – 2004. – № 5. – Б. 3–11 (орыс тілінде)
8. Кудрявский Ю. П., Черный С. А. Түсті металлургиядағы өндірістік қалдықтарды қайта өңдеу технологияларының тиімділігінің экологиялық-экономикалық критерийі // Түсті металдар. – 2008. – № 4. – Б. 8–11 (орыс тілінде)
9. Евдокимов С. И., Евдокимов В. С. Қорғасын-мырыш байыту фабрикасының қалдықтарын қайта өңдеу // Жоғары оқу орындарының жаңалықтары. Түсті металлургия. – 2015. – № 3. – Б. 3–11 (орыс тілінде)
10. Досмухамедов Н. К., Даулетбақов Т. С., Егізекөв М. Г. Қазақстан мыс өндірісінің экологиялық қауіпсіздігін ықшамдау. – Алматы: DPS, 2011. – 188 б. (қазақ тілінде)
11. Досмухамедов Н. К., Жусупбеков С. С., Айтенов К. Д. Қазақстанның қорғасын кәсіпорындарының экологиялық мәселелері // «Еуропаның ғылыми кеңістігі» 8-ші Халықаралық ғылыми-практикалық конференциясының материалдары, Прага. – 2012. – Б. 5–11 (орыс тілінде)
12. Сұйық ваннада балқыту / А. В. Ванюков, В. П. Быстров, А. Д. Васкевич [және т. б.]. – М.: Металлургия, 1988. – 208 б. (орыс тілінде)

#### REFERENCES

1. Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan № 1022 ot 16 avgusta 1996 goda «Polozhenie o poryadke vedeniya Gosudarstvennogo kadastra tekhnogennykh mineral'nykh obrazovaniy v Respublike Kazakhstan» [Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 1022 dated August 16, 1996 «Regulations on the procedure for maintaining the State Cadastre of technogenic mineral Formations in the Republic of Kazakhstan»] (in Russian)

2. Samakova A. B. *Problemy otkhodov proizvodstva i potrebleniya i puti resheniya: doklad ministra OOS RK na parlamentskikh slushaniyakh po voprosam otkhodov proizvodstva i potrebleniya* [Problems of production and consumption waste and solutions: report of the Minister of Environmental Protection of the Republic of Kazakhstan at the parliamentary hearings on production and consumption waste]. – Astana, Nov. 21, 2003 (in Russian)
3. *Kompleksnoe upravlenie otkhodami* [Integrated waste management] V. N. Umanets et al. *Promyshlennost' Kazakhstana* [Industry of Kazakhstan Magazine]. – 2004. – No. 2. – P. 60–65 (in Russian)
4. *Analiticheskaya spravka o deyatelnosti MOOS RK za 2004 god* [Analytical report on the activities of the Ministry of Environmental Protection of the Republic of Kazakhstan in 2004]. – Astana, 2005 (in Russian)
5. Bekebaeva M. O., Kanaev A. T. *Vliyanie antropogennykh faktorov na sostav i strukturu rastitel'nykh soobshchestv* [The influence of anthropogenic factors on the composition and structure of plant communities]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Bulletin of Modern Research]. – 2019. – No. 2–12 (29). – P. 7–14 (in Russian)
6. Kvitka V. V., Kushakova L. B., Yakovleva E. P. *Pererabotka lezhalykh khvostov obogatitel'nykh fabrik Vostochnogo Kazakhstana* [Processing of stale tailings from processing plants in East Kazakhstan]. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. – 2001. – No. 9. – P. 57–61 (in Russian)
7. *Progressivnye (ekologicheski znachimye) tekhnologii pererabotki medno-tsinkovogo mineral'nogo syr'ya tekhnogennykh mestorozhdenii: problemy i resheniya* [Progressive (environmentally significant) technologies for processing copper-zinc mineral raw materials from man-made deposits: problems and solutions] V.A. Chanturia et al. *Inzhenernaya ekologiya* [Environmental engineering]. – 2004. – No. 5. – P. 3–11 (in Russian)
8. Kudryavskiy Yu. P., Cherny S. A. *Ekologo-ekonomicheskii kriterii effektivnosti tekhnologii pererabotki proizvodstvennykh otkhodov v tsvetnoi metallurgii* [Ecological and economic criterion of efficiency of industrial waste processing technologies in non-ferrous metallurgy]. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. – 2008. – No. 4. – P. 8–11 (in Russian)
9. Evdokimov S. I., Evdokimov V. S. *Pererabotka lezhalykh khvostov svintsovo-tsinkovoi obogatitel'noi fabriki* [Processing of stale tailings of a lead-zinc concentrating plant]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy]. – 2015. – No. 3. – P. 3–11 (in Russian)
10. Dosmukhamedov N. K., Dauletbakov T. S., Egizekov M. G. *Optimization of environmental safety of copper production in Kazakhstan*. – Almaty: DPS, 2011. – 188 p. (in Kazakh)
11. Dosmukhamedov N. K., Zhusupbekov S. S., Aitenov K. D. *Ekologicheskie problemy svintsovykh predpriyatii Kazakhstana* [Environmental problems of lead enterprises in Kazakhstan]. In: *Materialy 8-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnoe prostranstvo Evropy»* [Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference «Scientific Space of Europe»]. – Prague, 2012. – P. 5–11 (in Russian)
12. *Plavka v zhidkoi vanne* [Melting in a liquid bath] A. V. Vanyukov, V. P. Bystrov, A. D. Vaskevich. – Moscow: Metallurgiya, 1988. – 208 p. (in Russian)

#### Сведения об авторах:

**Досмухамедов Н. К.**, к. т. н., профессор, профессор кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых» (г. Алматы, Казахстан), [n.dosmukhamedov@satbayev.university](mailto:n.dosmukhamedov@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0002-1210-4363>

**Айтенев Н. К.**, докторант кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых» (г. Алматы, Казахстан), [nurzhan.aitenov@mail.ru](mailto:nurzhan.aitenov@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7890-5446>

**Дитятковский Л. И.**, к. т. н., Почетный металлург России, научный консультант ООО «Институт «Стальпроект»» (г. Москва, Россия), [dityatovskiy@mail.ru](mailto:dityatovskiy@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0005-8785-5419>

**Жолдасбай Е. Е.**, Ph.D, доцент кафедры «Горное дело, металлургия и естествознание» (г. Жезказган, Казахстан), [zhte@mail.ru](mailto:zhte@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9925-4435>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Досмухамедов Н. К.**, т. ғ. к., профессор, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының профессоры (Алматы қ., Қазақстан)

**Айтенев Н. К.**, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының докторанты (Алматы қ., Қазақстан)

**Дитятковский Л. И.**, т. ғ. к., Ресейдің құрметті металлургы, «Стальпроект институты» ЖШҚ ғылыми кеңесшісі (Мәскеу қ., Ресей)

**Жолдасбай Е. Е.**, Ph.D, «Тау-кен ісі, металлургия және жаратылыстану» кафедрасының доценті (Жезқазған қ., Қазақстан)

#### Information about the authors:

**Dosmukhamedov N. K.**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Metallurgy and Mineral Processing (Almaty, Kazakhstan)

**Aitenov N. K.**, Doctoral student Department of Metallurgy and Mineral Processing (Almaty, Kazakhstan)

**Dityatovsky L. I.**, Candidate of Technical Sciences, Honorary Metallurgist of Russia, Scientific Consultant, Institute «Stalproekt» LLC (Moscow, Russia)

**Zholdasbay Ye. Ye.**, Ph.D, Associate Professor of the Department of Mining, Metallurgy and Natural Sciences (Zhezkazgan, Kazakhstan)



Код МРНТИ 52.45.29

\*А. М. Шаханов, М. Б. Барменшинова, Н. Токенов  
Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),  
ТОО «АснанГЕО» (г. Алматы Казахстан)

## ВНЕДРЕНИЕ ЭКСПРЕСС-РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА НЕИСТЕРТЫХ ПРОБ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНЫХ РУД

**Аннотация.** В статье представлен опыт внедрения метода экспресс-рентгенофлуоресцентного анализа неистертых проб продуктов флотационного обогащения медных руд на Жезказганских обогатительных фабриках №№ 1 и 2 ТОО «Корпорация Казахмыс». Для оперативного контроля содержания основных компонентов применялись портативные анализаторы РПП-12Т. Перед внедрением проведены сравнительные исследования результатов анализа неистертых проб и проб после стандартной лабораторной пробоподготовки. Статистическая обработка данных подтвердила возможность использования экспресс-анализа в производственных условиях. Показано, что метод позволяет существенно сократить время получения аналитической информации при сохранении требуемой точности для оперативного технологического контроля.

**Ключевые слова:** рентгенофлуоресцентный анализ, экспресс-анализ, неистертые пробы, медные руды, флотационное обогащение, оперативный контроль.

**Мыс кендерін флотациялық байытуды оперативті бақылау үшін истерілмеген үлгілерге экспресс-рентгенофлуоресценттік талдау әдісін енгізу**

**Аңдатпа.** Мақалада «Қазақмыс корпорациясы» ЖШС-нің № 1 және № 2 Жезқазған байыту фабрикаларында мыс кендерін флотациялық байыту өнімдерінің истерілмеген үлгілеріне экспресс-рентгенофлуоресценттік талдау әдісін енгізу тәжірибесі қарастырылған. Негізгі компоненттердің құрамын жедел анықтау үшін РПП-12Т портативті анализаторлары қолданылды. Әдісті енгізу алдында истерілмеген үлгілерді талдау нәтижелері стандартты зертханалық сынама дайындаудан өткен үлгілердің нәтижелерімен салыстырылды. Деректерді статистикалық өңдеу экспресс-талдау нәтижелерін өндірістік жағдайда қолдануға болатынын көрсетті. Әдіс аналитикалық деректерді алу уақытын едәуір қысқартып, жедел технологиялық бақылау үшін қажетті дәлдікті сақтауға мүмкіндік беретіні дәлелденді.

**Түйінді сөздер:** рентгенофлуоресценттік талдау, экспресс-талдау, истерілмеген үлгілер, мыс кендері, флотациялық байыту, оперативті бақылау.

**Implementation of express x-ray fluorescence analysis of coarse non-pulverized samples for operational control of copper ore flotation concentration**

**Abstract.** The article presents the experience of implementing express X-ray fluorescence (XRF) analysis of coarse non-pulverized samples of copper ore flotation products at Concentrating Plants No. 1 and No. 2 of Kazakhmys Corporation LLP in Zhezkazgan. Portable RPP-12T XRF analyzers were used for rapid determination of the main components. Prior to implementation, analytical results from coarse non-pulverized samples were compared with those obtained after standard laboratory sample preparation. Statistical processing of the data confirmed the applicability of express analysis under industrial conditions. The method significantly reduces the time for obtaining analytical results while maintaining the accuracy required for operational process control.

**Key words:** X-ray fluorescence analysis, express analysis, coarse non-pulverized samples, copper ores, flotation concentration, operational control.

### Введение

Современные условия горно-обогатительного производства требуют оперативного получения достоверной информации о содержании полезных компонентов в продуктах переработки минерального сырья. Сокращение временного интервала между отбором проб и получением аналитических данных является важным фактором повышения эффективности управления технологическими процессами флотационного обогащения, позволяя своевременно корректировать технологические режимы и снижать потери металлов [1].

Традиционные лабораторные методы анализа, несмотря на высокую точность, характеризуются значительными временными затратами, связанными с необходимостью проведения полной схемы пробоподготовки, включающей сушку, измельчение и истирание проб. В условиях непрерывного производства задержка получения аналитических данных снижает эффективность оперативного технологического контроля.

Одним из широко применяемых методов оперативного определения элементного состава минерального сырья и продуктов его переработки является рентгенофлуоресцентный анализ (XRF) [2]. Количественный XRF-анализ базируется на использовании зависимостей взаимодействия первичного рентгеновского излучения с анализируе-

мым образцом. Используемые на практике аналитические выражения хорошо описывают зависимости интенсивностей рентгеновской флуоресценции от состава образца только для гомогенной среды [2]. Как следствие, классический количественный XRF-анализ обычно требует тщательной пробоподготовки – измельчения образца до мелкого порошка (< 100 мкм).

В настоящее время возникает обоснованный интерес к возможности использования рентгенофлуоресцентного метода для анализа неистертых, крупнодробленых порошковых проб [3, 4]. Несмотря на широкое применение РФА и развитие портативных анализаторов, большинство существующих исследований основано на анализе тщательно подготовленных проб. Применение метода для анализа неистертых проб в реальных производственных условиях изучено недостаточно. Научная новизна данной работы заключается во внедрении экспресс-метода портативного РФА для анализа грубозернистых неистертых проб непосредственно в процессе флотационного обогащения без стадии тонкого измельчения при сохранении точности, достаточной для оперативного контроля.

При анализе неистертых проб существенное влияние на точность и воспроизводимость результатов анализа оказывают такие факторы, как: гранулометрический состав образца, гетерогенность, невозможность корректного

учета изменений вещественного состава образца (эффекта матрицы), изменение геометрических условий проведения измерений, пористость образца [5]. Как следствие, необходимо в каждом конкретном случае учитывать особенности анализируемого объекта анализа и принимать меры, минимизирующие влияния указанных факторов, а также оптимизировать процедуру нахождения градуировочных характеристик прибора [6].

В связи с вышеизложенным, актуальной задачей является внедрение экспресс-рентгенофлуоресцентного метода анализа неистертых проб медного производства, обеспечивающего существенное сокращение времени получения аналитических данных и достижение точности, достаточной для оперативного управления технологическим процессом флотационного обогащения.

#### **Выбор и методика настройки рентгенофлуоресцентного анализатора**

Исследование проводилось на продуктах флотационного обогащения медных руд, включая руду и хвосты, отобранные на действующих обогатительных фабриках. Пробы характеризовались крупностью частиц до 2 мм. Измерения проводились с использованием портативного РФА-анализатора РПП-12Т производства ТОО «Аспап-ГЕО». Пробы помещались непосредственно в стандартные кюветы без измельчения. Каждая проба измерялась однократно. Особое внимание уделялось равномерности заполнения.

Для повышения качества анализа неистертых крупнозернистых проб необходимо:

- с целью уменьшения влияния на результаты анализа гранулометрического состава увеличивать площадь анализируемого материала, т. е. либо проводить несколько измерений в разных точках и использовать среднее значение найденных содержаний, либо использовать приборы с большой площадью засветки анализируемого образца;

- для обеспечения более корректного учета эффекта матрицы, минимизации влияния изменений геометрических условий проведения измерений, пористости, градиента плотности и гранулометрического состава образца, использовать фундаментальные зависимости взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, в том числе для рассеянного излучения;

- для повышения воспроизводимости результатов измерений использовать измерительные кюветы с однотипным способом насыпки, уплотнения и разравнивания анализируемого образца.

Выбор рентгенофлуоресцентного анализатора РПП-12Т обусловлен тем, что, в отличие от других портативных приборов, он имеет большую площадь облучаемой поверхности анализируемого образца, а его вычислительные возможности и аналитическое программное обеспечение позволяют реализовать выбранные методические подходы. При этом при проведении измерений в кюветах, входящих в комплект поставки, обеспечивается такая же защита от рентгеновского излучения, как в стационарных лабораторных приборах.

В процессе настройки прибора РПП-12Т для анализа неистертых проб корректировка градуировочных коэф-

фициентов по основному (*Cu*) и сопутствующим элементам (*Pb*, *Zn* и *Fe*) осуществлялась по результатам анализа на лабораторном приборе тех же проб после стандартной пробоподготовки.

#### **Результаты и обсуждение**

Для оценки возможности применения результатов экспресс-анализа неистертых проб на приборе РПП-12Т в производственных целях была проведена серия испытаний.

**Таблица 1**

**Исходные экспериментальные данные по *Cu***

**Кесте 1**

***Cu* туралы алғашқы тәжірибелік мәліметтер**

**Table 1**

**Initial experimental data on *Cu***

| Проба № | Лаборатория (прибор РПП-21), % <i>Cu</i> | РПП-12Т, % <i>Cu</i> |
|---------|------------------------------------------|----------------------|
| 59      | 0.71                                     | 0.66                 |
| 60      | 0.67                                     | 0.67                 |
| 61      | 0.71                                     | 0.68                 |
| 62      | 0.72                                     | 0.68                 |
| 63      | 0.69                                     | 0.68                 |
| 64      | 0.64                                     | 0.61                 |
| 85      | 0.91                                     | 0.93                 |
| 86      | 0.99                                     | 0.91                 |
| 87      | 0.69                                     | 0.68                 |
| 88      | 1.08                                     | 1.04                 |
| 89      | 1.05                                     | 1.0                  |
| 90      | 0.69                                     | 0.7                  |
| 91      | 1.12                                     | 1.07                 |
| 92      | 1.26                                     | 1.19                 |
| 93      | 0.72                                     | 0.7                  |
| 48      | 0.093                                    | 0.097                |
| 49      | 0.093                                    | 0.097                |
| 50      | 0.068                                    | 0.065                |
| 51      | 0.085                                    | 0.083                |
| 52      | 0.093                                    | 0.097                |
| 53      | 0.26                                     | 0.27                 |
| 54      | 0.198                                    | 0.198                |
| 55      | 0.098                                    | 0.089                |
| 56      | 0.104                                    | 0.098                |
| 57      | 0.089                                    | 0.086                |
| 36      | 0.09                                     | 0.089                |
| 39      | 0.073                                    | 0.073                |
| 40      | 0.079                                    | 0.079                |
| 41      | 0.064                                    | 0.06                 |
| 100     | 0.087                                    | 0.092                |
| 101     | 0.069                                    | 0.069                |
| 102     | 0.087                                    | 0.069                |
| 103     | 0.069                                    | 0.072                |



Рис. 1. Неистертая проба, уплотненная в аналитическую кювету.

Сурет 1. Ұнтақталмаған, аналитикалық кюветаға тығыздалған сынама.

Figure 1. Non-ground sample compacted in an analytical sample cup.

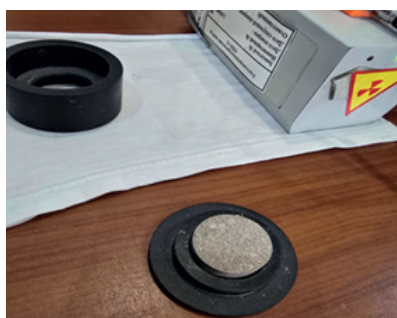


Рис. 2. Кювета с пробой, установленная в измерительную подставку.

Сурет 2. Сынама салынған кювета өлшеуіш тұғырғы орнатылған.

Figure 2. Sample cup with the sample placed in the measurement stand.



Рис. 3. Портативный рентгенофлуоресцентный анализатор РПП-12Т в процессе измерения.

Сурет 3. РПП-12Т портативті рентгенфлуоресценттік анализаторы өлшеу процесінде.

Figure 3. RPP-12T portable X-ray fluorescence analyzer during measurement.

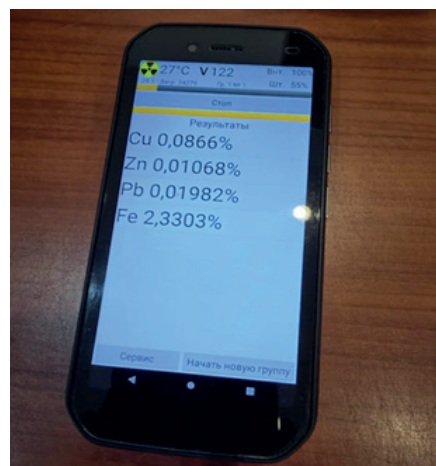


Рис. 4. Блок управления и обработки результатов измерений на базе Android с отображением результатов анализа.

Сурет 4. Талдау нәтижелері көрсетілген Android негізіндегі басқару блогы.

Figure 4. Android-based control unit displaying analysis results.

Таблица 2

Статистическая оценка точности экспресс-анализа *Cu*

Кесте 2

*Cu* экспресс анализінің дәлдігін статистикалық бағалау

Table 2

Statistical evaluation of the accuracy of rapid analysis of *Cu*

| Показатель                                 |          |
|--------------------------------------------|----------|
| Среднее абсолютное отклонение, % <i>Cu</i> | 0,018    |
| Стандартное отклонение, % <i>Cu</i>        | 0,024    |
| Дисперсия                                  | 0,000593 |
| Коэффициент корреляции $R^2$               | 0,998    |
| <i>P</i> -значение                         | 0,002    |

Результаты показывают высокую корреляцию ( $R^2 = 0,998$ ) и малый разброс данных. Несмотря на статистически значимые различия ( $p = 0,002$ ), их величина не превышает допустимые значения для оперативного контроля.

### Ограничения и область применимости метода

Следует учитывать, что предложенный метод экспресс-анализа неистертых проб не предназначен для замены лабораторных анализов, используемых при расчете товарного баланса металлов или коммерческих расчетах и сертификации продукции. Основной областью применения метода является оперативный технологический контроль, требующий высокой скорости получения данных при допустимой для управления процессом точности.

Кроме того, корректность применения метода определяется стабильностью гранулометрического состава анализируемого материала и требует предварительной адап-



тации приборов к конкретным условиям производства [6, 7, 8]. В условиях Жезказганских обогатительных фабрик №№ 1 и 2 метод экспресс-анализа применяется для определения содержания компонентов в часовых пробах продуктов обогащения. Сменные пробы, используемые для балансового учета, обрабатываются по традиционной лабораторной схеме и служат для контроля корректности результатов экспресс-анализа путем усреднения данных часовых проб, что соответствует рекомендациям по обеспечению достоверности аналитического контроля в производственных условиях [9, 10, 11].

