

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 28.02.2026 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)

Кожгозулов 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

Уенепеш А.М., ассоц. профессор (Оман)

® – статья на правах рекламы

Ⓜ – информационное сообщение

✍ – статья публикуется в авторской редакции

- 3 Колонка главного редактора
- 4 Тамбиев П.Г., Франк А.Э., Турдалиева А.С., Калкулов А.Б.  
Развитие эмульсионных взрывчатых веществ в Казахстане
- Геотехнология**
- 7 V. Demin, \*A. Zhumabekova, E. Abeuov, R. Mussin  
Efficient technology for the mineral reserves extraction in ore deposits development
- Разрушение горных пород**
- 12 Н.Б. Бахтыбаев, О.А. Абиль, \*К.Т. Атагелдиев, Е.Т. Нурбобоев  
Повышение качества буровзрывных работ для достижения оптимальной кусковатости взорванной горной массы на примере месторождения Жалын
- Геомеханика**
- 21 Ф.К. Низаметдинов, А.Р. Смагулов, \*А.И. Султанбекова, А.Р. Естаева  
Наблюдения за деформационными процессами откосов уступов и бортов карьера с помощью радиолокационных систем измерений
- 29 М.А. Байкенжин, \*Ж.Б. Рашид, Ш.А. Очилгов  
Физическое моделирование бесстоечной крепи во взаимодействии с окружающим массивом пород
- Геодезия**
- 36 А.А. Алтаева, \*Б.Б. Садықов, А. Акзамбекулы, Т.Е. Назыров  
Применение спутниковых и наземных методов для оценки осадочных процессов вблизи шахтных полей
- Геоинформатика**
- 43 O.D. Gavrilenko, Zh.T. Bagasharova, G.D. Berkinbayev, \*D.R. Nazyrova  
Application of Sentinel-2 spectral indices for remote mapping of ore mineralization in the deposits of East Kazakhstan
- Обогащение полезных ископаемых**
- 51 \*А.М. Шаханов, М.Б. Барменишинова  
Анализ современных методов опробования и экспресс-анализа продуктов флотационного обогащения медных руд
- Геоэкология**
- 56 N. Abdimalip, \*G. Toyshibekova, K. Baeshova, A. Adilbay  
Influence of geological conditions on formation of carbonate-hydrocarbonate waters of the Koskorgan reservoir
- 66 \*Д.К. Сунакбаева, Д.Х. Юлдашбек, К.У. Айтекова, Н.Ш. Омирзак  
Влияние антропогенного воздействия на содержание тяжелых металлов в почвах городов Туркестан и Кентау
- Страницы истории науки**
- 73 А.Б. Байбатиша, Б.Б. Амралинова, А. Нухулы, \*К.С. Тогизов  
Наследие академика К.И. Сатпаева – яркий вклад в науку Казахстана и пример для молодых ученых
- Юбилей**
- 78 К 70-летию Исаевой Людмилы Джандуйсеновны
- 80 Требования к оформлению и условия предоставления статей

## КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



**Марат  
Жакупович  
Битимбаев**  
*главный редактор*

*Уважаемая редколлегия!*

*Дорогие читатели!*

Я буду, как уверен, что недалек от истины, если буду утверждать об ожиданиях большинства населения нашей страны, связанных с республиканским референдумом 15 марта 2026 года по одобрению новой Конституции Казахстана.

Событие важнейшее, т. к., во-первых, каждая страна свою независимость, свою идентичность и особенность подтверждает Конституцией, во-вторых, конституционные нормы освещают миссию государства, фиксируя фундаментальные цели, принципы и мотивы принятия Конституции, отражая в ней исторический контекст.

В новой редакции Конституции, которая приходит на смену действующей в течение 30 лет, начиная с 1995 года, определен статус государства: Республика Казахстан признается демократическим, светским, правовым и социальным государством, высшими ценностями которого являются человек, его жизнь, права и свободы. В раздел с новым названием «Основные права, свободы и обязанности» внесены изменения, наиболее полно отражающие эти заложенные положения и усиливающие гарантии защиты прав человека.