#### **Сравнение с традиционной схемой аналитического контроля**

При традиционной схеме аналитического контроля общее время получения результатов включает этапы сушки, измельчения, истирания и лабораторного анализа, что в условиях производственной лаборатории занимает несколько часов. В случае с экспресс-лабораторией Жезказганских обогатительных фабрик №№ 1 и 2 среднее время составляет 2 часа. Применение экспресс-рентгенофлуоресцентного анализа неистертых проб позволяет исключить наиболее трудоемкие этапы пробоподготовки и сократить время до 50 минут [12].

При объеме 3000 проб в месяц пробоподготовка требует около 3000 человеко-часов, что соответствует 20–21 сотруднику. При средней заработной плате 1000 USD суммарные трудозатраты составляют около 20 000 USD в месяц.

Кроме того, требуется использование не менее двух истирателей (~10 000 USD).

Таким образом, внедрение метода позволяет существенно снизить данные затраты.

#### **Выводы**

1. Внедрен метод экспресс-рентгенофлуоресцентного анализа неистертых проб продуктов флотационного обогащения, обеспечивающий получение аналитической информации в сжатые сроки.

2. Внедрение метода позволило существенно сократить время получения аналитических данных за счет исключения стадий измельчения и истирания проб.

3. Дополнительно достигнута экономия трудозатрат и ресурсов пробоподготовительного оборудования, а также сокращение потребления электроэнергии и расходных материалов, что повышает общую ресурсную эффективность аналитического контроля.

4. Метод рекомендован для оперативного технологического контроля на обогатительных фабриках при условии предварительной адаптации приборов к конкретным условиям производства.

5. Полученные результаты подтверждают возможность тиражирования разработанного подхода на другие обогатительные фабрики. В частности, в 2026 году планируется внедрение метода экспресс-анализа неистертых проб на Балхашской обогатительной фабрике после проведения соответствующих калибровочных и верификационных работ.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Абдрахманова З. Т., Шаханов А. М., Нургалиев Д. К., Ефименко С. А. On-line мониторинг вещественного состава руд на Жезказганских обогатительных фабриках ТОО «Корпорация Казахмыс» // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы XIII Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики: в 2 т. Т. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 328–33 (на русском языке)
2. Jenkins R. Количественный рентгенофлуоресцентный анализ. – Бока-Ратон: CRC Press, 1995. – С. 45–60 (на английском языке)
3. Влияние гранулометрического состава на результаты рентгенофлуоресцентного анализа таблетированных проб / Z. Mzyk [и др.] // X-Ray Spectrometry. – 2002. – С. 120–125 (на английском языке)
4. Laperche V. и др. Оценка применимости портативного рентгенофлуоресцентного анализа для руд и продуктов их переработки. – 2014. – С. 75–90 (на английском языке)
5. Коррекция матричных эффектов при портативном рентгенофлуоресцентном анализе минерального сырья / J. Lu [и др.] // Applied Sciences. – 2022. – С. 3–10 (на английском языке)
6. Калибровка портативных рентгенофлуоресцентных анализаторов: методика и практические аспекты / A. C. Da Silva [и др.] // Coordination Chemistry Reviews. – 2023. – С. 150–170 (на английском языке)
7. Использование и калибровка портативных рентгенофлуоресцентных анализаторов для геохимических применений // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. – 2017. – С. 25–40 (на английском языке)
8. Влияние размера частиц и влажности на результаты рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) / I. Ben Amar [и др.] // Scientific Reports. – 2022. – С. 5–12 (на английском языке)
9. ИСО 9516-1. Железные руды. Определение содержания элементов методом рентгенофлуоресцентного анализа (на английском языке)
10. Агентство по охране окружающей среды США (EPA). Метод 6200: полевой портативный рентгенофлуоресцентный спектрометрический метод определения элементного состава в почвах и донных отложениях. – Вашингтон, 2007 (на английском языке)
11. ASTM E1621. Стандартное руководство по элементному анализу методом волноводного рентгенофлуоресцентного анализа (на английском языке)

12. Аналитический отчет о внедрении метода экспресс-рентгенофлуоресцентного анализа неустертых проб / Лаборатория рентгеноспектрального анализа Жезказганских обогатительных фабрик № 1, 2 Управления технического и аналитического контроля Департамента технического контроля Дирекции по управлению качеством ТОО «Корпорация Казахмыс». – Жезказган, 2025. – С. 10–15 (на русском языке)

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕРДІҢ ТІЗІМІ

1. Абдрахманова З. Т., Шаханов А. М., Нургалиев Д. К., Ефименко С. А. «Қазақмыс корпорациясы» ЖШС Жезқазған байыту фабрикаларында кендердің заттық құрамын On-line режимінде мониторингтеу // Тау-кен өнеркәсібінің, құрылыс пен энергетиканың әлеуметтік-экономикалық және экологиялық мәселелері : тау-кен өнеркәсібі, құрылыс және энергетика мәселелері бойынша XIII халықаралық конференция материалдары: 2 т. Т. 1. – Тула: ТулМУ баспасы, 2017. – Б. 328–335 (орыс тілінде)
2. Jenkins R. Сандық рентгенфлуоресценттік талдау. – Бока-Ратон: CRC Press, 1995. – Б. 45–60 (ағылшын тілінде)
3. Үлгілердің түйіршік өлшемінің рентгенфлуоресценттік талдау нәтижелеріне әсері / Z. Mzyk [және т. б.] // X-Ray Spectrometry. – 2002. – Б. 120–125 (ағылшын тілінде)
4. Laperche V. және т. б. Кендер мен байыту өнімдерін портативті рентгенфлуоресценттік әдіспен талдаудың қолданылу мүмкіндігін бағалау. – 2014. – Б. 75–90 (ағылшын тілінде)
5. Минералдық шикізатты портативті рентгенфлуоресценттік талдау кезінде матрицалық әсерлерді түзету / J. Lu [және т. б.] // Applied Sciences. – 2022. – Б. 3–10 (ағылшын тілінде)
6. Портативті рентгенфлуоресценттік анализаторларды калибрлеу: әдістеме және тәжірибелік аспектілер / A. C. Da Silva [және т. б.] // Coordination Chemistry Reviews. – 2023. – Б. 150–170 (ағылшын тілінде)
7. Геохимиялық зерттеулерде портативті рентгенфлуоресценттік анализаторларды қолдану және калибрлеу // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. – 2017. – Б. 25–40 (ағылшын тілінде)
8. Бөлшек өлшемі мен ылғалдылықтың XRF талдау нәтижелеріне әсері / I. Ben Amar [және т. б.] // Scientific Reports. – 2022. – Б. 5–12 (ағылшын тілінде)
9. ISO 9516-1. Темір кендері. Рентгенфлуоресценттік әдіспен элементтерді анықтау (ағылшын тілінде)
10. АҚШ Қоршаған ортаны қорғау агенттігі. 6200-әдіс: портативті рентгенфлуоресценттік спектрометрия. – Вашингтон, 2007 (ағылшын тілінде)
11. ASTM E1621. Толқындық рентгенфлуоресценттік талдау бойынша стандартты нұсқаулық (ағылшын тілінде)
12. Истерілмеген үлгілерді экспресс-рентгенфлуоресценттік талдау әдісін енгізу жөніндегі аналитикалық есеп / Жезқазған байыту фабрикалары № 1, 2 рентгеноспектралдық талдау зертханасы, Техникалық және аналитикалық бақылау басқармасы, Сапаны басқару дирекциясы, «Қазақмыс Корпорациясы» ЖШС. – Жезқазған, 2025. – Б. 10–15 (орыс тілінде)

## REFERENCES

1. Abdrakhmanova Z. T., Shakhmanov A. M., Nurgaliev D. K., Efimenko S. A. On-line monitoring veshchestvennogo sostava rud na Zhezkazganskikh obogatitel'nykh fabrikakh TOO «Korporatsiya Kazakhmys» [Online monitoring of the material composition of ores at the Zhezkazgan concentrating plants of Kazakhmys Corporation LLP]. Sotsial'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki : materialy XIII Mezhdunar. konf. po problemam gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki [Socio-economic and environmental problems of the mining industry, construction, and energy: proceedings of the XIII International Conference on Problems of the Mining Industry, Construction, and Energy]. In 2 vols. Vol. 1. – Tula: Izdatel'stvo TulGU, 2017. – P. 328–335 (in Russian)
2. Jenkins R. Quantitative X-Ray Spectrometry. – Boca Raton: CRC Press, 1995. – P. 45–60 (in English)
3. Grain size effect on XRF analysis of pelletized samples / Z. Mzyk et al. // X-Ray Spectrometry. – 2002. – P. 120–125 (in English)
4. Laperche V. et al. Assessment of portable X-ray fluorescence analysis for ores and processing products. – 2014. – P. 75–90 (in English)
5. Matrix effect correction in portable X-ray fluorescence analysis of mineral raw materials / J. Lu et al. // Applied Sciences. – 2022. – P. 3–10 (in English)
6. Portable X-ray fluorescence calibrations: workflow and practical aspects / A. C. Da Silva et al. // Coordination Chemistry Reviews. – 2023. – P. 150–170 (in English)
7. Use and calibration of portable X-ray fluorescence analyzers for geochemical applications // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. – 2017. – P. 25–40 (in English)
8. Particle size and moisture effects on XRF measurements / I. Ben Amar et al. // Scientific Reports. – 2022. – P. 5–12 (in English)
9. ISO 9516-1. Iron ores – Determination of elements by X-ray fluorescence spectrometry (in English)
10. U.S. Environmental Protection Agency. Method 6200: Field Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry. – Washington, 2007 (in English)



11. ASTM E1621. Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry (in English)
12. Analiticheskiy otchet o vnedrenii metoda ekspress-rentgeno fluoressentnogo analiza neistertykh prob [Analytical Report on the Implementation of Express X-Ray Fluorescence Analysis of Non-Ground Samples]. Laboratoriya rentgenospektral'nogo analiza Zhezkazganskikh obogatitel'nykh fabrik № 1, 2 Upravleniya tekhnicheskogo i analiticheskogo kontrolya Departamenta tekhnicheskogo kontrolya Direktsii po upravleniyu kachestvom TOO «Korporatsiya Kazakhmys» [X-Ray Spectral Analysis Laboratory of Zhezkazgan Concentrators No. 1 and 2, Technical and Analytical Control Department, Quality Management Directorate, Kazakhmys Corporation LLP]. – Zhezkazgan, 2025. – P. 10–15 (in Russian)

#### Информация об авторах:

**Шаханов А. М.**, кафедра «Металлургия и обогащение полезных ископаемых» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [amirhan.shahanov@mail.ru](mailto:amirhan.shahanov@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0000-3954-9680>

**Барменишинова М. Б.**, к. т. н., ассоциированный профессор, зав. кафедрой «Металлургия и обогащение полезных ископаемых» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [m.barmenshinova@satbayev.university](mailto:m.barmenshinova@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0003-0534-2387>

**Токенов Н. М.**, зам. директора ТОО «АспапГЕО», магистр естественных наук, механик, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан), [nurik.ng@gmail.com](mailto:nurik.ng@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0005-3379-4075>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Шаханов А. М.**, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасы Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

**Барменишинова М. Б.**, т. ф. к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының меңгерушісі (Алматы қ., Қазақстан)

**Токенов Н. М.**, «АспапГЕО» ЖШС директорының орынбасары, жаратылыстану ғылымдарының магистрі, механик, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан (Алматы қ., Қазақстан)

#### Information about the authors:

**Shakhanov A. M.**, Department of Metallurgy and Mineral Processing at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Barmenshinova M. B.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metallurgy and Mineral Processing at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Tokenov N. M.**, Deputy Director of AspapGEO LLP, Master of Natural Sciences, Mechanical Engineer, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)

## ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА



ПОДПИСКА' 2026

РЕКЛАМНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

СОТРУДНИЧЕСТВО

Узнайте больше  
на сайте:



Instagram:



Консультация  
в WhatsApp:





Код МРНТИ 52.45.19

Л. Б. Сабирова<sup>1</sup>, А. Р. Мамбеталиева<sup>1</sup>, \*С. Қалиаскар<sup>1,2</sup>, Т. Ш. Тусупбекова<sup>2</sup><sup>1</sup>Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),<sup>2</sup>ТОО «КазГидроМедь» (г. Караганда, Казахстан)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЛЕКТИВНОГО РЕАГЕНТА НА ОКИСЛЕННУЮ ЧАСТЬ ЛЕЖАЛЫХ ХВОСТОВ

**Аннотация.** На фоне истощения богатых природных рудных источников и ужесточения экологических требований переработка техногенных отходов, в том числе лежалых хвостов, приобретает все большую значимость. Разработка эффективных методов селективного извлечения меди из окисленных минеральных форм представляет собой важную задачу, поскольку традиционные флотационные схемы обладают низкой эффективностью при переработке окисленных руд. В статье приведены результаты испытаний по применению селективного реагента в сочетании с ксантогенатом (слабым и сильным собирателем) для обогащения окисленной части медных хвостов. Исследования проведены на окисленной части лежалых хвостов с содержанием меди 0,142% со степенью окисленности 65,49%. В ходе экспериментов была определена оптимальная доза реагента и условия флотации, обеспечивающие повышение извлечения меди до 38,56%.

**Ключевые слова:** обогащение полезных ископаемых, флотация, техногенное сырье, лежалые хвосты, окисленные минералы, селективный реагент.

### Қалдықтардың тотыққан бөлігі үшін селективті реагенттің әсерін зерттеу

**Аннотация.** Бай табиғи кен көздерінің сарқылуы және экологиялық талаптардың күшеюі жағдайында техногендік қалдықтарды, оның ішінде ұзақ уақыт жатып қалған қалдықтарды, қайта өңдеу қазіргі таңда өзекті мәселенің бірі. Тотыққан минералды формалардан мысты бөліп алудың тиімді әдістерін әзірлеу маңызды, себебі дәстүрлі флотациялық тәсілдер тотыққан кендерді өңдеуде тиімсіз. Мақалада мыс қалдықтарының тотыққан бөлігіне селективті реагент пен ксантогенаттықолдану бойынша зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеулер мыс мөлшері 0,142%, тотығу дәрежесі 65,49% болатын қалдықтардың сынамасында жүргізілді. Эксперименттер барысында реагенттің оптималды дозасы және флотацияның тиімді шарттары анықталды. Анықталған параметрлер негізінде мысты бөліп алу көрсеткіші 38,56%-ға дейін жоғарылады.

**Түйінді сөздер:** пайдалы қазбаларды байыту, флотация, техногендік шикізат, қалдықтар, тотыққан минералдар, селективті реагент.

### Study of the oxidized portion of aged tailings using a selective reagent

**Abstract.** Against the background of the depletion of high-grade natural ore resources and the tightening of environmental regulations, the processing of technogenic waste, including long-term accumulated tailings, is gaining increasing importance. Developing efficient methods for the selective recovery of copper from oxidized mineral forms remains a critical challenge, as conventional flotation schemes show low efficiency when treating oxidized ores. This paper presents the results of a study on the effect of combining a selective reagent with a xanthate (weak and strong collectors) on the oxidized fraction of copper-bearing tailings. The research was conducted on the oxidized portion of tailings containing 0.142% copper with an oxidation degree of 65.49%. During the experiments, the optimal reagent dosage and flotation conditions were determined, which enabled an increase in copper recovery up to 38.56%.

**Key words:** mineral processing, flotation, technogenic raw materials, stored tailings, oxidized minerals, selective reagent.

### Введение

Современное развитие горно-металлургической промышленности сопровождается необходимостью перехода к устойчивым технологиям переработки минерального и техногенного сырья. В условиях исчерпания высококачественных природных рудных запасов и усиления требований к охране окружающей среды особую актуальность приобретает вторичное использование минеральных ресурсов – в первую очередь лежалых хвостов и других отходов обогащения [1, 2]. Эти техногенные образования содержат значительные количества цветных металлов, в том числе меди, цинка и серебра, ранее не вовлекаемых в переработку по экономическим или технологическим причинам.

По данным современных исследований [3–6], переработка лежалых хвостов позволяет не только компенсировать снижение качества первичных руд, но и решать задачи экологической рекультивации хвостохранилищ. В странах Центральной Азии, включая Казахстан, накоплено более 2 млрд тонн отходов обогащения, из которых лишь малая часть вовлечена в повторную переработку. В этих отходах часто сосредоточены остаточные количества меди (0,1 – 0,3%), что делает их перспективным сырьем для доизвлечения.

Одним из ключевых факторов успешной переработки лежалых хвостов является правильный выбор реагентного режима флотации. Традиционные коллекторы, такие как ксантогенаты, обладают низкой селективностью при флотации окисленных минералов меди (малахит, азурит, хризоколла), поскольку их активность ограничена поверхностными реакциями сульфидирования [7–10]. Вследствие

этого в последние годы активно ведутся исследования по разработке новых селективных реагентов – модифицированных дитиофосфатов, тиокарбаматов, а также фосфорорганических соединений, обеспечивающих устойчивую сорбцию на окисленных поверхностях.

Международные работы [7, 8] демонстрируют, что применение фосфорорганических реагентов, таких как бутиловый дитиофосфат натрия, способствует повышению флотационной активности минералов меди в щелочной среде, что особенно важно для переработки окисленных хвостов и вторичного сырья. Эти реагенты формируют устойчивые комплексы с поверхностными катионами  $\text{Cu}^{2+}$ , улучшая гидрофобизацию частиц их прилипание к пузырькам воздуха.

В Казахстане исследования в данном направлении также активно развиваются. В частности, работа [10] показала эффективность применения комбинированных коллекторов при флотации техногенных хвостов, содержащих окисленные формы меди и барита.

Таким образом, анализ отечественных и зарубежных источников позволяет выделить несколько ключевых тенденций в развитии флотационных технологий: увеличение роли селективных фосфорорганических реагентов при переработке труднообогатимых окисленных руд; комплексное использование дитиофосфатов и ксантогенатов как способ повышения селективности и извлечения меди.

Таким образом, исследования, направленные на переработку техногенных хвостов как стратегического источника цветных металлов и способ снижения экологической нагрузки, приобретают особую значимость.

В связи с этим цель настоящего исследования заключается в изучении эффективности применения бутилового дитиофосфата натрия в сочетании с ксантогенатом для флотации окисленных хвостов, накопленных на предприятиях Казахстана. Работа направлена на разработку рационального реагентного режима, обеспечивающего повышение извлечения меди и уменьшение потерь в хвостах, что соответствует современным принципам устойчивого развития и ресурсосбережения.

### Материалы и методы

Объектом исследования являлась проба окисленной части медных лежалых хвостов. Элементный состав определен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Минералогический состав изучен в отраженном свете на полированных аншлифах с использованием микроскопа OLYMPUS BX-53, видеокамеры SIMAGIS XS-3CU и программного обеспечения Mineral C7 компании SIAMS. В таблице 1 приведены результаты химического анализа исходной пробы.

Таблица 1

Химический состав исходной руды

Кесте 1

Бастапқы кеннің химиялық құрамы

Table 1

Chemical composition of the original ore

| Компонент           | Cu   | Ag,<br>г/т | Fe   | S    | Zn   | Pb   | Al   | Si    |
|---------------------|------|------------|------|------|------|------|------|-------|
| Массовая<br>доля, % | 0,14 | 1,56       | 2,09 | 0,19 | 0,13 | 0,06 | 5,30 | 28,23 |

По результатам химического фазового анализа установлено, что медь присутствует преимущественно в окисленной форме – 65% от общего содержания. На долю сульфидных минералов приходится 35%. К сульфидным формам относятся халькопирит, ковеллин и борнит, характерные для глубинных и слабоокисленных зон месторождений. Окисленные формы представлены малахитом, азуридом и хризокколой, формирующимися в зоне окисления под воздействием кислорода и влаги (рис. 1).

Преобладание окисленных минералов меди указывает на развитие зоны вторичного обогащения и определяется необходимостью применения селективных реагентов при флотации.

Флотационные исследования проводились на лабораторных пневмомеханических флотационных машинах типа Вэктис (объем камеры – 3 л) и механических флотационных машинах типа Механобр (объем 0,5–1,0 л). Продолжительность флотации составляла 10 минут, массовая доля твердого в пульпе – 30%, содержание класса -0,071 мм – 80%, механоактивации пульпы – 10 минут. Основная флотация проводилась при pH = 9,0 и окислительно-восстановительном потенциале (ОВП) от -180 до -220 мВ. Контрольная флотация выполнялась при тех же условиях: pH = 9,0 и ОВП = -180 ÷ -220 мВ. Перечень использованных реагентов, их функциональное назначение и нормы расхода приведены в таблице 2.