Как говорит заместитель Председателя Конституционного суда Бакыт Нурмуханов, в указанном разделе заложены абсолютизация права на жизнь, человекоцентричность, закрепление неприкосновенности личности, защита персональных данных в цифровую эпоху и принципы правовой определенности.

В Конституции усиливаются также ценности брака и семьи, закрепляются обязанности защиты окружающей среды.

Остаются неизменными конституционные нормы об унитарности государства, а также о целостности, неприкосновенности и неотчуждаемости территории Казахстана.

Наша страна «окончательно расстается с суперпрезидентской формой правления и переходит к президентской республике с авторитетным, влиятельным парламентом», – заявил Касым-Жомарт Кемелевич на расширенном заседании правительства. Это заявление тоже является актуальным и знаковым.

В общем, мы все идем на референдум, обогащенные своевременными, демократическими и закрепляющими нашу социальную защищенность как обязанность государства. Если мы примем на референдуме новую Конституцию, мы вступаем на мировую арену с Народной Конституцией.

Это означает, что государственная политика в промышленности, инфраструктуре и строительстве государственных интересов должна выстраиваться вокруг интересов человека труда.

Такое содержание новой Конституции обязывает нас принять ее и жить по ее канонам.

## РАЗВИТИЕ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В КАЗАХСТАНЕ

*В горнодобывающей промышленности безопасность взрывных работ является ключевым фактором, определяющим эффективность и устойчивость технологических процессов. Современные тенденции направлены на создание взрывчатых веществ, которые обладают высокой степенью безопасности, экологичностью и удобством применения. Одним из перспективных направлений является развитие эмульсионных взрывчатых веществ, не содержащих традиционных чувствительных и экологически вредных компонентов.*

*Однако при практическом использовании ЭВВ возникает необходимость в повышении удобства монтажа и надежности заряжания, особенно в обводненных и глубоких скважинах. В ответ на эти запросы был разработан новый тип патронированного эмульсионного взрывчатого вещества **Петроген П** в жестком пластиковом картридже, который сочетает водоустойчивость, механическую прочность и удобство установки капсуля-детонатора.*

*Результаты применения **Петрогена П** на открытых и подземных горных работах показали его высокую надежность и экономическую эффективность. Разработка отечественного картриджа расширяет возможности безопасного и технологичного ведения взрывных работ в различных горно-геологических условиях.*

### Развитие эмульсионных взрывчатых веществ в Казахстане

В горнодобывающей промышленности уделяется большое внимание вопросам повышения безопасности выполнения взрывных работ, связанных с применением взрывчатых веществ (ВВ), чувствительных к механическим, тепловым и химическим воздействиям. Горняки и технологи-разработчики стремятся создать не только максимально безопасные и в известной степени универсальные по составу ВВ без использования в них взрывчатых и экологически вредных компонентов, но и удобные в использовании. Ввиду отсутствия взрывчатых компонентов в своем составе, эмульсионные взрывчатые вещества в полной мере отвечают требованиям безопасности и экологичности. Однако, в плане удобства применения у взрывного персонала возникают определенные требования. Традиционно в обводненных скважинах применяются пресованные тротиловые шашки-детонаторы с гнездом под капсуль-детонатор, которые обладают стабильными иницирующими характеристиками и тонут в воде скважины. Одновременно возникает потребность в более дешевых, отечественных решениях с сопоставимыми рабочими характеристиками. Эмульсионные же ВВ, как правило, патронируют в мягкую полимерную оболочку, при монтаже в которой необходимо сделать отверстие под капсуль-детонатор и петлю из волновода через патрон, чтоб зафиксировать в нем капсуль-детонатор. Не всегда это удается сделать оперативно и качественно.

Так, ТОО «НПП «Интеррин» с учетом требований и пожеланий взрывного персонала разработало отечественное эмульсионное патронированное взрывчатое вещество

**Петроген П** в картридже (жесткой пластиковой оболочке) диаметром 70 мм, имеющем отверстия для прохода волновода и ввода капсуля-детонатора. Благодаря этому не только сокращается время на монтаж патрона-боевика, но и исключается риск случайного извлечения капсуля-детонатора.

Общий вид картриджа **Петроген П** д.70 мм представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид картриджа Петроген П д.70 мм.

**Петроген П** – патронированное ЭВВ, предназначенное как для ручного, так и механизированного заряжания сухих и обводненных шпуров и скважин для взрывания на земной поверхности и в забоях подземных выработок, в которых либо отсутствует выделение горючих газов или взрывчатой угольной (сланцевой) пыли, либо применяется инертизация призабойного пространства, исключающая воспламенение взрывоопасной среды при взрывных работах, в том числе сульфидных руд в температурном диапазоне окружающей среды от минус 40 до плюс 40 °С.<sup>1</sup>

Физико-химические и взрывчатые показатели ЭВВ **Петрогена П** приведены в таблице 1.

<sup>1</sup> Тамбиев П.Г. Изготовление взрывчатых веществ из невзрывчатых компонентов и комплексная механизация взрывных работ: Алматы, 2015. С. 356–358

Таблица 1

**Физико-химические и взрывчатые показатели  
ЭВВ Петрогена П**

Наименование показателей	Значение показателей
Теплота взрыва, кДж/кг (ккал/кг)	3568 (853)
Кислородный баланс, %	-0,3
Объем газов, л/кг	824
Газовая вредность (количество ядовитых газов в пересчете на условную окись углерода), л/кг	23,5
Температура взрыва, К	3087
Полная идеальная работа взрыва, кДж/кг	3489,5
Тропиловый эквивалент	0,85
Скорость детонации, м/с, не менее	5500
Чувствительность к удару по ГОСТ 4545 - нижний предел, мм - частота взрывов, %	≥ 500 0
Чувствительность к трению, нижний предел, по ГОСТ Р 50835-95: кг/см <sup>2</sup> , (Мпа)	≥ 7000 (700)
Чувствительность к длительному трению: - наличие воспламенений	Отсутствуют
Критическая плотность, г/см <sup>3</sup>	1,28–1,3
Температура вспышки, °С	237,2

Благодаря таким преимуществам ЭВВ *Петроген П* в пластиковом корпусе с 2022 г. успешно применяется на открытых горных работах в АО «ССГПО», ТОО «Актюбинская медная компания» и АО «ГМК Казахалтын».

Кроме открытых горных работ, *Петроген П* в пластиковом корпусе полностью отвечает необходимым требованиям условий подземных горных работ, в частности заряжания восстающих скважин диаметром 89–115 мм. Благодаря прочному корпусу при заряжании глубоких скважин до 17 м, не нарушается целостность патрона-боевика, а наличие пластикового элемента в форме звездочки (похожим на парашют) (рис. 2) обеспечивает надежное удержание патрона в скважине.

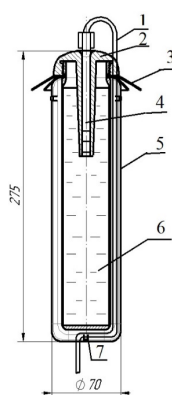
После проведения промышленных испытаний ТОО «Корпорация Казахмыс» в Казахстане и ОсОО «Kaz Minerals Vozymchak» Кыргызстане заменили штатный Аммонит 6ЖВ при заряжании восстающих скважин на своих подземных рудниках на *Петроген П* в пластиковом картридже.

Принципиальная схема патрона-боевика с применением пластикового картриджа представлена на рис. 3.