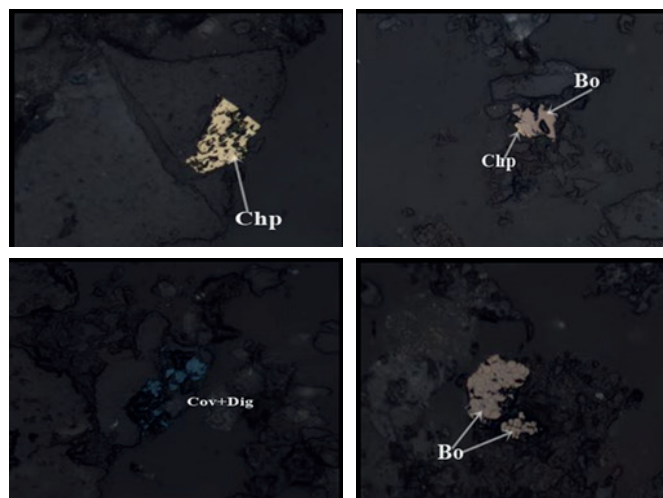


Рис. 1. Выделения медных минералов. Увел. 100.

Chp – халькопирит, Bo – борнит, Cov – ковеллин, Dig – дигенит.

Сурет 1. Мыс минералдарының бөлінуі. 100 ұлғайту.

hp – халькопирит, Bo – борнит, Cov – ковеллин, Dig – дигенит.

Figure 1. Isolation of copper minerals. Magnification of 100.

Chp – chalcopyrite, Bo – bornite, Cov – covellite, Dig – digenite.

В ходе экспериментов контролировались параметры pH и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) с использованием электродов HANNA HI 1230 и HI 3131. Эти параметры подбирались таким образом, чтобы обеспечить стабильную щелочную среду и оптимальные условия активации окисленных минералов меди при взаимодействии с реагентами-собирающими.

Соотношение селективного собирателя к бутилксантогенат калия составляло 1:4, что обеспечивало оптимальное сочетание избирательности и активности при флотации окисленных хвостов.

### Результаты и обсуждение

С целью повышения извлечения меди в концентрат проведены лабораторные исследования по подбору оптимального селективного реагента при флотации окисленных хвостов. Принципиальная технологическая схема проведения лабораторного эксперимента приведена на рис. 2.

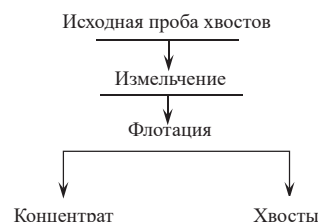


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема проведения лабораторного эксперимента.

Сурет 2. Зертханалық эксперименттің принципті технологиялық сызбасы.

Figure 2. The basic technological scheme of the laboratory experiment.

Таблица 2

Характеристика, назначение и расход примененных флотационных реагентов

Кесте 2

Қолданылған флотациялық реагенттердің сипаттамасы, мақсаты және мөлшері

Table 2

Characteristics, purpose, and consumption of the flotation reagents used

| Реагент                            | Химическая формула / тип                                                  | Назначение в процессе флотации                                                                                 | Расход, г/т                     |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Бутилксантогенат калия (БКК)       | $ROCS_2K$                                                                 | Основной коллектор для сульфидных минералов меди                                                               | 32 (осн. фл.) / 24 (контр. фл.) |
| Бутиловый дитиофосфат натрия (БДН) | $Na[S_2P(OC_4H_9)_2]$                                                     | Селективный серосодержащий собиратель для <i>Cu</i> и <i>Pb</i> ; повышает извлечение и селективность процесса | 8 (осн. фл.) / 6 (контр. фл.)   |
| Модифицированный тиофосфат (МТФ)   | $(RO)_2P(S)-SR'$ (смесь диалкилдитиофосфатов и тиоспиртов)                | Смесь дитиофосфатов и алифатических спиртов; повышает гидрофобизацию и устойчивость пены                       | 8 (осн. фл.) / 6 (контр. фл.)   |
| Бутилтиофосфат (БТФ)               | $(C_4H_9O)_2P(S)SH$                                                       | Комбинированный коллектор; улучшает извлечение меди из смешанных руд                                           | 8 (осн. фл.) / 6 (контр. фл.)   |
| Модифицированный ксантогенат (МКХ) | $C_4H_9OCS_2Na + Na[S_2P(OC_4H_9)_2]$ (смесь ксантогената и дитиофосфата) | Смесь ксантогената и дитиофосфата; универсальный собиратель для окисленных и сульфидных минералов              | 8 (осн. фл.) / 6 (контр. фл.)   |

Результаты проведенных лабораторных опытов приведены на рис. 3.

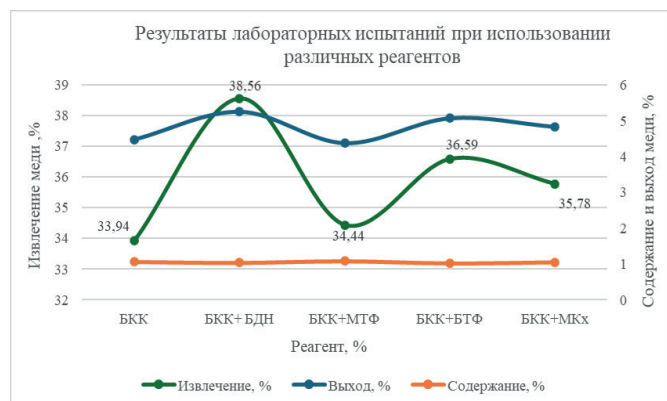


Рис. 3. Результаты тестов по подбору селективного реагента.

Сурет 3. Селективті реагентті таңдау бойынша сынақ нәтижелері.

Figure 3. Results of selective reagent selection tests.

Из результатов проведенных лабораторных экспериментов (рис. 3) установлено, что при применении сочетания реагентов БКК+БДН (соотношение селективного собирателя к бутилксантогенат калия составляло 1:4) извлечение меди в концентрат повышается на 4,62% относительно базового эксперимента (БКК-100%) достигая **38,56%**, что подтверждает эффективность фосфорорганического реагента при флотации окисленных минералов меди.

Для подтверждения полученных результатов и выбора наиболее эффективного реагента для извлечения полезных компонентов, выполнен расчет эффективности обогащения по методике Ханкок-Луйкена и коэффициент технологической эффективности (интегральный показатель). Результаты приведены на рис. 4.

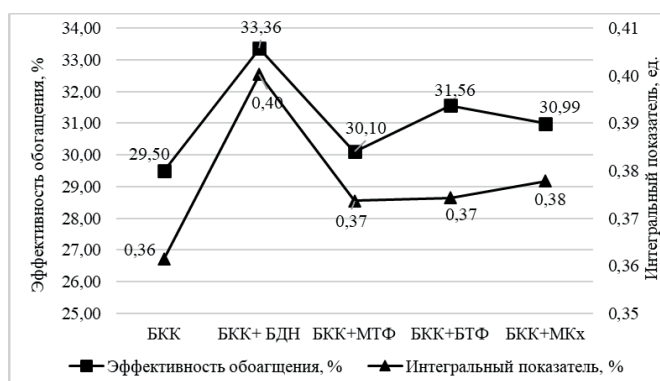


Рис. 4. Графики зависимости показателей обогащения от селективных реагентов.

Сурет 4. Селективті реагенттердің түріне байланысты байыту көрсеткіштерінің тәуелділік графиктері.

Figure 4. Graphs showing the dependence of beneficiation indicators on the type of selective reagents.

Расчеты по методике Ханкок-Луйкена и интегральному коэффициенту технологической эффективности показали, что данная комбинация реагентов обеспечивает максимальную суммарную эффективность процесса – 33,36% и 0,40 соответственно, при сохранении качества концентрата.

## Закключение

Таким образом, результаты демонстрируют, что введение селективного реагента дитиофосфата натрия бутилового в сочетании бутиловым ксантогенатом позволили повысить качественно-количественные показатели по меди. Использование данной комбинации реагентов позволяет повысить извлечение меди до 38,56% и снизить потери металла в хвостах.

Данная работа представляет собой начальный этап исследования, направленный на разработку комплексной технологии переработки лежалых хвостов. В дальнейшем планируется проведение дополнительных лабораторных



испытаний с применением ультратонкого измельчения, поскольку значительная часть потерь меди сосредоточена в тонких классах. Реализация этого подхода позволит повысить степень раскрытия минералов и достичь более полного извлечения ценных компонентов.

#### Благодарность

Исследование проведено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках грантового проекта № AP26198169.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хвосты флотации золото–медных рудников (Бор, Сербия) как источник критических элементов / V. Trifunović [и др.] // Minerals. – 2024. – № 14 (9). – С. 1–17 (на английском языке)
2. Байбатша А., Бекботаева А., Кембаев М. [и др.] Минералогия и переработка накопленных хвостов обогатительных фабрик Казахстана в техногенные руды // 23-я Международная многопрофильная научная геоконференция. – 2023. – С. 1–8 (на английском языке)
3. Извлечение меди из лежалых хвостов обогащения / А. Р. Мамбеталиева [и др.] // Наука и техника Казахстана. – 2024. – № 3. – С. 213–223 (на русском языке)
4. Разработка технологии переработки тонко вкрапленных упорных лежалых хвостов обогащения медно-цинковых руд / О. А. Дрючкова [и др.] // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2020. – С. 22–27 (на русском языке)
5. Россамахина Н. С. Способы переработки поступающих и лежалых хвостов медно-цинковой обогатительной фабрики // Современные проблемы экологии и природопользования. – Пенза, 2023. – С. 93–97 (на русском языке)
6. Исследование по отделению малахита от кварца с помощью S-карбоксиметил-О, О'-дибутилдитиофосфатного хелатирующего собирателя и его понимание механизма флотации / X. Zhang [и др.] // Powder Technology. – 2020. – С. 374–406 (на английском языке)
7. Особенности флотации малахита с использованием гидрофобных наночастиц талька в качестве собирателей / J. Choi [и др.] // Minerals. – 2020. – № 10 (9). – С. 1–9 (на английском языке)
8. Эффективность флотации и механизм адсорбции нового собирателя минералов оксида меди / В. Ни [и др.] // Minerals. – 2022. – № 12 (4). – С. 1–14 (на английском языке)
9. Влияние ультратонкого измельчения на технологические показатели обогащения отвальных хвостов / А. Р. Мамбеталиева [и др.] // Вестник КазУТБ. – 2024. – С. 466–476 (на русском языке)
10. Коллективная флотация обескремненного техногенного баритового сырья / К. С. Туребекова [и др.] // Горный журнал Казахстана. – 2022. – № 12. – С. 46–50 (на русском языке)

#### ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Алтын-мыс кеніштері флотациясының қалдықтары (бор, Сербия) сыни элементтердің көзі ретінде / V. Trifunović [және т. б.] // Minerals. – 2024. – № 14 (9). – Б. 1–17 (ағылшын тілінде)
2. Байбатша Ә., Бекботаева А., Кембаев М. және т. б. Минералогия және Қазақстанның байыту фабрикаларының жинақталған қалдықтарын техногендік кендерге қайта өңдеу // 23-ші Халықаралық көпсалалы ғылыми геоконференция. – 2023. – Б. 1–8 (ағылшын тілінде)
3. Байыту қалдықтарынан мысты бөліп алу / А. Р. Мамбеталиева [және т. б.] // Қазақстанның ғылымы мен техникасы. – 2024. – № 3. – Б. 213–223 (орыс тілінде)
4. Мыс-мырыш кендерін байытудың жіңішке қиылысқан қыңыр құйрықтарын өңдеу технологиясын әзірлеу / О. А. Дрючкова [және т. б.] // Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университетінің хабаршысы. – 2020. – Б. 22–27 (орыс тілінде)
5. Россамахина Н. С. Мыс-мырыш байыту фабрикасының кіретін және жиналған қалдықтарын өңдеу әдістері // Экология мен табиғатты пайдаланудың заманауи мәселелері. – Пенза, 2023. – Б. 93–97 (орыс тілінде)
6. Малахитті кварцтан бөлу туралы зерттеу S-карбоксиметил-О, О'-дибутилдитиофосфатты хелаттау жинағышы және оның флотация механизмін түсінуі / X. Zhang [және т. б.] // Powder Technology. – 2020. – Б. 374–406 (ағылшын тілінде)
7. Тальк гидрофобты нанобөлшектерін жемішөп ретінде қолдана отырып, малахит флотациясының ерекшеліктері / J. Choi [және т. б.] // Minerals. – 2020. – № 10 (9). – Б. 1–9 (ағылшын тілінде)
8. Флотацияның тиімділігі және мыс оксидінің жаңа минералды жинаушысының адсорбция механизмі / В. Ни [және т. б.] // Minerals. – 2022. – № 12 (4). – Б. 1–14 (ағылшын тілінде)
9. Ультра ұсақ ұнтақтаудың үйінді қалдықтарды байытудың технологиялық көрсеткіштеріне әсері / А. Р. Мамбеталиева [және т. б.] // ҚазУТБ хабаршысы. – 2024. – Б. 466–476 (орыс тілінде)
10. Кремнийсіз техногендік барит шикізатының ұжымдық флотациясы / К. С. Туребекова [және т. б.] // Қазақстанның тау-кен журналы. – 2022. – № 12. – Б. 46–50 (орыс тілінде)

## REFERENCES

1. *Flotation Tailings from Cu-Au Mining (Bor, Serbia) as a Source of Critical Elements* / V. Trifunović et al. // *Minerals*. – 2024. – No. 14 (9). – P. 1–14 (in English)
2. *Baibatsha A., Bekbotaeva A., Kembraev M. et al. Mineralogy and processing of accumulated tailings from concentrating mills of Kazakhstan into technogenic ores* // *23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. – 2023. – P. 1–8 (in English)
3. *Izlyechenie medi iz lezhalykh khvostov obogashcheniya* [Extraction of copper from story enrichment tails] A. R. Mambetalieva et al. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and Technology of Kazakhstan]. – 2024. – No. 3. – P. 213–223 (in Russian)
4. *Razrabotka tekhnologii pererabotki tonko vkraplennykh upornykh lezhalykh khvostov obogashcheniya medno-tsinkovykh rud* [Development of a processing technology for fine-disseminated refractory old tailings from copper–zinc ore beneficiation] O. A. Dryuchkova et al. *Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva* [Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University]. – 2020. – P. 22–27 (in Russian)
5. *Rossamakhina N. S. Sposoby pererabotki postupayushchikh i lezhalykh khvostov medno-tsinkovoi obogatitel'noi fabriki* [Methods of processing incoming and stale tailings of a copper-zinc processing plant]. *Sovremennye problemy ekologii i prirodopol'zovaniya* [Modern Problems of Ecology and Nature Management]. – Penza, 2023. – P. 93–97 (in Russian)
6. *Research on the separation of malachite from quartz with S-carboxymethyl-O,O'-dibutyl dithiophosphate chelating collector and its insights into flotation mechanism* / X. Zhang et al. // *Powder Technology*. – 2020. – P. 374–406 (in English)
7. *Flotation Behavior of Malachite Using Hydrophobic Talc Nanoparticles as Collectors* / J. Choi et al. // *Minerals*. – 2020. – No. 10 (9). – P. 1–9 (in English)
8. *Flotation Performance and Adsorption Mechanism of a Novel Collector for Copper Oxide Minerals* / B. Hu et al. // *Minerals*. – 2022. – No. 12 (4). – P. 1–14 (in English)
9. *Vliyanie ul'tratonkogo izmel'cheniya na tekhnologicheskie pokazateli obogashcheniya otval'nykh khvostov* [The effect of ultrafine grinding on the technological parameters of the enrichment of dump tailings] A. R. Mambetalieva et al. *Vestnik KazUTB* [Bulletin of the Kazakh University of Technology and Business]. – 2024. – P. 466–476 (in Russian)
10. *Kollektivnaya flotatsiya obeskremlennogo tekhnogennogo baritovogo syr'ya* [Collective flotation of desircified technogenic barite raw material] K. S. Turebekova et al. *Gornyi zhurnal Kazakhstana* [Mining Journal of Kazakhstan]. – 2022. – No. 12. – P. 46–50 (in Russian)

### Сведения об авторах:

**Сабирова Л. Б.**, к. т. н., ассоциированный профессор кафедры «Технологические машины и газотурбинные установки» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [lsabirova@satbayev.university](mailto:lsabirova@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0001-8231-9944>

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

**Қалиасқар С.**, магистр техн. наук, инженер-исследователь ТОО «ҚазГидроМедь» (г. Караганда, Казахстан), [sulya-95@mail.ru](mailto:sulya-95@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0007-0568-3698>

**Тусупбекова Т. Ш.**, начальник лаборатории обогащения, ТОО «ҚазГидроМедь» (г. Караганда, Казахстан), [tansholpan\\_87.09@mail.ru](mailto:tansholpan_87.09@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-2940-8715>

### Авторлар туралы мәліметтер:

**Сабирова Л. Б.**, т. ғ. к., Satbayev University «Технологиялық машиналар және газ-турбиналық кондырғылар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы қ., Қазақстан)

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

**Қалиасқар С.**, техника ғылымдарының магистрі, «ҚазГидроМедь» ЖШС инженер-зерттеушісі (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Түсіпбекова Т. Ш.**, «ҚазГидроМедь» ЖШС байыту зертханасының басшысы (Қарағанды қ., Қазақстан)

### Information about the authors:

**Sabirova L. B.**, Ph.D, Associate Professor of the Department of Technological Machines and Gas Turbine Units. Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

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

**Kaliaskar S.**, Master of Technical Sciences, Research Engineer at Kazhydromed LLP (Karaganda, Kazakhstan)

**Tussupbekova T. Sh.**, Chief of Mineral Processing Laboratory at Kazhydromed LLP (Karaganda, Kazakhstan)

Код МРНТИ 52.47.15

Г. С. Бекбаева, Е. Т. Боташев, Г. М. Эфендиев,\*М. К. Жантасов  
 М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан)

## ТҰРАҚСЫЗ САЗДЫ ТАУ ЖЫНЫСТАРЫНДА ҰҢҒЫМАЛАР САЛУҒА АРНАЛҒАН ИНГИБИРЛЕУШІ БҰРҒЫЛАУ ЕРІТІНДІЛЕРІ

**Аннотация.** Мақалада сазды тау жыныстарын бұрғылау кезінде туындайтын асқынулардың себептері және бұрғылау ерітінділерінің физико-химиялық қасиеттерінің тау-геологиялық жағдайларға сәйкестігі қарастырылады. Ұңғыма қабырғаларының тұрақсыздануы көбінесе ерітінді фильтраты мен жыныс арасындағы белсенді өзара әрекеттесумен байланысты екені көрсетіледі. Сазды жыныстарды тұрақтандыру үшін қолданылатын ингибируші реагенттердің негізгі түрлері мен әсер ету механизмдері талданады. Тұздар, полимерлер, полиолдар, полисахаридтер және силикатты жүйелердің артықшылықтары мен шектеулері салыстырмалы түрде сипатталады. Техникалық талаптарға сәйкес бұрғылау ерітіндісін дұрыс таңдау ұңғыманы табысты бұрғылаудың негізгі шарты табылады. Зерттеу нәтижелері геологиялық-техникалық талаптарға сәйкес келетін, экономикалық тұрғыдан тиімді және технологиялық сенімді бұрғылау ерітінділерін әзірлеудің маңыздылығын дәлелдейді.

**Түйінді сөздер:** бұрғылау ерітінділері, сазды жыныстар, саздарды ингибиру, ұңғыма қабырғаларының тұрақтылығы, осмотық қысым, полимерлік ингибиторлар, калий хлориді (KCl), силикатты бұрғылау ерітінділері.

### Inhibitive drilling fluids for well construction in unstable clay formations

**Abstract.** The article discusses the causes of complications arising when drilling clay rocks and the correspondence of the physico-chemical properties of drilling fluids to Mountain and geological conditions. It is shown that the destabilization of the well Walls is often associated with an active interaction between the solution filtrate and the rock. The main types and mechanisms of action of inhibitory reagents used to stabilize clay rocks are analyzed. The advantages and limitations of salts, polymers, polyols, polysaccharides, and silicate systems are relatively described. The correct choice of drilling mud in accordance with technical requirements is the main condition for successful drilling of a well. The results of the study prove the importance of developing drilling fluids that meet geological and technical requirements, are economically effective and technologically reliable.

**Key words:** drilling fluids, clay formations, clay inhibition, borehole wall stability, osmotic pressure, polymer inhibitors, potassium chloride (KCl), silicate drilling fluids.

### Ингибирующие буровые растворы для строительства скважин в неустойчивых глинистых породах

**Аннотация.** В статье рассмотрены причины осложнений, возникающих при бурении глинистых пород, а также соответствие физико-химических свойств буровых растворов горно-геологическим условиям. Показано, что неустойчивость стенок скважины в большинстве случаев связана с активным взаимодействием фильтрата бурового раствора с породой. Проанализированы основные виды ингибирующих реагентов, применяемых для стабилизации глинистых пород, и механизмы их действия. Проведено сравнительное описание преимуществ и ограничений солей, полимеров, полиолов, полисахаридов и силикатных систем. Обосновано, что правильный выбор бурового раствора в соответствии с техническими требованиями является условием успешного бурения скважины. Результаты исследования подтверждают важность разработки экономически эффективных и технологически надежных буровых растворов, соответствующих геолого-техническим требованиям.

**Ключевые слова:** буровые растворы, глинистые породы, ингибирование глин, устойчивость стенок скважины, осмотическое давление, полимерные ингибиторы, хлорид калия (KCl), силикатные буровые раствор.

### Кіріспе

Ұңғымаларды бұрғылау кезінде нақты кен орнының тау-геологиялық жағдайларына сәйкес келмейтін бұрғылау ерітіндісін қолдануға байланысты көптеген асқынулар туындайды. Мұндай асқынулардың негізгі себебі көбінесе ерітіндінің физико-химиялық параметрлерінің сәйкессіздігі болып табылады.

Сазды тау жыныстарын бұрғылау барысында мұндай сипаттағы қиындықтар жиі кездеседі, себебі ұңғыма қабырғаларын құрайтын жыныстар мен бұрғылау ерітіндісінің фильтраты арасында белсенді өзара әрекеттесу жүреді.

Мүмкін болатын асқынулардың алдын алу немесе кем дегенде олардың пайда болуын бақылау үшін бұрғылау ерітіндісі әртүрлі әсер ететін реагенттермен өңделеді. Бұл реагенттер ерітіндінің су фазасының жыныстардың механикалық беріктігі мен тұрақтылығына тигізетін әсерін төмендетуге қабілетті.

Геологиялық-техникалық талаптарға сай келетін бұрғылау ерітінділері құрамдарын әзірлеу және қолдану – ұңғыманы салу (бұрғылау) табыстылығының негізгі параметрлерінің бірі болып табылады. Жаңа бұрғылау ерітінділері құрамдарын әзірлеу кезінде ерітіндіге қосылатын қоспалар санын барынша азайтуға, бұрғылау жұмыстарының өнімсіз уақытын қысқартуға басымдық беріледі. Бұл өз кезегінде ерітіндіні дайындауды және оның параметрлерін бақылауды жеңілдетеді, сондай-ақ экономикалық тиімділікті қамтамасыз етеді. Сонымен қатар құрамды әзірлеу әртүрлі ингибируші механизмдерін қолдану арқылы жүргізіледі, өйткені

пластикалы және морт сазды жыныстар кезектесіп кездесетін жағдайларда әр интервал үшін бұрғылау ерітіндісінің рецептурасын өзгерту тиімсіз [1, 2, 3, 4].

### Материалдар мен әдістер

Бұрғылау ерітінділерін дайындау барысында сазды жыныстарға сәйкес келетін реагенттер таңдалды. Ерітінділердің негізгі компоненттері ретінде органикалық және бейорганикалық тұздар (*KCl*, *NaCl*, *CaCl<sub>2</sub>*, *MgCl<sub>2</sub>*), полимерлер (РНРА, жоғары және төмен молекулалық массалы полимерлер), полиолдар (полиэтиленгликоль, полиглицерин), полисахаридтер және силикаттар қолданылады.

**Тұз ерітінділері:** калий хлориді (*KCl*), натрий хлориді (*NaCl*) және кальций, магний, мырыш хлоридтері мен бромидтерінің концентрлі ерітінділері дайындалады. Ерітінділердің концентрациялары 1–5% аралығында, қажет болған жағдайда жоғары осмотық қысымды қамтамасыз ету үшін түзетіледі.

**Полимерлік ерітінділер:** төмен және жоғары молекулалық полимерлерді бөлек немесе комбинацияда қолданылды. Ішінара гидролизделген полиакриламид (РНРА) ерітіндіге қосылды, ол жыныс бетіне адсорбцияланып, бірнеше байланыс нүктесін қалыптастырады.

**Полиолдар мен полисахаридтер:** полиэтиленгликольдер мен полиглицериндер төмен молекулалық және жоғары молекулалық түрлерде дайындалады. Полисахаридтер ерітіндінің тұтқырлығын арттыру және сазды жыныстарға фильтраттың енуін төмендету мақсатында қолданылады.



**Силикатты ерітінділер:** натрий силикаты су ерітіндісінде ерітіліп,  $Ca^{2+}$  және  $Mg^{2+}$  иондарымен реакцияға түсетін, қабатты нығайтуға және жарықтарды бөгейтін қасиетке ие болады.

Барлық ерітінділер зертханалық стационарлық құрылғыларда араластырылды, температурасы 20–25 °C және тұрақты рН мәнінде дайындалады.

Полимерлер мен полиолдарды қосқанда, олар ерітіндіде біркелкі таралғанына көз жеткізу үшін механикалық араластырғыш қолданылады.

Силикатты ерітінділерді дайындау кезінде ерітінді рН-ін бақылау жүргізілді (рН ≈ 9) және қажет болған жағдайда рН түзеткіштер қолданылады.

Ерітінділердің тұтқырлығы, фильтрация қабілеті және осмостық қысым сияқты физико-химиялық қасиеттері стандартталған әдістермен анықталады.

Ерітінділерді қолдану алдында олар 24 сағат бойы тұрып, тұрақтылығын тексеру жүргізіледі.

## Нәтижелер және талқылау

Сазды жыныстардың бұзылуын тежеуде және оларды тұрақтандыруда ең тиімді реагенттердің сипаттамаларын толығырақ қарастырайық.

Калий хлориді (**KCl**) ең тиімді ингибиторлардың бірі ретінде кеңінен белгілі. Ол негізінен литогенездің бастапқы сатысындағы жоғары белсенді саздарда ісіну қысымын төмендету және осмостық процестерді реттеу үшін қолданылады.

Калий хлоридін қолдануды шектейтін негізгі фактор – бұрғылау ерітіндісінің фильтратының жыныс құрылымына енуін болдырмау қабілетінің болмауы. Тіпті **KCl** жоғары концентрацияда болғанның өзінде ерітіндінің тұтқырлығы төмен күйінде қалады. Сондықтан ол кеуек кеңістіктерді толтыра алмайды және сазды жыныстың өткізгіштігіне айтарлықтай әсер етпейді. Сонымен қатар, калий хлориді негізіндегі бұрғылау ерітінділері литогенездің кеш сатысындағы морт сазды жыныстарды бұрғылау жағдайларына сәйкес келмейді. Себебі мұндай жыныстарда сіңірілген судың көлемі аз болғанымен, ісіну қысымы жоғары дамиды (сурет 1) [4, 5].

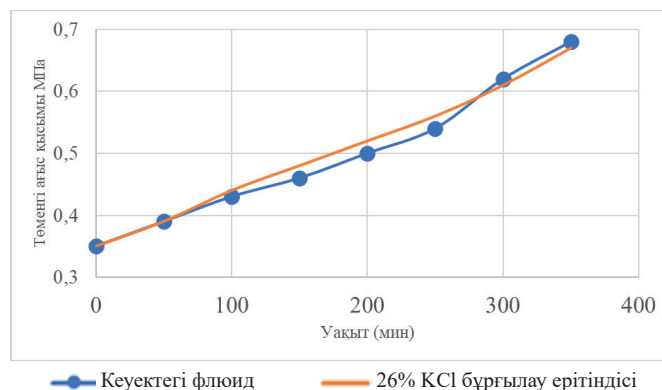
Натрий хлориді (**NaCl**) ерітіндісі ұқсас концентрацияларда калий хлоридімен салыстырғанда ерітіндінің жоғары тұтқырлығын және судың белсенділігінің төмен болуын қамтамасыз етеді, бұл осмостық қысымның артуына ықпал етеді.

Осылайша, натрий хлориді ерітіндісі бұрғылау ерітіндісі фильтратының жынысқа ену қарқындылығын төмендету мақсатында қолдануға ұсынылады.

Алайда, натрий хлориді ерітіндісі өздігінен ерітіндінің оңтайлы параметрлерін қамтамасыз ете алмайды. **NaCl**-ды силикаттар, полиолдар, метилглюкозидтер сияқты реагенттермен бірге қолдану анағұрлым тиімді, өйткені олар сазды жыныстарды дегидратациялау мақсатында осмостық градиентті арттыруға қабілетті.

Кальций, магний, мырыш хлоридтері мен бромидтерінің концентрлі ерітінділері гидравликалық ағынды төмендету және жоғары осмостық қысымды қамтамасыз ету қабілетінің арқасында сазды жыныстар үшін ингибирлеуші реагенттер ретінде қолданылуы мүмкін. Екі валентті ион-

дар диффузия арқылы жынысқа еніп, ерітіндіден иондардың тасымалдануын қамтамасыз етеді.



**Сурет 1. Қаныққан калий хлориді негізіндегі бұрғылау ерітіндісін қолдану кезінде ұңғыма маңы кеңістігіндегі қысымның таралуы.**

**Figure 1. Pressure distribution in the near-wellbore region during the use of a drilling fluid based on saturated potassium chloride.**

**Рис. 1. Распределение давления в приствольной зоне при использовании бурового раствора на основе насыщенного хлорида калия.**

Алайда иондар неғұрлым күшті ингибирлеуші иондармен (мысалы,  $K^+$ ) алмасқан кезде ісіну қысымының арту қаупі бар. Бұл ұңғыма қабырғаларын құрайтын жыныстардың тұрақсыздығына әкелуі мүмкін.

Мұндай ерітінділерді қолдану барысында кеуектік қысым көрсеткіштеріне оң әсер мен ісіну қысымының ықтимал тұрақсыздандырушы әсері арасындағы тепе-теңдікті мұқият сақтау қажет.

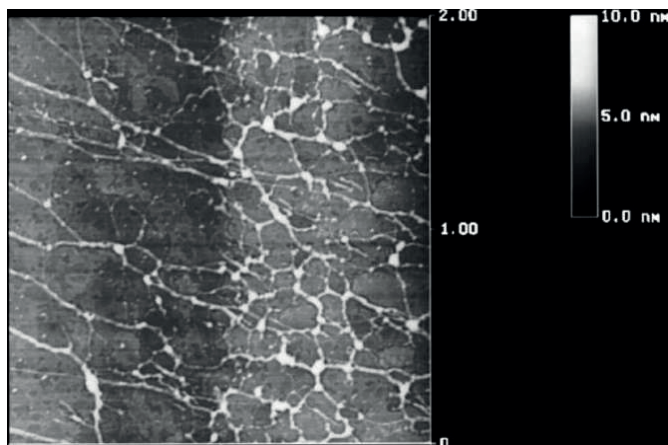
Сонымен қатар, калий хлоридіне балама ретінде кейбір полимерлік композициялар да қолданылады. Мұндай композициялардың артықшылығы – олардың функционалды топтары сазды минералдардың беттеріне адсорбцияланып, бірнеше байланыс нүктелерін құра алады. Бұл қасиет полимерлерді  $K^+$  иондарынан гөрі алмастырылуға төзімді етеді.

Полимерлік композициялар ісінуді тежеуде тиімді болып саналады, әсіресе төмен молекулалық массасы барлар. Сол себепті олар сазды жыныстың құрылымына ене алады.

Жоғары молекулалық полимерлер көлемдері үлкен болғандықтан кеуек кеңістіктерге ене алмайды, бірақ олар қорғаныш пленка түзеді және сазды жынысты белгілі бір дәрежеде бекіте алады.

Мысалы, ішінара гидролизделген полиакриламид (РНРА) белгілі: ол жынысқа адсорбцияланып, бірнеше байланыс нүктесін қалыптастырады және осылайша ұңғыма қабырғаларын нығайтуға қабілетті (сурет 2).

Алайда төмен молекулалық полимерлер жыныс құрылымына ене алғандықтан, кеуектік қысымды реттеуге қабілетті. Осы себепті сазды жыныстарды тиімді тұрақтандыру үшін төмен және жоғары молекулалық реагенттердің комбинациясын қолдану ұсынылады [6–9].



**Сурет 2. Кальцит бетінде РНРА молекулаларының таралуын электрондық микроскоппен зерттеу.**

**Figure 2. Study of the distribution of PHPA molecules on the calcite surface using an electron microscope.**

**Рис. 2. Исследование распределения молекул РНРА на поверхности кальцита с помощью электронного микроскопа.**

Асфальтен, гильсонит және графен әртүрлі мақсаттарда қолданылады, соның ішінде сазды жыныстарды тұрақтандыру және ингибирлеу де бар. Аталған типтегі қоспалар ісіну қысымына әсер етпейді. Сонымен қатар, олардың молекулаларының үлкен өлшемдері жынысқа енуге және кеуек кеңістікті бөгеу қалуға мүмкіндік бермейді, сондықтан бұрғылау ерітіндісі фильтратының жынысқа ену деңгейі іс жүзінде төмендемейді.

Жоғары молекулалық полимерлер сияқты, бұл реагенттер де жыныс бетінде әрекет етеді және ұңғыма қабырғаларында пайда болатын микротрещиналарды қалпына келтіруге мүмкіндік береді.

Сахаридтер мен полисахаридтер – бұрғылау ерітіндісінің тұтқырлығын арттыру үшін кеңінен қолданылатын қоспалар. Қажетті концентрацияларда олар бұрғылау ерітіндісі фильтратының жынысқа ену қарқындылығын төмендетуге мүмкіндік береді. Алайда, мұндай бұрғылау ерітінділері биологиялық организмдердің әсерінен ыдырап кетуге бейім, сондықтан оларды бактерицидтермен бірге қолдану қажет.

Полисахаридтер сазды жыныстардың бұзылуын ингибирлеу және ұңғыма саңылауын тұрақтандыру үшін қолдануға ұсынылады. Бұл ұңғымада қысылып қалу қаупін азайтуға және бұрғылау механикалық жылдамдығын арттыруға көмектеседі.

Қолдану шектеуі – қажетті әсерге жету үшін жоғары концентрацияларды (30%-дан жоғары) қажет етуі, бұл бұрғылау ерітіндісінің құнын арттырады және жуу сұйықтығының тұтқырлығын жоғарылатады. Полиолдар (полиэтиленгликольдер және полиглицериндер) сазды жыныстардың бұзылуын ингибирлеуші ретінде кеңінен қолданылды. Олардың бұрғылау ерітіндісін қалыңдату қабілеті фильтратының жынысқа ену мүмкіндігін төмендетеді.

Саздарды ингибирлеу және тұрақтандыру механизмі полимерлерге ұқсас: төмен молекулалық полигликольдер

мен полиглицериндер жыныс құрылымына еніп, әсер етеді, ал жоғары молекулалық түрлері ұңғыма қабырғаларын құрайтын жыныстар бетінде қорғаныш қабатын қалыптастырады [10–12].

Әртүрлі полиолдардың  $KCl$ ,  $NaCl$ ,  $CaCl_2$  сияқты тұздармен комбинациясы сазды жыныстарды тұрақтандыруда синергетикалық әсер көрсетеді.

Бұл әсер сазды жыныс – бұрғылау ерітіндісі шекарасында мембраналық өткізгіштіктің артуы арқылы көрінеді, нәтижесінде осмостық қысым өседі және ерітіндінің су фазасының белсенділігі төмендейді.

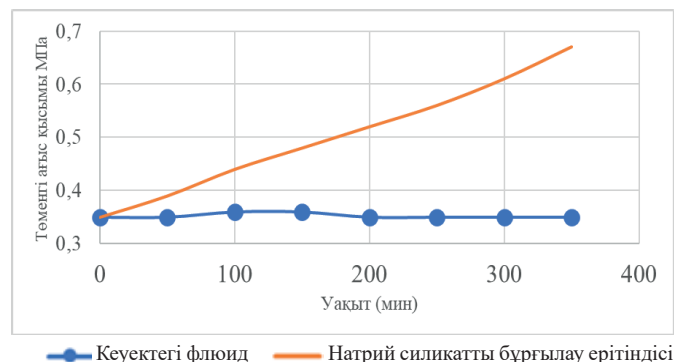
Силикатты бұрғылау ерітінділері өз қасиеттері мен төмен құнының арқасында сазды жыныстарды тұрақтандыруда қолданылады.

Су ерітіндісіндегі силикаттар сазды жыныс құрылымына еніп, көпвалентті иондармен ( $Ca^{2+}$  және  $Mg^{2+}$ ) реакцияға түсіп, ерімейтін шөгінді түзеді.

Судағы натрий силикаты гидролиз бен гидролиз өнімдерінің полимеризациясы нәтижесінде иондар, коллоидтар және молекулалар түрінде болады.

Бейорганикалық коллоидтық заттар бетінде сутегі байланысы арқылы адсорбцияланып, қатты пленка түзеді. Бұл пленка бұрғылау ерітіндісі фильтратының енуіне және сланецтің ісінуіне кедергі келтіреді, сондай-ақ белгілі бір дәрежеде ұсақ жыныстарды нығайтады.

Сонымен қатар, сазды қабатқа енген силикат натриймен әрекеттескенде, натрий силикаты пайда болып, қабаттағы жарықтарды бітейді. Бұл ұңғыма саңылаулары айналасындағы қысымды төмендетуге және ұңғыма қабырғаларын нығайтуға мүмкіндік береді (сурет 3).



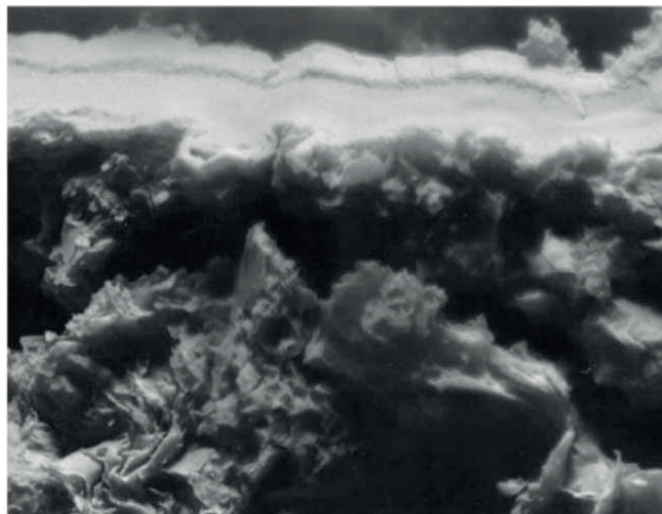
**Сурет 3. Қаныққан натрий-силикат негізіндегі бұрғылау ерітіндісін қолдану кезінде ұңғыма маңы кеңістігіндегі қысымның таралуы.**

**Figure 3. Pressure distribution in the near-wellbore region during the use of a drilling fluid based on saturated sodium silicate.**

**Рис. 3. Распределение давления в приствольной зоне при использовании бурового раствора на основе насыщенного натрий-силиката.**

Силикат жынысқа енген кезде суды кездестіргенде және рН мәні 9-дан төмен болса, дереу гель және шөгінді түзіледі. Олар жарықтар мен кеуектерді бітеп, бұрғылау ерітіндісі фильтратының сланец қабатына әрі қарай енуіне кедергі жасайды.

Сонымен қатар, ұңғыма маңындағы температура 80°-тан жоғары болғанда, силикат пен сазды минерал арасында поликонденсация реакциясы жүреді және цементтелген зат пайда болады, бұл сазды минерал бөлшектерін біріктіріп, ұңғыма қабырғаларын нығайтады (сурет 4).



**Сурет 4. Силикатты бұрғылау ерітіндісімен өңделген сазды жыныс үлгісінің фотосуреті, 10 мкм қалыңдықтағы силикат қабатын көрсетеді.**

**Figure 4. Photograph of a clay rock sample treated with a silicate drilling fluid, showing a silicate layer with a thickness of 10  $\mu\text{m}$ .**

**Рис. 4. Фотография образца глинистой породы, обработанного силикатным буровым раствором, показывающая силикатный слой толщиной 10 мкм.**

## Қорытынды

Сазды тау жыныстарын бұрғылау кезінде ұңғыма қабырғаларының тұрақтылығы көбінесе бұрғылау ерітіндісінің физика-химиялық қасиеттеріне және оның жыныспен өзара әрекеттесу сипатына байланысты екені анықталды. Ерітінді параметрлерінің нақты кен орнының тау-геологиялық жағдайларына сәйкес келмеуі ісіну қысымының артуына, кеуектік қысымның өзгеруіне және технологиялық асқынулардың туындауына әкеледі.

Ингибирлеуші реагенттердің әртүрлі механизмдері (иондық алмасу, осмостық реттеу, адсорбция, қорғаныш қабықша түзу) сазды жыныстарды тұрақтандыруда маңызды рөл атқарады. Тұздар, полимерлер, полиолдар, полисахаридтер және силикатты жүйелердің әрқайсысының өзіндік артықшылықтары мен шектеулері бар екені көрсетілді. Әсіресе төмен және жоғары молекулалық реагенттердің үйлесімді комбинациясын қолдану жыныс құрылымын тиімді нығайтуға және фильтрация процесін бақылауға мүмкіндік береді. Осылайша, геологиялық-техникалық талаптарға сай, кешенді түрде негізделген бұрғылау ерітіндісін әзірлеу ұңғыманы табысты бұрғылаудың, өнімсіз уақытты азайтудың және экономикалық тиімділікті арттырудың негізгі шарты болып табылады.

## Алғыс

Бұл зерттеулер Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің жобаны орындау шеңберінде орындалды (AP26195345 «Бұрғылау ерітінділері үшін өсімдік майларының гудрондары негізіндегі уыттылығы төмен кешенді мақсаттағы реагенттерді алу»).