С учетом положительного опыта применения ЭВВ *Петроген П* д.70 мм в пластиковом картридже при добыче полезных ископаемых на открытых и подземных горных работах, проведена работа по внедрению ЭВВ *Петроген П* в пластиковом картридже при сейсморазведочных работах нефтяных месторождений. Согласно требованиям специалистов по сейсморазведке нефтяных месторождений, был разработан пластиковый корпус диаметром 50 мм (вес ВВ 500 гр) с возможностью увеличения заряда требуемого веса с помощью соединительной муфты. Сейсморазведка проходит не только на суше, но и в болотистых районах, и зачастую заряды могут находиться в воде



**Рис. 2. Пластиковый корпус с парашютом.**

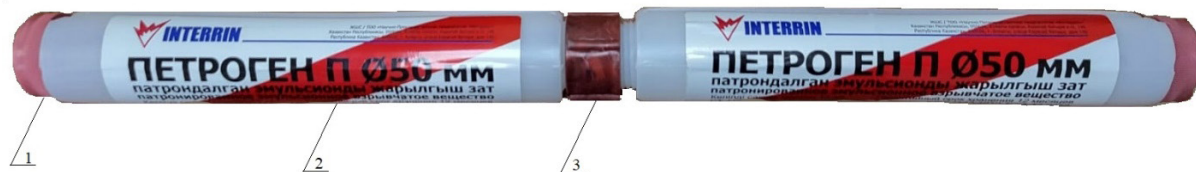


- 1 – волновод НСВ
- 2 – крышка с отверстием под КД
- 3 – парашют
- 4 – КД
- 5 – корпус картриджа с продольным желобом
- 6 – эмульсионное ВВ
- 7 – удерживающее кольцо

**Рис. 3. Схема патрона-боевика с применением пластикового картриджа.**

до 30 дней. Благодаря герметичности заряда, нахождение в воде такой длительный срок не является критическим, не происходит вымывание заряда, тем самым исключается воздействие на экологию.

Внешний вид ЭВВ *Петроген П* д. 50 мм в пластиковом картридже показан на рис. 4.



1 – крышка, 2 – корпус, 3 – соединительная муфта

Рис. 4. ЭВВ Петроген П д. 50 мм в пластиковом картридже.

Преимущества пластикового картриджа:

1. Удобство монтажа патрона-боевика: нет необходимости обвязывать и делать петлю на патроне. Картридж имеет специальное отверстие для капсуль-детонатора и удерживающее кольцо, через которое проводится волновод.

2. Сохраняется целостность оболочки, благодаря чему водостойчивость изделия не ограничена.

3. Отсутствуют риски случайного извлечения КД.

4. Прочный картридж обеспечивает надежное заряжание вертикальных скважин в подземных условиях.

5. Опционально снабжается парашютом для вертикальных скважин в подземных условиях.

6. Отсутствует прямой контакт человека с эмульсионным составом.

7. Исключена вероятность разрыва оболочки.

Таким образом, опыт применения показал, что упаковка эмульсионного ВВ в пластиковый картридж сочетает в себе необходимые эксплуатационные качества и экономические преимущества. Водостойчивость и повышенная скорость детонации способствуют стабильному иницированию основного заряда, а конструктивная совместимость с существующими элементами системы иницирования облегчает адаптацию на местах. Существенная экономия и отечественное производство делают продукт привлекательным для горных предприятий Казахстана и ближнего зарубежья.

15-17 апреля

ВК УФА ЭКСПО МЕНДЕЛЕЕВА, 158

УФА 2026

## УРАЛЬСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ. НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ

ВЫСТАВКА ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ «МЕРА»

ОРГАНИЗАТОРЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
СОБРАНИЕ-КУРУЛТАЙ  
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ,  
ЭНЕРГЕТИКИ И ИННОВАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



БАШКИРСКАЯ  
ВЫСТАВОЧНАЯ  
КОМПАНИЯ

По вопросам участия в выставке:  
8 (347) 246 41 77, +7 917 354 45 05  
mera@bvkexpo.ru