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ермолаева Л. В. Бұрғылау ерітінділерінің механикасы: оқу құралы. – Самара: Самара мемлекеттік техникалық университеті, 2012. – 47 б. (орыс тілінде)
2. Чудинова И. В. Тұрақсыз сазды жыныстарда барлау ұңғымаларын бұрғылауға арналған полимерлі жуғыш сұйықтықтардың құрамын негіздеу және әзірлеу. – 2019. – Б. 23–24 (орыс тілінде)
3. Бұрғылау ерітіндісінің сіңірілуін төмендетуге арналған жеңілдетілген полимерлі құрам / Г. Ж. Бимбетова [және т. б.] // ҚазТБҰ хабаршысы. – 2025. № 1 (22). – Б. 481–491 (қазақ тілінде)
4. Abasov M. T., Strekov A. S., Efendiev G. M. Мұнай ұңғымаларындағы су ағынын шектеу тиімділігін арттыру. – Baku: Nafta-Press, 2009. – 256 б. (ағылшын тілінде)
5. Газды сланецтің құлау (опырылу) қысымын зерттеу / С. L. Yan [және т. б.] // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2013. – Б. 1595–1602 (ағылшын тілінде)
6. Ананьев А. Н. Бұрғылау ерітінділері бойынша инженерлерге арналған оқу құралы. – Волгоград, 2000. – 139 б. (орыс тілінде)
7. Бахов Ф. Н. Na<sup>+</sup>-монтмориллонитте органофильді қабаттардың түзілуі және олардың құрылымының нанокомпозиттердегі полиолефиндердің толтырғышпен үйлесімділігіне әсері: техн. ғыл. канд. ғылыми дәрежесін алу үшін дайындалған диссертацияның авторефераты: 02.00.06. – Мәскеу, 2007. – 183 б. (орыс тілінде)
8. Paratchos E. Анизотропты кернеулер жағдайындағы құмтаста ұңғыма қабырғасының бұзылуын талдау // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2010. – Б. 581–603 (ағылшын тілінде)
9. Қабатты тақтатас жыныстарында жоғары ауытқыған ұңғымалардың тұрақтылығы / К. Zhao [және т. б.] // Science Technology and Engineering. – 2013. – Б. 1147–1159 (ағылшын тілінде)
10. Микросфералар мен микросиликаны қолдана отырып, жеңіл цемент иламының құрамын жасау / А. А. Kabdushev [және т. б.] // SOCAR Proceedings. – 2025. – № 2. – Б. 40–47 (ағылшын тілінде)



11. Мақта майын өндіруден алынған қайталама ресурстарға негізделген композицияларды қолдана отырып, бұрғылау сұйықтығының қасиеттерін зерттеу / S. M. Yermenov [және т. б.] // SOCAR Proceedings. – 2025. – № 1. – Б. 10–16 (ағылшын тілінде)
12. Көп қабырғалы көміртекті нанотүтікшелерді эксперименттік зерттеу мұнайдың қалпына келуін жақсарту үшін беттік-белсенді заттардың/полимерлердің су басуына ықпал етті / J. Razavinezhad [және т. б.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Т. 214. – 110370 (ағылшын тілінде)

## REFERENCES

1. Yermolaeva L. V. Mekhanika burovyykh rastvorov: uchebnoe posobie [Mechanics of Drilling Fluids: study guide]. Samara: Samara State Technical University, 2012. – 47 p. (in Russian)
2. Chudinova I. V. Obosnovanie i razrabotka sostavov polimernykh promyvochnykh zhidkostei dlya bureniya razvedochnykh skvazhin v neustoychivyykh glinistykh porodakh [Substantiation and Development of Polymer Drilling Fluid Compositions for Drilling Exploration Wells in Unstable Clay Formations]. 2019. – P. 23–24 (in Russian)
3. Lightweight Polymer Composition for Reducing Drilling Fluid Losses / G. Zh. Bimbetova et al. // KazUTB Bulletin. – 2025. No. 1 (22). – P. 481–491 (in Kazakh)
4. Abasov M. T., Strekov A. S., Efendiev G. M. Improving the efficiency of water inflow control in oil wells. – Baku: Nafta-Press, 2009. – 256 p. (in English)
5. Study on the Collapse Pressure of Gas Shale / C. L. Yan et al. // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2013. – P. 1595–1602 (in English)
6. Ananyev A. N. Uchebnoe posobie dlya inzhenerov po burovym rastvoram [A Study Guide for Drilling Fluid Engineers]. Volgograd, 2000. – 139 p. (in Russian)
7. Bakhov F. N. Formirovanie organofil'nykh sloev na Na<sup>+</sup>-montmorillonite i vliyanie ikh struktury na sovmestimost' poliolefinov s napolnitelem v nanokompozitakh [Formation of organophilic layers on Na<sup>+</sup>-montmorillonite and the influence of their structure on the compatibility of polyolefins with fillers in nanocomposites]: Abstract of PhD dissertation in Technical Sciences: 02.00.06. – Moscow, 2007. – 183 p. (in Russian)
8. Papamichos E. Borehole Failure Analysis in a Sandstone under Anisotropic Stresse // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2010. – P. 581–603 (in English)
9. Borehole Stability of Highly Deviated Wells I Bedded Shale / K. Zhao et al. // Science Technology and Engineering. – 2013. – P. 1147–1159 (in English)
10. Development of the composition of lightweight cement slurry using microspheres and microsilica / A. A. Kابدushev et al. // SOCAR Proceedings. – 2025. – No. 2. – P. 40–47 (in English)
11. Investigation of the properties of drilling fluid using compositions based on secondary resources from cottonseed oil production / S. M. Yermenov et al. // SOCAR Proceedings. – 2025. – No. 1. – P. 10–16 (in English)
12. Experimental investigation of multi-walled carbon nanotubes assisted surfactant/polymer flooding for enhanced oil recovery / J. Razavinezhad et al. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 214. – Article 110370 (in English)

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ермолаева Л. В. Механика буровых растворов: учебное пособие. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2012. – 47 с. (на русском языке)
2. Чудинова И. В. Обоснование и разработка составов полимерных промывочных жидкостей для бурения разведочных скважин в неустойчивых глинистых породах. – 2019. – С. 23–24. (на русском языке)
3. Облегченный полимерный состав для снижения поглощения бурового раствора / Г. Ж. Бимбетова [и др.] // Вестник КазТБУ. – 2025. – № 1 (22). – С. 481–491 (на казахском языке)
4. Abasov M. T., Strekov A. S., Efendiev G. M. Повышение эффективности регулирования притока воды в нефтяные скважины. – Baku: Nafta-Press, 2009. – 256 с. (на английском языке).
5. Исследование давления обрушения газонасного сланца / C. L. Yan [и др.] // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2013. – С. 1595–1602 (на английском языке)
6. Ананьев А. Н. Учебное пособие для инженеров по буровым растворам. – Волгоград, 2000. – 139 с. (на русском языке)
7. Бахов Ф. Н. Формирование органофильных слоев на Na<sup>+</sup>-монтмориллоните и влияние их структуры на совместимость полиолефинов с наполнителем в нанокompозитах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 02.00.06. – Москва, 2007. – 183 с. (на русском языке)

8. *Paramichos E. Анализ разрушения стенок скважины в песчанике при анизотропных напряжениях // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2010. – С. 581–603 (на английском языке)*
9. *Устойчивость высокоотклоненных скважин в слоистых сланцевых породах / K. Zhao [и др.] // Science Technology and Engineering. – 2013. – С. 1147–1159 (на английском языке)*
10. *Разработка состава легкого цементного раствора с использованием микросфер и микрокремнезема / A. A. Kabdushev [и др.] // SOCAR Proceedings. – 2025. – № 2. – С. 40–47 (на английском языке)*
11. *Исследование свойств бурового раствора с использованием композиций на основе вторичных ресурсов производства хлопкового масла / S. M. Yermenov [и др.] // SOCAR Proceedings. – 2025. – № 1. – С. 10–16 (на английском языке).*
12. *Экспериментальное исследование процесса заводнения многостенных углеродных нанотрубок поверхностно-активным веществом/полимером с целью повышения нефтеотдачи пластов / J. Razavinezhad [и др.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Т. 214. – Ст. 110370 (на английском языке)*

## Авторлар туралы мәліметтер:

**Бекбаева Г. С.**, Ph.D докторант, «Мұнайгаз ісі» кафедрасы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті КеАҚ (Шымкент қ., Қазақстан), [bekbayeva.gulnaz@mail.ru](mailto:bekbayeva.gulnaz@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0004-9485-9381>

**Боташев Е. Т.**, Ph.D, қауымдастырылған профессор «Мұнайгаз ісі» кафедрасының доценті, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті КеАҚ (Шымкент қ., Қазақстан), [ersultanbotashev@mail.ru](mailto:ersultanbotashev@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5090-3142>

**Эфендиев Г. М.**, т. ғ. д., профессоры, Мұнай және газ институтының профессоры (Баку қ., Әзербайжан Республикасы), [galib\\_2000@yahoo.com](mailto:galib_2000@yahoo.com); <https://orcid.org/0000-0002-4875-5782>

**Жантасов М. К.**, т. ғ. к., профессор, «Мұнайгаз ісі» кафедрасының меңгерушісі, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті КеАҚ (Шымкент қ., Қазақстан), [manapjk80@mail.ru](mailto:manapjk80@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5633-1640>

## Information about the authors:

**Bekbayeva G. S.**, Ph.D doctoral of the Department «Oil and gas business», Non-profit joint-stock company «M. Auezov South Kazakhstan University» (Shymkent, Kazakhstan)

**Botashev Ye. T.**, Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Department «Oil and gas business», Non-profit joint-stock company «M. Auezov South Kazakhstan University» (Shymkent, Kazakhstan)

**Efendiev G. M.**, doctor of technical sciences, professor of the Institute of oil and gas (Baku, Azerbaijan)

**Zhantasov M. K.**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Oil and gas business», Non-profit joint-stock company «M. Auezov South Kazakhstan University» (Shymkent, Kazakhstan)

## Сведения об авторах:

**Бекбаева Г. С.**, Ph.D докторант кафедры «Нефтегазовое дело», НАО «Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова» (г. Шымкент, Казахстан)

**Боташев Е. Т.**, Ph.D, ассоциированный профессор, доцент кафедры «Нефтегазовое дело», НАО «Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова» (г. Шымкент, Казахстан)

**Эфендиев Г. М.**, д. т. н., профессор, Институт нефти и газа (г. Баку, Республика Азербайджан)

**Жантасов М. К.**, к. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело», НАО «Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова» (г. Шымкент, Казахстан)

Код МРНТИ 52.47.33

А. Н. Багиров<sup>1</sup>, \*Д. С. Рустамзаде<sup>1</sup>, \*А. Б. Расулзаде<sup>2</sup><sup>1</sup>Азербайджанский государственный Университет Нефти и Промышленности (г. Баку, Азербайджан),<sup>2</sup>Производственное объединение «Азеригаз», (г. Баку, Азербайджан)

## СУПЕРЗВУКОВОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕЙ СТАНЦИИ С ЦЕЛЬЮ ЕГО ОЧИСТКИ

**Аннотация.** В представленной статье рассмотрены вопросы глубокого охлаждения природного газа и его очистки от вредных компонентов и жидкой фазы. На основе технических возможностей, создаваемых соплом Лавалья для отделения свободной и парообразной жидкости, содержащейся в газе, приведены сведения о создании и применении в последние годы газодинамических сепараторов ведущими компаниями мира, а также отечественными учеными. Целью излагаемого в статье исследования является глубокое охлаждение природного газа за счет сверхзвукового движения для очистки на газораспределительной станции (ГРС), направляемого населению и прочим бытовых потребителям газа, от жидкости и вредных компонентов. Проанализированы технологические процессы и комплексы оборудования, созданные с использованием сверхзвукового движения природного газа, определены их преимущества и недостатки, а также дано их объяснение.

**Ключевые слова:** природный газ, газораспределительная станция, сопло Лавалья, сверхзвуковое движение, критическая температура, число Маха.

### Газ реттеу станциясында табиғи газды тазарту максатында асқындыбыстық салқындату

**Аңдатпа.** Ұсынылған мақалада табиғи газды терең салқындату және оны зиянды компоненттер мен сұйық фазадан тазарту мәселелері қарастырылған. Газ құрамындағы еркін және бу фазалы сұйықтықты бөлу үшін Лаваль сопласының техникалық мүмкіндіктеріне сүйене отырып, соңғы жылдары әлемдік жетекші компаниялар мен отандық ғалымдар жасаған газдинамикалық сепараторларды құру және қолдану туралы мәліметтер берілген. Мақалада баяндалған зерттеудің максаты – газ тарату станциясында (ГТС) халыққа және басқа тұрмыстық тұтынушыларға жеткізілетін газды сұйықтық пен зиянды компоненттерден тазарту үшін табиғи газды супердыбыстық қозғалыс арқылы терең салқындату. Супердыбыстық қозғалыс қолданылған табиғи газдың технологиялық процестері мен жабдық кешендері талданған, олардың артықшылықтары мен кемшіліктері анықталып, түсіндірмесі берілген.

**Түйінді сөздер:** табиғи газ, газ тарату станциясы, Лаваль сопласы, супердыбыстық қозғалыс, критикалық температура, Мах саны.

### Supersonic cooling of natural gas at gas regulating station for purification purposes

**Abstract.** This study investigates the deep cooling of natural gas and its purification from harmful components and liquid phases. Utilizing the technical capabilities of the Laval nozzle to separate free and vapor-phase liquids present in the gas, recent developments and applications of gas-dynamic separators by leading international companies and domestic researchers are reviewed. The primary objective of this research is to achieve deep cooling of natural gas through supersonic flow, enabling effective removal of liquids and harmful components at gas distribution stations (GDS) for supply to the population and other domestic consumers. Technological processes and equipment systems developed based on supersonic natural gas flow are analyzed, with their advantages and limitations identified and discussed.

**Key words:** natural gas, gas distribution station, Laval nozzle, supersonic flow, critical temperature, Mach number.

### Введение

Поскольку нефтегазодобывающие страны, наряду с нефтью, являются производителями и природного газа, термодинамические условия, возникающие при его сверхзвуковом движении, обусловленные свойствами природного газа, создают реальные возможности для решения ряда технических и технологических задач, а также для открытия нового альтернативного источника энергии. На основе технических возможностей, создаваемых соплом Лавалья для отделения свободной и парообразной жидкости, содержащейся в природном газе, в последние годы ведущими мировыми компаниями и отечественными учеными были получены первые результаты по созданию и применению газодинамических сепараторов [1, 2]. 3S-сепаратор (Super Sonic Separator) – это низкотемпературный сверхзвуковой сепаратор, конструкция которого основана на достижениях современной аэродинамики. Принцип работы 3S-сепаратора основан на охлаждении природного газа в сверхзвуковом закрученном потоке. В последние годы в Канаде, России и Китае введено в эксплуатацию несколько установок, на выходе которых точка росы газа составляет от минус 27 °С до минус 46 °С. При всех явных достоинствах этих установок отсутствие гибкой системы регулирования приводит к отклонению работы этих сепараторов от расчетного режима и, как следствие, к выходу природного газа из процесса сепарации.

Газодинамический сепаратор, разработанный азербайджанскими учеными, также создан на основе сопла Лавалья. В данной конструкции термодинамический процесс основан на теплообмене между охлажденным газом, выходя-

щим из сопла, и горячим газом, поступающим в сепаратор. В результате испытаний, проведенных на компрессорной станции № 3 НГДУ им. Н. Нариманова, удалось снизить температуру газа на 24 °С [3, 4].

Сначала рассмотрим источники и объемы природного газа, поступающего на Карадагскую газораспределительную станцию (ГРС), а также инфраструктурные объекты, параметры давления и температуры. Учитывая, что в зависимости от сезона, схемы транспортировки природного газа по магистральным трубопроводам различаются, для проводимого исследования рассмотрим источники, наиболее значимые для зимнего периода:

1. Объемы газа, добываемого на месторождении «Гюнешли», транспортируемого на берег по подводным газопроводам и перерабатываемого на Азербайджанском газоперерабатывающем заводе – 5 млн м<sup>3</sup>/сутки;

2. Объемы газа с газоконденсатного месторождения «Умид» – 6 млн м<sup>3</sup>/сутки;

3. Объемы газа, поступающие с газоконденсатного месторождения «Булла-Дениз» НГДУ имени Н. Нариманова, 2 млн м<sup>3</sup>/сутки;

4. Объемы газа с газоконденсатного месторождения «Булла-Дениз», сжимаемые посредством компрессорной станции № 3, 2 млн м<sup>3</sup>/сутки;

5. Объемы газа, отбираемые из Карадагского подземного газохранилища и направляемые в сторону Карадагской газораспределительной станции (ГРС), 8–9 млн м<sup>3</sup>/сутки в зависимости от спроса.

Указанные объемы газа в основном направляются на Карадагскую компрессорную станцию при давлении



2,3 МПа и температуре 0–10 °С (273–283 К), которая зависит от температуры окружающей среды. На станции газ сжимается до давления 4,0 МПа с помощью двух газотурбинных компрессорных установок. За исключением природного газа, поступающего со сжимающей компрессорной станции № 2 на Нефтяных Камнях, все остальные объемы газа не проходят установку осушки и подвергаются только процессу сепарации. По этой причине содержание жидких компонентов в них является более высоким.

Для дальнейшего анализа и расчетов, учитывая, что температура газа является одним из основных параметров и что в результате адиабатического сжатия в компрессоре температура повышается, можно рассчитать выходную температуру в соответствии с входными температурами по следующей формуле:

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{вх}} \left( \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (1)$$

где:  $T_{\text{вх}}$  и  $T_{\text{вых}}$  – соответственно, температуры на входе и выходе компрессора (К);

$P_{\text{вх}}$  и  $P_{\text{вых}}$  – соответственно, давление на входе и выходе компрессора (МПа);

$k$  – показатель адиабаты (для природного газа месторождений региона  $k = 1,31$ ).

Проведя расчеты по формуле (1), определяем, что при температуре на входе компрессора 0–10 °С (273–283 К) температура на выходе компрессора будет находиться на уровне 38–49 °С (311–322 К). Сжатый на компрессорной станции природный газ (при работе одной установки – 5–6 млн м³/сутки, при работе двух установок – 10–12 млн м³/сутки) поступает на Карадагскую ГРС и направляется по следующим направлениям:

1. С высоким давлением (3,0–3,2 МПа) – по трубопроводу Карадаг – Северная ГРЭС;

2. Со средним давлением (1,0–1,2 МПа) – по трубопроводу Карадаг – Дигях;

3. С низким давлением (0,3 МПа) – по трубопроводу Карадаг – Масазыр – Дигях – Бина.

Поскольку объектом исследования является система низкого давления, рассмотрим процессы, происходящие в данном направлении. На Карадагской ГРС газ с давлением 3,2 МПа и объемом 500–600 тыс. м³/сутки, формирующийся для подачи в трубопровод низкого давления, проходит трехступенчатый процесс дросселирования, в результате чего его давление снижается до 0,3 МПа. Дросселирование – это эффект снижения давления газового потока при прохождении через сужение.

Хотя применяемый технологический процесс способен выполнять функцию поэтапного снижения давления, в условиях низкой температуры окружающей среды не исключаются определенные осложнения.

В частности, в узле, состоящем из клапана регулирующего устройства и его седла, обеспечивающего дросселирование, могут наблюдаться явления обмерзания. Кроме того, в технологии дросселирования влага и вредные компоненты, находящиеся в составе газа в парообразном состоянии при исходных условиях, при охлаждении пере-

ходят в жидкое состояние, однако их улавливание и отделение от газового потока не обеспечивается.

Устранение указанных недостатков может быть достигнуто благодаря разработке и внедрению механизмов глубокой очистки природного газа от жидкой фазы в термобарических условиях, создаваемых сверхзвуковым движением. Принципиальное отличие и преимущество данной технологии связано с возможностью получения более низких температур. Поэтому, опираясь на теорию газовой динамики и анализ существующих образцов газодинамических сепараторов, были рассмотрены вопросы разработки модели газодинамического охладителя природного газа [5, 6].

### Методы исследования

Изучение сверхзвукового движения природного газа и исследование возможностей разработки на этой основе новых технологических процессов для охлаждения газа, его осушки и отделения содержащихся в нем жидких углеводородов является одним из перспективных направлений исследований в газовой промышленности. Прежде чем рассчитать параметры сверхзвукового движения для объекта исследования, рассмотрим термодинамические и газодинамические процессы, происходящие в газопроводах. Известно, что образование жидкой фазы в газопроводах происходит по двум причинам: термодинамической и газодинамической. На протяжении всего периода разработки газового месторождения в условиях постоянного изменения термодинамических условий и состава продукции скважин поддержание стабильного оптимального режима процесса сепарации становится невозможным.

Месторождения в основном разрабатываются в режиме истощения, и в связи с быстрым падением пластового давления период низкотемпературной сепарации, возникающий за счет естественного охлаждения газа, является непродолжительным. Использование же холодильных установок с экономической точки зрения является нецелесообразным. Поэтому во многих случаях сепарация газа проводится без дополнительного охлаждения – при собственной температуре газа или при температуре, формирующейся под воздействием окружающей среды [7, 8].

В таких условиях в сепарационных установках не создается удовлетворительная среда для отделения жидких капель, и из газа отделяется лишь определенная часть жидкости. В результате процесс конденсации тяжелых углеводородов и влаги в газопроводе продолжается, что и является термодинамической причиной образования жидкой фазы.

Высокая скорость двухфазного потока в сепараторе приводит к дроблению и распылению жидкой фазы, а также к уносу капель жидкости вместе с газом из сепаратора в трубопровод. Наряду с низким коэффициентом полезного действия сепараторов, обусловленным несовершенством их конструкций, именно этим объясняется и вторая (газодинамическая) причина попадания жидкости в газопровод.

В обычном трубном сепараторе, рассчитанном по методике с учетом газодинамических характеристик газожид-

костного потока, процесс сепарации осуществляется при температуре окружающей среды. Поэтому температура точки росы сепарированного газа будет равна температуре окружающей среды. Таким образом, в обычном трубном сепараторе осуществляется высокотемпературный процесс сепарации, и из газового потока отделяется только уже сконденсировавшаяся свободная жидкая фаза. В этих условиях часть компонентов, которые могли бы конденсироваться при более низкой температуре, остается растворенной в газовой фазе. При понижении температуры окружающей среды в процессе транспортировки такие компоненты могут конденсироваться в трубопроводе, создавая опасность образования конденсата и затрудняя транспортировку газа. Таким образом, решение рассматриваемой проблемы состоит из двух частей: разработки механизма охлаждения природного газа на основе его сверхзвукового движения и создания непосредственно конструкции сепаратора.

В данной статье рассматривается решение первой задачи. Целью исследования является осушка и очистка природного газа, направляемого бытовым и коммунальным потребителям, от вредных компонентов на Карадагской ГРС на основе сверхзвукового движения газа. В технологическом процессе, применяемом на этой станции и основанном на дросселировании, в условиях низкой температуры окружающей среды могут возникать определенные осложнения. В частности, в узле, состоящем из клапана регулирующего устройства и его седла, обеспечивающего дросселирование, может наблюдаться обмерзание. Кроме того, при использовании технологии дросселирования влага и вредные компоненты, находящиеся в газе в парообразном состоянии при исходных условиях, при охлаждении переходят в жидкое состояние, однако их улавливание и отделение от газового потока не обеспечивается [9]. Устранение указанных недостатков возможно благодаря разработке и внедрению механизмов глубокой очистки природного газа от жидкой фазы в термобарических условиях, создаваемых сверхзвуковым движением. Принципиальное отличие и преимущество данной технологии заключается в возможности получения более низких температур.

### Результаты

Рассмотрим параметры газодинамических охлаждающих установок, которые предполагается спроектировать для рассматриваемого объекта. Плотность природного газа, поступающего с давлением  $P_1 = 3,2$  МПа и температурой  $T_1 = 316,65$  К на Карадагскую ГРС в объеме  $Q_{\text{норм}} = 500$  тыс. м<sup>3</sup>/сутки (5,787 м<sup>3</sup>/сек), составляет 0,76 кг/м<sup>3</sup>. Массовый расход через установку  $M = \rho_{\text{норм}} Q_{\text{норм}} = 0,76 \cdot 5,787 = 4,40$  кг/сек. В зависимости от компонентного состава газа его относительная плотность составляет

$$\Delta = \frac{\rho_{\text{станд}}}{\rho_{\text{в.ст}}} = \frac{\rho_{\text{норм}} \cdot 1,073}{\rho_{\text{в.ст}}} = \frac{0,76 \cdot 1,073}{1,20445} = 0,677$$

(где  $\rho_{\text{в.ст}}$  – плотность воздуха при стандартных условиях). Принимая критическое давление  $P_{\text{крит}} = 4,7$  МПа и показатель адиабаты  $k = 1,31$ , получим:

$$\beta = \frac{P_{\text{крит}}}{P_{\text{вх}}} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,544 \quad (2)$$

Учитывая, что температура газа на выходе из компрессорной станции (КС) изменяется в интервале 38–49 °С (311–322 К), примем температуру газа на входе в охлаждающее устройство равной 43,5 °С (316,65 К) и используя формулу (3)

$$T_{\text{крит}} = T_1 \cdot \frac{2}{k+1}, \quad (3)$$

определим критическую температуру ( $T_{\text{крит}} = 274$  К = 1 °С).

По диаграммам Стендинга-Катца определяем коэффициент сверхсжимаемости  $Z = 0,90$ . Учитывая, что молекулярная масса газа составляет 18,7 г/моль (0,0187 кг/моль), а универсальная газовая постоянная равна 8,314 Дж / (моль · К), можно определить удельную газовую постоянную данного природного газа, которая составляет 444,6 Дж / (кг · К). Этот параметр также будет использован в расчетах. Комбинированное сопло (сопло Лавала) состоит из двух частей – сужающейся и расширяющейся. В сужающейся части скорость потока увеличивается от начального значения до локальной скорости звука, а в расширяющейся части наблюдается дальнейшее увеличение скорости потока. Для уменьшения потерь энергии расширяющаяся часть плавно соединяется с сужающейся посредством специального горлового сечения. Участок с наименьшей площадью поперечного сечения, где скорость потока достигает скорости звука, называется критическим сечением, а параметры газа в этой точке – критическими параметрами. На первом этапе достигается критическая скорость, равная локальной скорости звука, а на втором этапе – максимальная скорость движения газа. Сопло Лавала используется в том случае, когда отношение давлений  $P_2/P_1$  (где  $P_1$  – абсолютное давление перед соплом,  $P_2$  – абсолютное давление среды, в которую направляется поток) меньше критического отношения  $\beta$ . Расчет параметров для охлаждения газа проводится в следующей последовательности: заданные параметры – давление

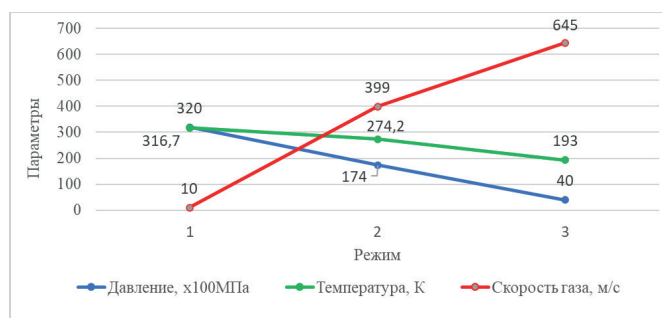


Рис. 1. Динамика изменения давления, температуры и скорости газа в процессе охлаждения.

Сурет 1. Салкындату процесінде газдың қысымы, температурасы және жылдамдығының өзгеру динамикасы.

Figure 1. Dynamics of changes in gas pressure, temperature, and velocity during the cooling process.

Таблица 1

Параметры охлаждения газа,  $T = 316,65 \text{ К}$  ( $43,5^\circ\text{C}$ )

Кесте 1

Газды салқындату параметрлері,  $T = 316,65 \text{ К}$  ( $43,5^\circ\text{C}$ )

Table 1

Gas cooling parameters,  $T = 316.65 \text{ К}$  ( $43.5^\circ\text{C}$ )

| Параметр                                                | Формула                                                                                                                 | Значение               |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Входное давление, $P_1$ , МПа, абс.                     | -                                                                                                                       | 3,2                    |
| Выходное давление, $P_2$ , МПа, абс.                    | -                                                                                                                       | 0,4                    |
| Плотность газа на входе (реальный газ), $\text{кг/м}^3$ | $\rho_1 = \frac{P_1}{ZRT_1}$                                                                                            | 25,2                   |
| Критическое давление, МПа                               | $P_{kr} = P_1 \cdot \beta$                                                                                              | 1,74                   |
| Критическая температура, К                              | $T_{kr} = T_1 \cdot \frac{2}{k+1}$                                                                                      | 274,2                  |
| Критическая плотность, $\text{кг/м}^3$                  | $\rho_{kr} = \rho_1 \cdot \beta^{\frac{1}{k}}$                                                                          | 15,8                   |
| Критическая скорость, м/с                               | $a_{kr} = \sqrt{k \cdot R \cdot T_{kr}}$                                                                                | 399                    |
| Максимальная (теоретическая) скорость, м/с              | $V_{max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R \cdot T_1}$                                                                     | 1090                   |
| Выходная скорость, м/с                                  | $V_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$ | 680                    |
| С учетом реального газа, м/с                            | $V_2^{(Z)} = V_2 \cdot \sqrt{Z}$                                                                                        | 645                    |
| Выходная температура, К                                 | $T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}}$                                                                                 | 193                    |
| Скорость звука, м/с                                     | $a_2 = \sqrt{k \cdot R \cdot T_2}$                                                                                      | 335                    |
| Относительная скорость (число Маха)                     | $M_2 = \frac{V_2^{(Z)}}{a_2}$                                                                                           | 1,93                   |
| Площадь критического сечения сопла, $\text{м}^2$        | $A_{kr} = \frac{M}{\rho_{kr} \cdot V_{kr}}$                                                                             | 0,000696               |
| Диаметр горловины сопла, м                              | $d_{kr} = \sqrt{\frac{A_{kr}}{0.785}}$                                                                                  | $0,0298 \approx 0,030$ |

газа на входе  $P_1$ , температура  $T_1$ ; плотность газа  $\rho_1$  и расход  $M$ ; давление газа на выходе  $P_2$ . По длине сопла рассчитываются критическое давление, температура, плотность, скорость. Далее вычисляются выходные скорость и температура, скорость звука и число Маха, площадь и диаметр критического сечения сопла.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

### Обсуждение результатов

Из таблицы 1 видно, что при применении предлагаемой технологии температура газа, транспортируемого по рассматриваемому трубопроводу, значительно снижается и может достигать  $193 \text{ К}$  ( $-80^\circ\text{C}$ ). При таких температурах

влаги и вредные компоненты, находившиеся в газе в парообразном состоянии при исходных условиях, переходят в жидкое состояние, что позволяет осуществить их улавливание и отделение от газового потока без дополнительного энергопотребления.

На графике 1 показаны изменения давления, температуры и скорости газа в процессе охлаждения. По горизонтальной оси обозначены параметры: 1 – на входе, 2 – в критическом сечении, 3 – на выходе. Из графика видно, что при снижении давления от 3,2 до 0,4 МПа и увеличении скорости газа от 10 до 645 м/с температура газа изменяется в диапазоне 317–193 К, то есть происходит снижение на 124 К. Особое значение исследования заключается



в том, что предлагаемый метод позволяет достичь температуры  $-80^{\circ}\text{C}$ , что является важным фактором для глубокой очистки природного газа от жидких компонентов.

### Закключение

1. Проведенное исследование показало, что на газораспределительных станциях возможно очищение газа от жидкой фазы и вредных компонентов за счет сверхзвукового движения газа.

2. При заданных параметрах поток природного газа в сопле достигает критического режима с переходом в сверхзвуковое течение ( $M \approx 1.9$ ).

3. Учет коэффициента сжимаемости  $Z$  приводит к увеличению плотности газа и уточнению геометрических параметров сопла.

4. Полученный диаметр критического сечения составляет порядка 30 мм, что подтверждает компактность конструкции при заданном расходе.

5. Полученные результаты носят универсальный характер, поэтому разработанные рекомендации целесообразно применять на аналогичных промышленных объектах.

### Благодарность

Автор выражает благодарность всем сотрудникам и пожилым людям, участвовавшим в этом исследовании, которые поделились своими ценными мыслями и опытом. Их сотрудничество и открытость значительно способствовали глубине и насыщенности полученных результатов исследования.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Baghirov A. N. Сверхзвуковая технология охлаждения воздуха газовых турбин // *Technologies and Resource Saving*. – 2024. – Т. 81. – № 4. – С. 79–87 (на английском языке)
2. Сверхзвуковые характеристики сжижения природного газа в сопле Лаваля / J. Bian [и др.] // *Energy*. – 2018. – Т. 159. – С. 706–715 (на английском языке)
3. Имаев С. З., Сафьянников М. И. Регулирование сверхзвуковых сепараторов // *Территория Нефтегаз*. – 2016. – № 9. – С. 98–104 (на русском языке)
4. Разработка новых технологических процессов на основе сверхзвукового течения природного газа / Э. Х. Искендеров [и др.] // *Материалы SOCAR*. – 2022. – № 4. – С. 117–123 (на русском языке)
5. Iskanderov E. Kh., Baghirov A. N., Shikhiyeva L. M. Метод оценки гидратообразования в смеси потоков природного газа с различным содержанием влаги // *Nafta-Gaz*. – 2024. – № 1. – С. 39–44 (на английском языке)
6. Cao X., Bian J. Сверхзвуковая технология сепарации для переработки природного газа: обзор // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. – 2019. – Т. 136. – С. 138–151 (на английском языке)
7. Характеристики сверхзвукового охлаждения сопел и особенности фазового перехода влажного природного газа с учетом эффектов ударных волн / X. Cao [и др.] // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2020. – Ст. 100833 (на английском языке)
8. Yang Q., Yang Sh., Yu H. Влияние конструкции сопла Лаваля на характеристики потока сверхзвукового газо-твердофазного двухфазного потока // *Powder Technology*. – 2024. – Т. 439. – Ст. 119657 (на английском языке)
9. Zhang H., Liu Y., Li Q. Численное исследование сверхзвуковой конденсации природного газа в сопле Лаваля // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2017. – Т. 44. – С. 1–9 (на английском языке)
10. Baghirov L. A., İmaev S. Z. Опыт применения 3S-технологии для переработки природного газа на объектах в России и Китае. SPE-176649-MS // *Материалы конференции SPE*. – 2015 (на английском языке)

### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Baghirov A. N. Газ турбиналық ауаны супердыбыстық салқындату технологиясы // *Energy Technologies and Resource Saving*. – 2024. – Т. 81. – № 4. – Б. 79–87 (ағылшын тілінде)
2. Соплолардағы асқындыбыстық салқындату сипаттамалары және соққы толқындарын ескере отырып ылғалды табиғи газдың фазалық ауысу ерекшеліктері / J. Bian [және т. б.] // *Energy*. – 2018. – Т. 159. – Б. 706–715 (ағылшын тілінде)
3. Имаев С. З., Сафьянников М. И. Супердыбыстық сепараторларды реттеу // *Территория Нефтегаз*. – 2016. – № 9. – Б. 98–104 (орыс тілінде)
4. Табиғи газдың супердыбыстық ағымы негізінде жаңа технологиялық процестерді әзірлеу / Э. Х. Искендеров [және т. б.] // *SOCAR еңбектері*. – 2022. – № 4. – Б. 117–123 (орыс тілінде)
5. Iskanderov E. Kh., Baghirov A. N., Shikhiyeva L. M. Әр түрлі ылғалдылықтағы табиғи газ ағындарынан гидрат түзілуін бағалау әдісі // *Nafta-Gaz*. – 2024. – № 1. – Б. 39–44 (ағылшын тілінде)
6. Cao X., Bian J. Табиғи газды өңдеуге арналған супердыбыстық бөлу технологиясы: шолу // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. – 2019. – Т. 136. – Б. 138–151 (ағылшын тілінде)

7. Соплолардың сверхдыбыстық салқындату өнімділігі және соққы толқындарының әсерін ескере отырып, ылғалды табиғи газдың фазалық ауысу сипаттамалары / X. Cao [және т. б.] // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2020. – 100833 (ағылшын тілінде)
8. Yang Q., Yang Sh., Yu H. Лаваль соплосының құрылымының сверхдыбыстық газ-қатты екі фазалы ағын сипаттамаларына әсері // *Powder Technology*. – 2024. – Т. 439. – 119657 (ағылшын тілінде)
9. Zhang H., Liu Y., Li Q. Лаваль соплосында табиғи газдың асқындыбыстық конденсациясын сандық зерттеу // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2017. – Т. 44. – С. 1–9 (ағылшын тілінде)
10. Бағыров Л. А., Имаев С. З. 3S технологиясын Ресей мен Қытайдағы табиғи газды өңдеу нысандарында қолдану тәжірибесі. SPE-176649-MS // SPE конференциясы. – 2015 (ағылшын тілінде)

## REFERENCES

1. Baghirov A.N. Supersonic cooling technology of gas turbine air // *Energy technologies and resource saving*. – 2024. – Vol. 81. – No. 4. – P. 79–87 (in English)
2. Supersonic liquefaction properties of natural gas in the Laval nozzle / J. Bian et al. // *Energy*. – 2018. – Vol. 159. – P. 706–715 (in English)
3. Imayev S. Z., Safyannikov M. I. Regulirovanie sverkhzvukovykh separatorov [Regulation of supersonic separators]. *Territoriya Neftegaz [Neftegaz Territory]*. – 2016. – No. 9. – P. 98–104 (in Russian)
4. Razrabotka novykh tekhnologicheskikh protsessov na osnove sverkhzvukovogo techeniya prirodnogo gaza [Development of new technological processes based on supersonic flow of natural gas] E. Kh. Iskanderov et al. *Materialy SOCAR [SOCAR Proceedings]*. – 2022. – No. 4. – P. 117–123 (in Russian)
5. Iskanderov E. Kh., Baghirov A. N., Shikhiyeva L. M. Method for assessing hydrate formation from a mixture of natural gas flows of varying moisture content // *Nafta-Gaz*. – 2024. – No. 1. – P. 39–44 (in English)
6. Cao X., Bian J. Supersonic separation technology for natural gas processing: A review // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. – 2019. – Vol. 136. – P. 138–151 (in English)
7. Supersonic refrigeration performances of nozzles and phase transition characteristics of wet natural gas considering shock wave effects / X. Cao et al. // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2020. – Article 100833 (in English)
8. Yang Q., Yang Sh., Yu H. Impact of Laval nozzle structure on the flow characteristics of supersonic gas-solid two-phase flow // *Powder Technology*. – 2024. – Vol. 439. – Article 119657 (in English)
9. Zhang H., Liu Y., Li Q. Numerical investigation of supersonic condensation of natural gas in Laval nozzle // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 44. – P. 1–9 (in English)
10. Baghirov L. A., Imayev S. Z. Experience of applying 3S technology for natural gas processing at facilities in Russia and China. SPE-176649-MS // *SPE Conference*. – 2015 (in English)

## Сведения об авторах:

**Багиров А. Н.**, к. т. н., доцент кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», Азербайджанский государственный университет Нефти и Промышленности (г. Баку, Азербайджан), [abaghirov59@gmail.com](mailto:abaghirov59@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0002-6112-6443>

**Рустамзаде Д. С.**, ст. преподаватель кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», Азербайджанский государственный Университет Нефти и Промышленности (г. Баку, Азербайджан), [Joshgun.rustamzada@asoiu.edu.az](mailto:Joshgun.rustamzada@asoiu.edu.az); <https://orcid.org/0009-0002-7380-4707>

**Расулзаде А. Б.**, инженер отдела ОТ, ТБ и ООС, Производственное объединение «Азеригаз», Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики (г. Баку, Азербайджан), [agha.rasulzada@socar.az](mailto:agha.rasulzada@socar.az); <https://orcid.org/0009-0002-8715-9366>

## Авторлар туралы мәліметтер:

**Багиров А. Н.**, т. ғ. к., «Мұнай және газды тасымалдау және сақтау» кафедрасының доценті, Әзербайжан мемлекеттік мұнай және өнеркәсіп университеті (Баку қ., Әзербайжан),

**Рустамзаде Д. С.**, «Мұнай және газды тасымалдау және сақтау» кафедрасының аға оқытушысы, Әзербайжан мемлекеттік мұнай және өнеркәсіп университеті (Баку қ., Әзербайжан)

**Расулзаде А. Б.**, «Әзіргаз» өндірістік бірлестігі, Әзербайжан Республикасының Мемлекеттік мұнай компаниясы, ЕҚ, ТҚ және ҚОҚ бөлімінің инженері (Баку қ., Әзербайжан)

## Information about the authors:

**Baghirov A. N.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Transportation and Storage, Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)

**Rustamzada J. S.**, Senior Lecturer of the Department of Oil and Gas Transportation and Storage, Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)

**Rasulzada A. B.**, Engineer of the HSE Department, Azerigas Production Union, State Oil Company of Azerbaijan Republic (Baku, Azerbaijan)

Код МРНТИ 38.21.17

Н. Н. Мусахан<sup>1</sup>, \*Ы. Жакыпбек<sup>1</sup>, Н. Жеткергенқызы<sup>2</sup>, М. Савут<sup>3</sup><sup>1</sup>Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан),<sup>2</sup>Әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті (Алматы қ., Қазақстан),<sup>3</sup>Шыңжаң университеті (Үрімші қ., Қытай Халық Республикасы)

## АҚБАҚАЙ КЕН ОРНЫНЫҢ ГЕОЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЫН СПУТНИКТІК ЖӘНЕ ЗЕРТХАНАЛЫҚ ӘДІСТЕРМЕН БАҒАЛАУ

**Аннотация.** Мақалада Ақбақай кен орны аумағында 2015–2024 жылдар аралығындағы тау-кен өндірісінің кеңістіктік өсу динамикасы мен флораға әсерін қашықтықтан зондтау деректері негізінде, сонымен қатар 2024 жылы аталмыш кен орнынан әртүрлі тереңдіктегі 6 нүктеден сынамалар алынып топырақтардың ластану жағдайына ішкі зертханалық талдау жасалынды. Зерттеу барысында Google Earth, Google Earth Engine және Sentinel-2 спутниктік суреттері қолданылып, өндірістің қоршаған ортаға ықпалын бағалау үшін NDVI және LST индекстері есептелді. Сонымен қатар зерттеу объектісінен алынған топырақтардың ауыр металдармен ластанғандығы дәлелденіп отыр. Ғылыми зерттеулер тау-кен жұмыстарының табиғи ландшафтқа кері әсері анықталып, тұрақты геоэкологиялық мониторингтеудің маңызды екендігін айқындай түседі.