По вопросам участия в деловой программе  
8 (347) 246 42 85, +7 937 163 71 50  
kongress@bvkexpo.ru



umgforum.ru

Код МРНТИ 52.13.15

V. Demin, \*A. Zhumabekova, E. Abeuov, R. Mussin  
*Abylkas Saginov Karaganda Technical University (Karaganda, Kazakhstan)*

## EFFICIENT TECHNOLOGY FOR THE MINERAL RESERVES EXTRACTION IN ORE DEPOSITS DEVELOPMENT

**Abstract.** This article discusses the analysis of mining operations, a review of the literature, and how remaining ore is cleared in interchamber mines on the panel, taking into account the geomechanical and safety conditions. The goal is to create an effective technology for the development of ore deposits that ensure the completeness of mineral extraction when establishing the order and direction of mining pillars in the panel, based on determining the load on the pillars, for each lithological type of rocks that make up the overlying stratum. With the method indicated below, the completeness of the extraction of active reserves of the panel is increased while maintaining the stability of the outcrop. A resource-saving technology for the development of ore bodies is recommended, which ensures the complete extraction of mineral reserves from the subsoil.

**Key words:** technology, minerals, development, efficiency of underground mines, resource extraction, pillar, methodology calculation.

### Кен орындарын игеру кезінде пайдалы қазбалар қорларын тиімді өндіру технологиясы

**Аннотация.** Бұл мақалада тау-кен жұмыстарын талдау, әдебиеттерге шолу жасау, сондай-ақ геомеханикалық және қауіпсіздік жағдайларын ескере отырып, панельдегі шахтааралық шахталарда қалған кенді тазарту тәртібі зерттеледі. Мақсаты – бағаналарға түсетін жүктемені анықтауға негізделген панельдегі тау-кен бағаналарының тәртібі мен бағытын белгілеу кезінде пайдалы қазбаларды өндірудің толықтығын қамтамасыз ететін кен кен орындарын игерудің тиімді технологиясын жасау. Төменде көрсетілген әдіс кезінде ойпаттың тұрақтылығын сақтай отырып, панельдің белсенді қорларын алудың толықтығы ұлғайтылады. Жер қойнауынан пайдалы қазбалар қорларын толық өндіруді қамтамасыз ететін кен денелерін игерудің ресурс үнемдейтін технологиясы ұсынылады.

**Түйінді сөздер:** технология, пайдалы қазбалар, өндіру, жерасты кенішінің тиімділігі, қорларды игеру, кентірек, есептеу әдістемесі.

### Эффективная технология отработки запасов полезных ископаемых при разработке рудных залежей

**Аннотация.** В данной статье рассматривается анализ работы горнодобывающих предприятий, обзор литературы и вопрос о том, как происходит расчистка оставшейся руды в межкамерных шахтах на панели с учетом геомеханической обстановки и с соблюдением техники безопасности. Целью является создание эффективной технологии разработки рудных месторождений, обеспечивающих полноту извлечения полезных ископаемых при установлении порядка и направления отработки целиков в панели, на основе определения нагрузки на целики, для каждого литологического типа горных пород, слагающих налегающую толщу. При указанном ниже способе повышается полнота извлечения активных запасов панели с сохранением устойчивости обнажения. Рекомендуется ресурсосберегающая технология разработки рудных тел, обеспечивающая полноту извлечения запасов полезных ископаемых из недр.

**Ключевые слова:** технология, полезные ископаемые, разработка, эффективность подземных рудников, извлечение запасов, целик, методика расчета.

### Introduction

At present, the issues and tasks of rational use of all available mining, geological and technological resources for maintaining the required level of efficiency of underground mines are becoming increasingly relevant. At the same time, one of the most important reserves for increasing the efficiency of mine development should be considered the most complete extraction of reserves due to the subsequent extraction of the remaining pillars. A common system for developing horizontal and inclined ore deposits is the room-and-pillar system of development with subsequent extraction of pillars (repeated mining) [1]. The system is highly productive, however, characterized by significant drawbacks: ore losses in the panel as a whole reach 20 ... 40%, which increase under conditions of increased rock pressure, due to premature collapse of the roof and pillars. The main structural elements in the room-and-pillar system of development are the ceiling (roof of the chamber) and the pillar. Despite the large volume of theoretical and experimental studies on the assessment of the stress state of structural elements of the development system, there is still no final scientifically based approach to the effective design of technological parameters for the development of ore deposits. The generally accepted method for calculating the parameters of the development system [2] is the calculation of the parameters of the pillars and spans of the stopes depending on the depth of development and on the basis of empirical dependencies obtained at specific deposits, which is not always applicable to other similar deposits. Even taking into account the fact that the mining and geological conditions at one deposit can change to the same extent, and the use of the parameters of rock sliding from one section of the deposit to another section can lead to an increase or decrease in the magnitude of the load

acting on the pillars. This, accordingly, leads to an increase or decrease in the size of the pillars, loss of minerals, imbalance of the geomechanical structure «pillar – roof» and its collapse. Therefore, the problem of increasing the efficiency of ore deposit development, taking into account the stress-strain state of the massif to ensure the complete extraction of minerals, is an important task from a practical and scientific point of view, the solution of which allows reducing the costs per unit of extracted mineral [3].

The creation and improvement of mineral deposit development technology, optimization of their parameters and control of rock pressure are the subjects of research by many scientists. But despite this, the task of creating and improving mineral deposit development technology remains very relevant [4].

### Materials and Methods

Analysis of the work of mining enterprises and specialized literature shows that when developing deposits in complex mining and geological conditions, significant losses of minerals often occur, reaching 20–30% or more of the explored reserves. For the development of flat and inclined ore deposits, open stope systems are widely used. The use of the room-and-pillar system during its use has led to an improvement in the parameters of breaking and an increase in technical and economic indicators. However, when designing key elements of the system, such as extraction panels, outcrop sizes, parameters of inter-chamber and inter-floor targets that perform the function of load-bearing elements to retain pressure, the reasons are insufficiently observed in complex mining and geological conditions. It follows from this that in areas developed by the underground method, collapse chambers are used, which, as a rule, with the destruction reaching the surface [5].

Based on the conducted analysis and review of the state of the issue, a goal has been formulated aimed at creating an effective technology for the development of ore deposits that ensure the complete extraction of minerals by establishing the order and direction of the development of pillars in a panel, based on determining the load on the pillars, for each lithological type of rocks that make up the overlying strata.

In gentle and sloping (up to 30–35°) deposits contain large reserves of non-ferrous metal ores. Such deposits are mined using systems with open mined space, with caving of overlying rocks and, less frequently, with backfilling of the mined space, including hardening mixtures. The most widespread of these systems are room-and-pillar and pillar with caving of overlying rocks [6].

The authors [7] propose a method for developing gently dipping ore deposits, the essence of which is as follows: mine fields are developed with a bench-like front, and the leading bench is developed in alignment with the cutting line of the barrier pillar. The pillar is developed together with the development of mine fields. The sections of mine fields between the front of the cleaning works and the barrier are completely relieved from rock pressure by workings. According to the safe level of stress, the width of the barrier pillar within the next bench is adjusted and the mine fields and the pillar are developed. The mined-out space is filled with hardening mixtures.

A method is also known [8], which includes the development of panel reserves with the formation of belt inter-chamber pillars, the width of which is equal to the drilling width of a self-propelled drilling machine from one of its installations, the filling of the worked-out space of the chambers with hardening mixtures, the extraction of belt inter-chamber pillars and the filling of the newly formed worked-out space between adjacent filled chambers. With this method, the completeness of the extraction of active reserves of the panel is increased while maintaining the stability of the outcrop. The main disadvantage of this method is the filling of the worked-out space.