**Үйінді сөздер:** Ақбақай, Google Earth Engine, карьер, үйінді, техногендік ластану, бақылау.

### Assessment of the geoeological condition of the Akbakay deposit using satellite and laboratory methods

**Abstract.** The study examines the spatial expansion of mining activities and their effects on vegetation in the Akbakay deposit from 2015 to 2024 using remote sensing data. Soil contamination was also evaluated through laboratory analyses. Sentinel-2 imagery, along with Google Earth and Google Earth Engine, was applied to calculate NDVI and LST indices for assessing the environmental impact of open-pit mining. The results show a marked increase in mining areas and waste dumps over the study period, while laboratory findings revealed heavy metal concentrations above permissible limits. Overall, the research confirms the significant environmental pressure caused by mining and highlights the need for continuous geoeological monitoring.

**Key words:** Akbakay, Google Earth Engine, open-pit mine, waste dump, technogenic pollution, monitoring.

### Оценка геоэкологического состояния месторождения Акбакай с использованием спутниковых и лабораторных методов

**Аннотация.** В статье проведен анализ пространственной динамики роста горнодобывающих работ на территории месторождения Акбакай и их влияния на флору на основе данных дистанционного зондирования. Также выполнен лабораторный анализ состояния загрязнения почв. В исследовании использовались спутниковые снимки Google Earth, Google Earth Engine и Sentinel-2. Для оценки воздействия карьерного производства на окружающую среду рассчитаны индексы NDVI и LST, а их пространственное распределение изучено в пределах буферных зон 1 км, 3 км и 5 км. Результаты показали значительное расширение карьерных площадей и увеличение площади и объема отвальных пород. Полученные данные подтверждают существенное экологическое воздействие горных работ на природный ландшафт и подчеркивают необходимость геоэкологического мониторинга и оценки экологических рисков.

**Ключевые слова:** Акбакай, Google Earth Engine, карьер, отвал, техногенное загрязнение, мониторинг.

### Кіріспе

Соңғы онжылдықтарда табиғи экожүйелердің бұзылуына ықпал ететін басты себептердің бірі – пайдалы қазбаларды өндіру саласының, әсіресе жаппай және қарқынды игерудің кеңеюі. Кен орындарын ашық тәсілмен игеру үдерісінде жер бедерінің антропогендік қайта қалыптасуы, топырақ қабатының толық немесе ішінара жойылуы, өсімдік жамылғысының деградациясы, сондай-ақ ландшафттық құрылымның тұтастығының бұзылуы орын алады. UNEP деректеріне сәйкес, қазіргі уақытта әлемдік құрлық аумағының шамамен 40–45%-ы шөлейттену мен жер деградациясы процестеріне ұшыраған, бұл өз кезегінде 3,2 миллиардтан астам адамның әлеуметтік-экономикалық жағдайына тікелей немесе жанама әсерін тигізуде. Сонымен қатар, World Bank мәліметтері бойынша, соңғы 30 жыл ішінде әлем көлемінде ашық әдіспен игеру нәтижесінде 57 млн гектардан астам аумақ техногендік трансформацияға ұшыраған [1–3].

Қазақстан Республикасында жердің тозуы мен техногендік деградация өзекті мәселеге айналып отыр. ҚР Экология және табиғи ресурстар министрлігінің мәліметтері бойынша, ел аумағының шамамен 66%-ы әртүрлі деңгейде деградацияға ұшыраған, ал 180 млн гектардан астам жер шөлейттену қаупі бар аумақтар қатарына жатады [4, 5]. Сонымен қатар, республика аумағында пайдалы қазбаларды өндірумен байланысты 25 мыңнан астам техногендік нысан тіркелген, олардың едәуір бөлігін ашық карьерлер мен өндірістік үйінділер құрайды [6, 7]. Жыл сайын кен игеру саласының әсерінен 2–3 мың гектарға жуық жер

шаруашылық айналымынан шығып, экологиялық тұрғыдан қолайсыз аумақтарға айналған.

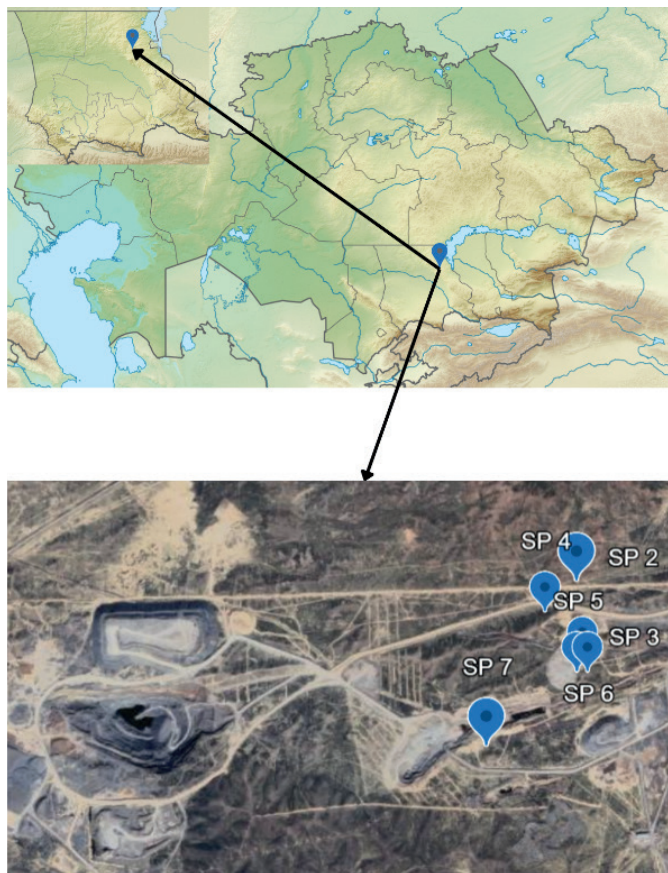
Ақбақай кен орны Жамбыл облысының шөлейт аймағында орналасқан және табиғи-климаттық жағдайлардың құрғақтығымен, өсімдік жамылғысының сиректігімен және экожүйелердің қалпына келу қабілетінің төмендігімен ерекшеленеді. Аймақтағы орташа жылдық жауын-шашын мөлшері 180–220 мм-ден аспайды, ал жаз мезгілінде жер бетінің температурасы 45–50 °C-қа дейін жетуі мүмкін [8]. Осындай табиғи жағдайларда ашық игерудің кеңеюі жер жамылғысының экологиялық тұрақтылығын айтарлықтай төмендетіп, шөлейттену процестерінің күшеюіне ықпал етеді.

### Әдістері мен материалдары

Ақбақай кен орны аумағы шөлейт және жартылай шөлейт аймақта орналасқан, сондықтан экожүйелер антропогендік әсерге сезімтал болып келеді. Ашық әдіспен кен игеру жер бедерінің өзгеруіне, топырақ пен өсімдік жамылғысының бұзылуына әкеледі, бұл аумақтың геоэкологиялық жағдайын кешенді бағалауды талап етеді [9, 10].

Зерттеуде негізгі дереккөз ретінде Google Earth платформасының жоғары айқындықтағы спутниктік суреттері пайдаланылды. Карьерлердің шекараларын анықтау, техногендік нысандардың орналасуын бағалау және жер жамылғысының морфологиялық өзгерістерін талдау мен сандық өңдеу үшін Google Earth Engine ортасында Sentinel-2 Level-2A деректері қолданылды.





Сурет 1. Ақбақай кен орны – топырақ сынамаларын алу нүктелері.

Figure 1. Akbakay deposit – soil sampling points.

Рис. 1. Акбакайское месторождение – точки отбора почвенных проб.

Сонымен қатар ауыр металдардың (*Cu, Zn, Cd, Pb, Co, Ni, Mo, Ag, As*) жалпы мөлшерін анықтау үшін топырақ үлгілері Ақбақай кен орны аумағындағы 8 нүктеден алынып, олардың өзара орналасуына сәйкес 6 қима бойынша зерттелді (1-сурет). Сынамалар қабаттық принциппен іріктелді: 1-қима – 0–2, 2–11, 11–25, 25–35 см; 2-қима – 0–0,3, 0,3–14, 14–44 см; 3-қима – 0–1, 1–12, 12–25, 25–43 см; 4-қима – 0–1, 1–11, 11–22, 22–42 см; 5-қима – 0–4, 4–13, 13–28, 28–56, 56–78, 78–95, 95–103 см; 6-қима – 0–13, 13–35, 35–57, 72–100 см. Әр қабаттан орташа 1–1,5 кг үлгілер дайындалып, қышқылдық қоспамен ( $HCl-HNO_3-HF-HClO_4$ ) минералдандырылды. Элементтердің жалпы формалары атомдық-абсорбциялық спектрометрия әдісімен анықталып, талдау сапасы параллель үлгілер мен стандартты материалдар арқылы бақыланды. Алынған деректер ауыр металдардың профильдік таралуын және техногендік жүктеме деңгейін бағалауға мүмкіндік берді. Спутниктік және геохимиялық деректерді біріктіру Ақбақай кен орны аумағындағы техногендік ластануы мен экологиялық өзгерістері кешенді талдауға мүмкіндік берді.

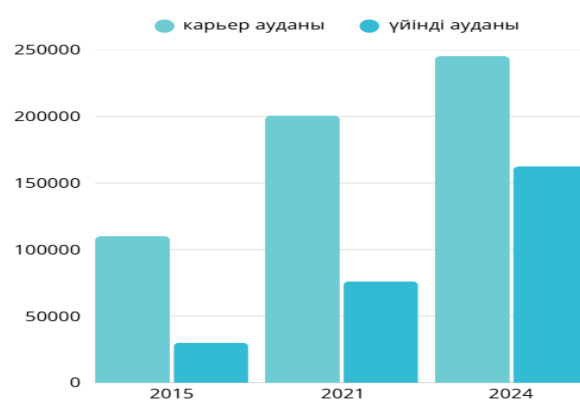
#### Нәтижелер және талқылау

Жүргізілген қашықтан зондтау деректерін талдау нәтижелері Ақбақай кен орнындағы тау-кен жұмыстарының соңғы жылдары айтарлықтай қарқын алғанын көрсетеді.

Ақбақай кен орнының 2015, 2021 және 2024 жылдардағы спутниктік суреттерін кешенді салыстыру карьерлік өндірістің кеңістіктік және сандық тұрғыдан тұрақты өсу динамикасын айқындады. 2015 жылы карьерлер негізінен оқшау орналасып, өндірістік аумақ шектеулі сипатта болған: карьер ауданы 110 375 м<sup>2</sup>, ал қалдық үйінділері 29 968 м<sup>2</sup> құраған. 2021 жылы карьер контурлары кеңейіп, жаңа қазу алаңдары мен техногендік үйінділер қалыптаса бастаған, бұл сандық көрсеткіштерден де айқын көрінеді – карьер аумағы 200 492 м<sup>2</sup>-ге дейін ұлғайып, 2015 жылмен салыстырғанда шамамен 1,8 есеге артқан, ал қалдық үйінділері 76 080 м<sup>2</sup>-ге жетіп, бастапқы кезеңмен салыстырғанда шамамен 2,5 есеге көбейген. 2024 жылы өндірістік трансформация ең жоғары деңгейге жетіп, жекелеген карьер учаскелері бірігіп, инфрақұрылым кеңейген; осы кезеңде карьер ауданы 245 256 м<sup>2</sup>-ге дейін өсіп, 2015 жылмен салыстырғанда 2,2 еселік арту байқалса, қалдық үйінділері 162 432 м<sup>2</sup>-ге жетіп, 2015 жылғы көрсеткіштен 5 еседен астам жоғарылаған. Мұндай динамика қазу жұмыстары көлемінің ұлғаюымен, карьер сатыларының тереңдеуімен және аршынды жыныстардың жинақталу қарқынының күшеюімен тікелей байланысты екенін көрсетеді (2-сурет).

Жалпы алғанда, 2015–2024 жылдар аралығында Ақбақай кен орнының батыс және шығыс бөліктерінде карьер аудандарының ұлғаюы мен қалдық үйінділердің кеңеюі тау-кен өндірісінің қарқын алғанын дәлелдейді.

2024 жылы алынған сынамалар бойынша Ақбақай кен орны аумағындағы топырақ үлгілерінде ауыр металдардың жалпы формаларының таралуы көрсетілген. Картада түстік градиация арқылы әр элементтің концентрация деңгейі бейнеленеді: ашық түстер төмен мәндерді, ал қанық қызыл түстер жоғары ластану аймақтарын сипаттайды. Жылжымалы формалардың басым бөлігі топырақтың жоғарғы қабаттарында шоғырланып, тереңдік артқан сайын азаятыны байқалады. Бұл техногендік әсердің ең алдымен беткі горизонттарға бағытталғанын көрсетеді (3-сурет).



Сурет 2. Карьер мен қалдық үйінділері аудандарының кеңею динамикасы.

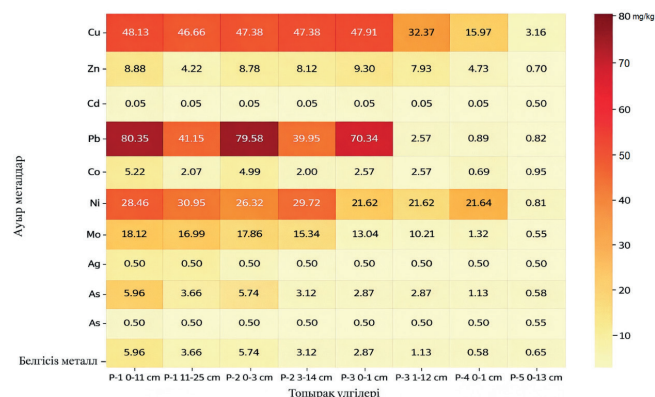
Figure 2. Dynamics of the Expansion of the Quarry and Waste Dump Areas.

Рис. 2. Динамика расширения территорий карьера и отвальных пород.

Ақбақай кен орны маңындағы өзара орналасуына сәйкес 6 қима бойынша қабаттық принциппен іріктелді

(0–2 см-ден 103 см тереңдікке дейін). Талдау нәтижелері ауыр металдардың негізінен топырақтың жоғарғы қабаттарында шоғырланатынын көрсетіп, олардың жинақталуы тау-кен өндірісінен туындайтын антропогендік әсермен байланысты екенін айқындады.

Молибденнің (*Mo*) мөлшері 5,34–18,12 мг/кг аралығында болып, салыстырмалы түрде төмен деңгейде сақталған. Күміс (*Ag*) барлық үлгілерде 0,5 мг/кг-дан аспай, экологиялық қауіп тудырмайды. Мышьяк (*As*) концентрациясы 0,38–5,96 мг/кг аралығында өзгеріп, кейбір учаскелерде шекті рұқсат етілген концентрациядан (ШРК) 2–3 есе артық екені анықталды. Жалпы алғанда, Ақбақай кен орны аумағында негізгі ластаушы элементтер ретінде қорғасын (*Pb*) мен мыс (*Cu*) ерекшеленеді. Бұл көрсеткіштер өнеркәсіптік, тау-кен жұмыстарының топырақ экожүйесіне тигізетін техногендік жүктемесінің жоғары екенін және бақылаудың маңыздылығын көрсетеді.



**Сурет 3. Топырақ үлгілеріндегі ауыр металдар концентрациясының жылжу картасы.**

**Figure 3. Map of spatial distribution of heavy metal concentrations in soil samples.**

**Рис. 3. Карта пространственного распределения концентрации тяжелых металлов в образцах почвы.**

Өртүрлі нүктелерде және екі тереңдік интервалында (0–20 см, 20–40 см) алынған топырақ үлгілеріндегі ауыр металдардың (*Cu*, *Zn*, *Cd*, *Pb*, *Co*, *Ni*, *Mo*, *Ag*, *As* және белгісіз металл) жалпы формаларының концентрациялары көрсетілген. График нәтижелері элементтердің топырақ профилі бойынша таралу сипатын мен олардың миграциялық қабілетін бағалауға мүмкіндік береді. Мыстың (*Cu*) мөлшері бойынша 2-нүктеде 0–20 см қабатта 3,542 мг/кг, ал 20–40 см қабатта 22,83 мг/кг жоғары мән тіркелген. Концентрацияның тереңдеген сайын артуы мыстың топырақтың төменгі горизонттарына жылжу үрдісінің бар екенін көрсетеді. Ұқсас заңдылық мырыш (*Zn*) үшін де байқалады: 2-нүктеде оның мөлшері 46,33 мг/кг (0–20 см) және 73,77 мг/кг (20–40 см) құрайды. Бұл мырыштың салыстырмалы түрде жоғары қозғалғыштығына және оның профиль бойымен миграцияға бейімділігіне байланысты.

Кадмийдің (*Cd*) жалпы формасы барлық үлгілерде 0,05 мг/кг-нан төмен болып, зерттелген аумақта оның ең аз таралған элемент екендігін көрсетеді. Бұл кадмийдің

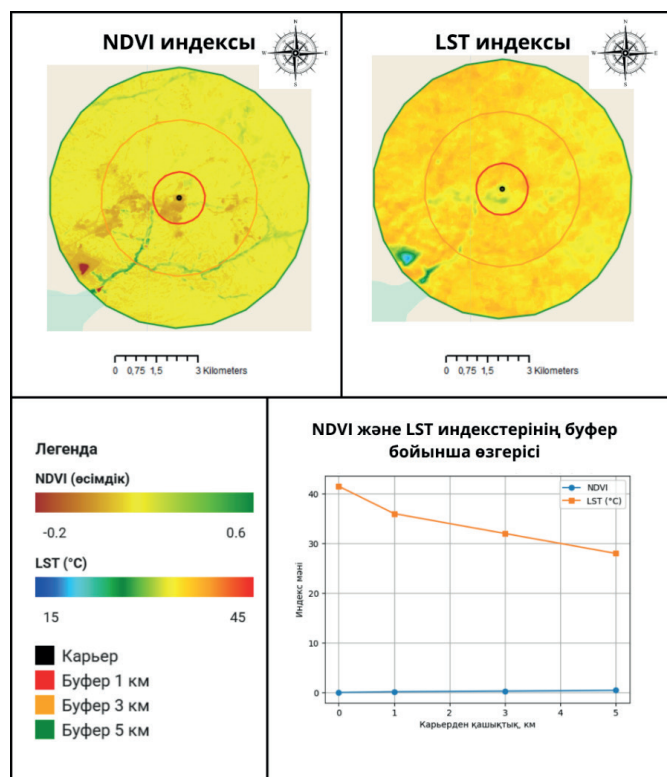
төмен миграциялық белсенділігін және экожүйе үшін салыстырмалы түрде қауіптілігінің төмендігін білдіреді. Қорғасын (*Pb*) бойынша да терең қабатта концентрацияның өсу үрдісі байқалады: 2-нүктеде 0–20 см қабатта 10,31 мг/кг, ал 20–40 см қабатта 14,96 мг/кг анықталған. Кобальттың (*Co*) мөлшері 2-нүктеде тиісінше 7,542 мг/кг және 9,704 мг/кг құрап, төменгі қабаттарда жинақталу бейімділігін көрсетеді. Никель (*Ni*) бойынша жоғары мәндер тіркелген: 20,71 мг/кг (0–20 см) және 25,15 мг/кг (20–40 см), бұл никельдің топырақ профилі бойынша біртіндеп миграцияланатынын дәлелдейді. Молибденнің (*Mo*) барлық үлгілердегі концентрациясы 1 мг/кг-нан төмен болып, оның топырақта әлсіз жиналатынын көрсетеді. Күміс (*Ag*) те 0,5 мг/кг-нан аспайды, сондықтан экологиялық тұрғыдан айтарлықтай қауіп тудырмайды. Мышьяк (*As*) бойынша көрсеткіштер өте төмен деңгейде сақталған, тек бір жағдайда 0–20 см қабатта 0,291 мг/кг мәні байқалады, бұл оның жекелеген нүктелерде ғана жинақталу мүмкіндігін көрсетеді.

Жалпы алғанда, диаграмма нәтижелері ауыр металдардың бірқатары (*Cu*, *Zn*, *Pb*, *Co*, *Ni*) үшін концентрацияның терең қабаттарда арту үрдісі бар екенін дәлелдейді. Бұл элементтердің топырақ ерітіндісі арқылы төмен қарай миграциялану қабілетін және топырақ профилі бойынша қайта таралуын сипаттайды. Ал *Cd*, *Mo*, *Ag* және *As* сияқты элементтер төмен деңгейде қалып, зерттелетін аумақтың экологиялық жағдайына айтарлықтай қауіп төндірмейді.

Ақбақай кен орны аумағы үшін есептелген NDVI және LST индекстерінің кеңістіктік таралуы көрсетілген. Картада карьердің орталық бөлігі, сондай-ақ 1 км, 3 км және 5 км буферлік аймақтар белгіленген, бұл тау-кен жұмыстарының қоршаған ортаға әсерін қашықтыққа байланысты бағалауға мүмкіндік береді. Өрбір индекс аумақтың экологиялық жағдайын әртүрлі қырынан сипаттай отырып, карьер қызметінің ландшафтқа, өсімдік жамылғысына және жер бетінің жылулық режиміне ықпалын кешенді түрде талдауға жағдай жасайды (4-сурет).

Ақбақай кен орны аумағында есептелген NDVI индексінің кеңістіктік таралуы тау-кен жұмыстарының өсімдік жамылғысына айқын әсерін көрсетеді. Карьердің орталық бөлігінде NDVI мәндері өте төмен деңгейде, шамамен -0,05–0,15 аралығында қалыптасқан. Бұл көрсеткіштер аумақтың жалаңаш таужыныстармен, техногендік беттермен және өсімдік жамылғысының толық немесе жартылай жойылуымен сипатталатынын білдіреді. Карьерден 1 км буферлік аймақ шегінде NDVI мәндері 0,15–0,25 аралығында өзгеріп, сирек әрі әлсіз дамыған өсімдіктердің бар екенін көрсетеді. Бұл тау-кен жұмыстарының әсерінен топырақ құрылымының бұзылуы, шаң-тозаңның жиналуы және ылғал режимінің нашарлауымен түсіндіріледі. 3 км буферлік аймақта NDVI көрсеткіштері 0,25–0,40 деңгейіне дейін жоғарылап, ал 5 км буферлік аймақта 0,40–0,55 және одан жоғары көрсеткіштермен сипатталып, бұл NDVI индексінің карьерден алыстаған сайын біртіндеп артуы тау-кен өндірісінің биологиялық ортаға теріс әсері кеңістіктік тұрғыда айқын байқалатынын дәлелдейді және оның әсер ету радиусы бірнеше километрге дейін созылатынын көрсетеді.





**Сурет 4. Ақбақай кен орнынан 1 км, 3 км және 5 км радиустағы буферлік аймақтарда NDVI мен LST индекстерінің таралуы.**

**Figure 4. Distribution of NDVI and LST indices within the 1 km, 3 km, and 5 km buffer zones surrounding the Akbakay Deposit.**

**Рис. 4. Распределение индексов NDVI и LST в буферных зонах радиусом 1 км, 3 км и 5 км вокруг месторождения Ақбақай.**

Ақбақай кен орны аумағы бойынша есептелген LST (Land Surface Temperature) индексінің кеңістіктік таралуы тау-кен жұмыстарының жер бетінің жылулық режиміне айтарлықтай ықпал ететінін көрсетеді. Карьердің орталық бөлігінде жер бетінің температурасы ең жоғары мәндермен сипатталып, шамамен 38–45 °C аралығында қалыптасқан. Бұл карьер аумағында өсімдік жамылғысының жойылуы және ашық тау жыныстары мен техногендік беттердің басым болуымен тікелей байланысты, себебі мұндай беттер күн радиациясын қарқынды сіңіріп, жылу-ды ұзақ сақтайды.

Карьерге жақын орналасқан 1 км буферлік аймақта LST мәндері 34–38 °C деңгейінде байқалып, температуралық контрастың айқын екендігін көрсетеді. 3 км буферлік аймақта жер бетінің температурасы біртіндеп төмендеп, 30–34 °C аралығында өзгереді, ал 5 км буферлік аймақта LST көрсеткіштері негізінен 26–30 °C шамасында қалыптасып, аумақтың жылулық режимі табиғи жағдайға жақындайды. Индекстің карьерден алыстаған сайын төмендеуі тау-кен жұмыстарының аумақтық микроклиматқа әсері айқын екенін және оның ықпалы бірнеше километр радиуста байқалатынын көрсетеді. Бұл жер бетінің жылулық теңгерімінің бұзылуы экожүйенің тұрақтылығына теріс әсер ететін маңызды факторлардың бірі екенін дәлелдейді.

Құрылған график тау-кен жұмыстарының әсері карьерден қашықтаған сайын біртіндеп әлсірейтінін көрсетті. Карьердің өзінде NDVI мәнінің теріс болуы және LST көрсеткіштерінің жоғары деңгейде байқалуы техногендік әсердің максималды екенін дәлелдейді. Карьерден алыстаған сайын NDVI мәндері тұрақты түрде өсіп, ал LST көрсеткіштері керісінше төмендейді, бұл өсімдік жамылғысының қалпына келе бастауы мен жер бетінің жылулық режимінің қалыпқа түсуін сипаттайды.

Жалпы алғанда, аталмыш кенорны аумағынан алынған топырақ сынамаларының нәтижелері, NDVI және LST индекстерін кешенді пайдалану Ақбақай карьерінің қоршаған ортаға әсерін жан-жақты бағалауға мүмкіндік береді. NDVI-дің төмендеуі өсімдік жамылғысының деградациясын, ал LST-дің жоғарылауы жер бетінің қызуын және микроклиматтың өзгеруін көрсетеді. Ал ішкі зертханалық осы зерттеу арақашықтықтары аумағындағы ластану көрсеткішін айқындап отыр. Бұл зерттеу нәтижелері тау-кен өндірісі жүргізілген аумақта экологиялық мониторинг жүргізудің маңыздылығын айқындайды.

### Қорытынды

Жүргізілген зерттеу Ақбақай кен орны аумағында тау-кен өндірісінің кеңістіктік тұрғыда айқын қарқын алғанын көрсетті. Көпұақыттық спутниктік суреттерді талдау нәтижесінде карьер ауданы шамамен 110 375 м<sup>2</sup>-ден 245 256 м<sup>2</sup>-ге дейін, ал қалдық үйінділері аумағы 29 968 м<sup>2</sup>-ден 162 432 м<sup>2</sup>-ге дейін ұлғайғаны анықталды. Карьер алаңдарының кеңеюі мен қалдық жыныстардың жиналу аумағының артуы техногендік жүктеменің күшейгенін көрсетеді.

Ішкі лабораториялық зерттеулер топырақ жамылғысында ауыр металдардың жинақталуы карьер қызметімен тікелей байланысты екенін дәлелдеді. Негізгі ластаушы элементтер ретінде **Cu**, **Zn**, **Pb**, **Co** және **Ni** анықталды. 2-нүктеде мыс концентрациясы 3,542–22,83 мг/кг, мырыш 46,33–73,77 мг/кг, қорғасын 10,31–14,96 мг/кг, никель 20,71–25,15 мг/кг аралығында тіркеліп, олардың бірқатарының терең қабаттарға қарай миграциялану үрдісі бар екені анықталды. **Cd**, **Mo**, **Ag** және **As** элементтерінің мөлшері төмен деңгейде қалып, экологиялық қауіп төндірмейтіні көрсетілді.

Лабораториялық нәтижелерді спутниктік деректермен салыстыру барысында есептелген NDVI және LST индекстері техногендік әсердің кеңістіктік заңдылықтарын нақтылады. Карьер аумағында NDVI мәндерінің -0,05–0,15 аралығында төмен деңгейде болуы өсімдік жамылғысының деградациясын сипаттай отырып, осы аумақта жер беті температурасының 38–45 °C-қа дейін жоғарылауымен қатар жүретіні анықталды. Керісінше, карьерден 5 км қашықтықтағы буферлік аймақта NDVI көрсеткіштерінің 0,40–0,55 аралығына дейін артуы өсімдік жамылғысының салыстырмалы түрде қалпына келгенін көрсетіп, сонымен бірге LST мәндерінің 26–30 °C-қа дейін төмендеуімен сәйкес келді. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер Ақбақай кен орнында тау-кен өндірісінің жер ресурстары мен экожүйе компоненттеріне кешенді теріс әсер еткенін көрсетіп, экологиялық мониторинг пен рекультивациялық шараларды күшейту қажеттігін негіздейді.



## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *United Nations Environment Programme (UNEP). Жер ресурстарының жаһандық келешегі (Global Land Outlook).* – Найроби: Біріккен Ұлттар Ұйымының Қоршаған орта бағдарламасы, 2017. – Б. 19–52 (ағылшын тілінде)
2. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Әлемдегі топырақ ресурстарының жағдайы.* – Рим: БҰҰ Азық-түлік және ауыл шаруашылығы ұйымы, 2015. – Б. 123–164 (ағылшын тілінде)
3. *World Bank. Тау-кен өндірісі және жердің деградациясы туралы есеп.* – Вашингтон, АҚШ: Дүниежүзілік банк, 2020. – Б. 25–40 (ағылшын тілінде)
4. Қашықтан зондтау арқылы бағаланған альбедо жаһандық құрғақ аймақтардағы экожүйенің көпфункционалдылығымен өзара байланысты / Y. Zhao [және т. б.] // *Journal of Arid Environments.* – 2018. Т. 157. – Б. 116–123 (ағылшын тілінде)
5. AbdelRahman M. A. E. ГАЗ және қашықтан зондтау деректерін пайдалана отырып жер деградациясы, шөлейттену және жерді тұрақты басқаруға шолу // *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali.* – 2023. – Т. 34. – Б. 767–808 (ағылшын тілінде)
6. Қазақстан Республикасының Экология және табиғи ресурстар министрлігі. Қазақстан Республикасындағы жер ресурстарының жай-күйі туралы ұлттық баяндама. – Астана, 2022. – Б. 32–38 (қазақ тілінде)
7. *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Қазақстан: экологиялық тиімділікке шолу.* – Париж: OECD баспасы, 2019. – Б. 60–65 (ағылшын тілінде)
8. *Қазгидромет. Климаттық деректер жинағы: Жамбыл облысы (2000–2023 жж.).* – Алматы, 2023. – Б. 11–14 (орыс тілінде)
9. *Google Earth Engine: планеталық ауқымдағы геокеңістіктік талдау / N. Gorelick [және т. б.] // Remote Sensing of Environment.* – 2017. Т. 202. – Б. 18–27 (ағылшын тілінде)
10. Кобегенова Х. Н., Шакенова Т. К. Қазақстан аумағында табиғи және антропогендік факторлардың әсерінен топырақ қасиеттерінің деградациясы // *Шолом-Алейхем атындағы Амур мемлекеттік университетінің хабаршысы.* – 2017. – № 3 (28). – Б. 32–38 (орыс тілінде)

## REFERENCES

1. *United Nations Environment Programme (UNEP). Global Land Outlook.* – Nairobi: United Nations Environment Programme, 2017. – P. 19–52 (in English)
2. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Status of the World's Soil Resources.* – Rome: FAO, 2015. – P. 123–164 (in English)
3. *World Bank. Mining and Land Degradation Report.* – Washington, DC: World Bank, 2020. – P. 25–40 (in English)
4. *Albedo Estimated from Remote Sensing Correlates with Ecosystem Multifunctionality in Global Drylands / Y. Zhao et al. // Journal of Arid Environments.* – 2018. – Vol. 157. – P. 116–123 (in English)
5. AbdelRahman M. A. E. An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications // *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali.* – 2023. – Vol. 34. – P. 767–808 (in English)
6. *Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan. National Report on the State of Land Resources of the Republic of Kazakhstan.* – Astana, 2022. – P. 32–38 (in Kazakh)
7. *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Environmental Performance Reviews: Kazakhstan.* – Paris: OECD Publishing, 2019. – P. 60–65 (in English)
8. *Kazgidromet. Sbornik klimaticheskikh dannyykh: Zhambylskaya oblast' (2000–2023 gg.) [Kazhydromet. Climate Data Collection: Zhambyl Region (2000–2023)].* – Almaty, 2023. – P. 11–14 (in Russian)
9. *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis / N. Gorelick et al. // Remote Sensing of Environment.* – 2017. – Vol. 202. – P. 18–27 (in English)
10. *Kobegenova H. N., Shakenova T. K. Degradatsiya svoystv pochvy v rezul'tate vozddeystviya prirodnnykh i antropogennykh faktorov na territorii Respubliki Kazakhstan [Soil Properties Degradation Due to Natural and Anthropogenic Factors in the Territory of the Republic of Kazakhstan]. Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleikheva [Bulletin of the Amur State University named after Sholom Aleichem].* – 2017. – No. 3 (28). – P. 32–38 (in Russian)

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде (UNEP). Глобальные перспективы земельных ресурсов (Global Land Outlook). – Найроби: Программа ООН по окружающей среде, 2017. – С. 19–52 (на английском языке)
2. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (FAO). Состояние мировых почвенных ресурсов. – Рим: ФАО ООН, 2015. – С. 123–164 (на английском языке)

3. World Bank. Отчет о горнодобывающей деятельности и деградации земель. – Вашингтон: Всемирный банк, 2020. – С. 25–40 (на английском языке)
4. Альбедро, рассчитанное по данным дистанционного зондирования, коррелирует с мультифункциональностью экосистем в глобальных засушливых регионах / Y. Zhao [и др.] // *Journal of Arid Environments*. – 2018. – Т. 157. – С. 116–123 (на английском языке)
5. AbdelRahman M. A. E. Обзор деградации земель, опустынивания и устойчивого управления земельными ресурсами с использованием ГИС и данных дистанционного зондирования // *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. – 2023. – Т. 34. – С. 767–808 (на английском языке)
6. Министерство экологии и природных ресурсов Республики Казахстан. Национальный доклад о состоянии земельных ресурсов Республики Казахстан. – Астана, 2022. – С. 32–38 (на казахском языке)
7. Organisation for Economic Co-operation and Development (ОЭСР). Обзор экологической эффективности: Казахстан. – Париж: Издательство ОЭСР, 2019. – С. 60–65 (на английском языке)
8. Казгидромет. Сборник климатических данных: Жамбылская область (2000–2023 гг.). – Алматы, 2023. – С. 11–14 (на русском языке)
9. Google Earth Engine: геопространственный анализ планетарного масштаба / N. Gorelick [и др.] // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – Т. 202. – С. 18–27 (на английском языке)
10. Кобегенова Х.Н., Шакинова Т.К. Деградация свойств почвы в результате воздействия природных и антропогенных факторов на территории Республики Казахстан // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. – 2017. – № 3 (28). – С. 32–38 (на русском языке)

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Жақыпбек Б.**, Ph.D доктор, О. А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), [y.zhakypbek@satbayev.university](mailto:y.zhakypbek@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0002-2474-9927>  
**Мусахан Н. Н.**, т. ғ. м., О. А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты, «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының ассистенті, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), [n.mussakhan@satbayev.university](mailto:n.mussakhan@satbayev.university); <https://orcid.org/0009-0009-5610-2712>  
**Жеткергенқызы Н.**, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, 8D07306 «Кадастр» білім беру бағдарламасының 1 курс докторанты (Алматы қ., Қазақстан), [zhetkergenkyzy\\_n@live.kaznu.kz](mailto:zhetkergenkyzy_n@live.kaznu.kz); <https://orcid.org/0009-0001-2174-8187>  
**Савут М.**, Ph.D доктор, Табиғи ресурстар және қоршаған орта ғылымдары колледжінің қауымдастырылған профессоры, Шыңжаң университеті (Үрімші қ., Қытай Халық Республикасы), [korkhat@xju.edu.cn](mailto:korkhat@xju.edu.cn); <https://orcid.org/0009-0004-9961-7381>

#### Information about the authors:

**Zhakypbek 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)  
**Mussakhan N. N.**, Master of Technical Sciences, Department of Mine Surveying and Geodesy of the Mining and Metallurgical Institute named after O. A. Baikonurov, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)  
**Zhetkergenkyzy N.**, 1st year doctoral student of the educational program 8D07306 «Cadastre», Kazakh National University named after al-Farabi (Almaty, Kazakhstan)  
**Sawut M.**, Ph.D, Associate Professor of the College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University (Urumqi, China)

#### Сведения об авторах:

**Жақыпбек Б.**, доктор Ph.D, профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)  
**Мусахан Н. Н.**, м. т. н., ассистент кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)  
**Жеткергенқызы Н.**, докторант 1 курса образовательной программы 8D07306 «Кадастр» Казахского национального университета имени аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан)  
**Савут М.**, доктор Ph.D, ассоциированный профессор Колледжа природных ресурсов и наук об окружающей среде Синьцзянского университета (г. Урумчи, Китайская Народная Республика)

## АКЫЛЖАН МАСЫМХАНОВИЧ БЕЙСЕБАЕВ к 90-летию со дня рождения

20 мая 2026 г. исполнилось бы 90 лет горному инженеру, доктору технических наук, профессору, академику НАН ВШ Казахстана и МАИН, иностранному члену Академии горных наук России Акылжану Масымхановичу Бейсебаеву.

Окончив в 1960 г. Казахский горно-металлургический институт по специальности «Разработка месторождений полезных ископаемых» А. М. Бейсебаев работал на шахте № 31 комбината «Карагандауголь» в должностях горного мастера и помощника начальника участка, ведущего специалиста по безопасности горных работ в управлении комбината.

В 1964 г. по приглашению академика А. С. Попова он возвращается в родной институт, где прошел путь от инженера взрывного полигона до заведующего кафедрой «Разрушение горных пород и шахтное строительство». При кафедре функционировали три научно-исследовательские лаборатории с общим штатом научных сотрудников более двухсот человек. Одна из них «Отраслевая лаборатория комплексной механизации взрывных работ (ОЛКМВР)» занималась разработкой технологий, машин и агрегатов, обеспечивающих безопасность взрывных работ на предприятиях цветной металлургии СССР и Казахской ССР. А. М. Бейсебаев более 20 лет был бессменным научным руководителем ОЛКМВР. Эта лаборатория стала основой ТОО «НПП «Интеррин», где он был долгое время научным руководителем.

Д. т. н. Бейсебаев А. М. прошел стажировку на горных предприятиях, заводах по изготовлению взрывчатых веществ (ВВ), в научно-исследовательских центрах Польши, Германии, Швеции, Канады, Монголии, Италии, закончил школу бизнеса Колумбийского университета (США).

Основные научные труды А. М. Бейсебаева посвящены безопасности и механизации взрывных работ, а также созданию новых взрывчатых веществ.

Многие годы профессор Бейсебаев А. М. сотрудничал с органами Госгортехнадзора СССР и Казахстана, в 1964–68 годах по заказу Госгортехнадзора СССР им проведены исследования по дальности разлета осколков при дроблении негабаритов накладными зарядами, результатом которых явилось изменение массы заряда с 10 до 20 кг, что было узаконено ЕПБВР. В 1977–80 годах он также по заданию Госгортехнадзора СССР провел типизацию зарядных устройств, что позволило сократить их номенклатуру с десятков типов до пяти.

Под руководством и при непосредственном участии д. т. н. Бейсебаева А. М. в СССР разработана комплексная механизация взрывных работ с обеспеченным серийным выпуском приборов, машин и оборудования. При этом разработана и внедрена система безопасности механизации взрывных работ и созданы их типовые схемы (проекты), по которым построены более 20 подземных и наземных минизаводов по приготовлению ВВ. Проведен большой цикл научно-исследовательских работ по приме-

нению механизации взрывных работ в условиях очень низких отрицательных температур, что позволило внедрить ее в Норильске, Заполярье и на северо-востоке СССР.

В результате проведенных в течение 11 лет успешных испытаний, профессору Бейсебаеву А. М. удалось доказать возможность обратного инициирования при механизированной зарядке. Это обстоятельство также внесено в ЕПБВР, обратное инициирование значительно повысило эффективность взрывных работ. Профессор Бейсебаев А. М. является автором двух новых казахстанских ВВ, не имеющих аналогов в мире по простоте приготовления и эффективности.

Д. т. н. Бейсебаев является одним из авторов и разработчиков концепции развития взрывного дела в Казахстане. На основе этой концепции создана и утверждена (1991 г.) Межгосударственная программа по обеспечению Казахстана собственными ВВ, выполнение этой программы позволило почти на 75 % обеспечить Казахстан ВВ.

Он являлся инициатором, одним из создателей и со дня образования заместителем председателя Межведомственного Совета по взрывному делу Республики Казахстан, органа, внесшего значительный вклад в обеспечение безопасности взрывных работ в Казахстане.

В 1968 г. А. М. Бейсебаев защитил кандидатскую, а в 1988 г. докторскую диссертацию, в 1989 г. ему присвоено ученое звание «профессор».

Профессор Бейсебаев А. М. впервые организовал подготовку в Казахстане инженеров-физиков (взрывников) и инженеров по специальности «Технология взрывчатых веществ», им также разработана методика сквозной практической подготовки студентов.

Широко известны методические работы профессора Бейсебаева А. М. по практической подготовке студентов. Он являлся автором типовой программы по проведению выработок для студентов геологических специальностей, был одним из разработчиков «Комплексной системы управления качеством подготовки специалистов (КСУКПС)» КазПТИ, ввел подготовку студентов горных и геологических специальностей по программе «Единая книжка взрывника».

Под руководством д. т. н. Бейсебаева А. М. защищено 2 докторских и 7 кандидатских диссертаций.





Им опубликовано более 200 научных работ, в том числе 22 монографии, два учебника, справочник и 40 изобретений (все его труды посвящены безопасности взрывных работ), некоторые его труды переведены на китайский, болгарский и польский языки. Среди его трудов есть сборник стихов и историко-художественная книга.

Профессор Бейсебаев А. М. активно занимался общественной работой, он был избран президентом общественного объединения «Центрально-Азиатский горно-промышленный союз (ЦАГС)», вся деятельность которого была направлена на поддержку отечественного недропользователя, он являлся одним из основателей и первым главным редактором «Горного журнала Казахстана».

За успехи в работе профессор Бейсебаев А. М. был награжден орденом «Знак почета» и четырьмя медалями СССР и Республики Казахстан, двумя знаками ЦК

ВЛКСМ, почетными знаками «Шахтерская слава» всех трех степеней, золотой медалью Всесоюзного общества «Знание», он являлся отличником высшего образования СССР, Почетным работником образования Казахстана, лауреатом премии Кабинета министров республики в области науки.

*Память об ученом и педагоге Бейсебаеве Акылжане Масымхановиче навсегда останется в истории горной науки Республики Казахстан, КазННТУ им. К. И. Сатпаева, его многочисленных учениках.*

***ТОО «НПП «Интеррин», горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова Satbayev University, ИГД им. Д. А. Кунаева, Международная Академия информатизации, редколлегия «Горного журнала Казахстана».***

## 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/?pl=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.