## Results and discussion

### *Recommendations for efficient technology for the development of reserves during the development of ore deposits.*

When developing ore deposits using the underground chamber-and-pillar method, the development involves leaving supporting inter-chamber pillars. In the event of destruction of the inter-chamber pillars, the resulting collapse of the overlying strata may cause dangerous deformation of the earth's surface.

Complete extraction of mineral reserves is possible with reliable provision of safety of mining operations and improvement of development technology. The required maximum productivity of the panel can be provided by a room-and-pillar mining system using self-propelled equipment. In this case, technological losses are formed due to leaving inter-chamber and barrier pillars.

Quantitative and qualitative indicators of ore extraction from the subsoil depend on the correctly selected parameters of the development system. They can be improved by increasing production costs. Therefore, the requirement for the development system is that the sum of the reduced costs and economic damage from losses and dilution of the ore be minimal.

Efficient development of mineral reserves during the development of ore deposits was considered using the example of an underground mine, where more than 20 million tons of ore have been developed to date, which has led to the formation of large voids, and some of the ore reserves remained in the inter-chamber pillars (ICP). In order to maintain a stable geomechanical state, it is advisable to begin developing the remaining inter-chamber pillars and to fill the formed voids by caving. Repeated development of ore reserves left in the ICP makes it possible to increase the completeness of the extraction of panel reserves.

A two-stage extraction of the mineral is recommended. The first stage involves the extraction of ore reserves using a room-and-pillar mining system, leaving barrier pillars along the panel boundaries. The second stage involves the extraction of inter-chamber pillars from the open working space, with the collapse of the overlying rocks as they are mined.

Before re-mining, it is necessary to inspect the panels to clarify the geomechanical situation, prevent accidents and warn about the collapse of weakened and unstable pillars. After studying the design documentation and carefully inspecting all the ICP panels, conclusions are made and recommendations for re-mining are issued.

The loads on the ICP are calculated taking into account the sub-arch load formed above the panel area and between the barrier pillars, according to the proposed method (Figure 1).

From the above sequence of panel reserves development it follows that the ore reserves left in the inter-chamber and belt pillars are temporarily inactive reserves. The volumes of these reserves can be determined by the following formula [9]:

$$R_{int} = \gamma h \left[ K_{sq} \frac{\pi d^2}{4} q_{inchp} + (K_{sq} - 1)(l_{sq} B_{sq} - l_{cut} B_{cut} K_{cut}) \right],$$

Where:

$\gamma$  – ore density, t/m<sup>3</sup>;

$h$  – deposit thickness, m;

$K_{sq}$  – number of squares, pcs;

$d$  – diameter of the inter-chamber pillar, m;

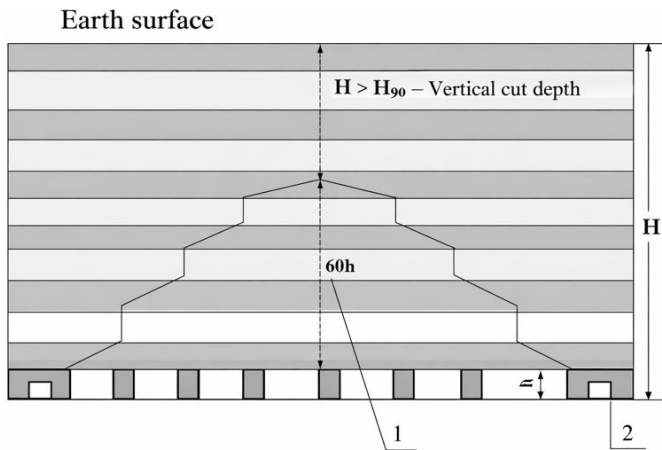
$q_{inchp}$  – number of interchamber pillars, pcs;

$l_{bp}, B_{bp}$  – respectively the length and width of the belt pillar, m;

$l_{cut}, V_{cut}$  – respectively the length and width of the cut, m;

$K_{cut}$  – number of cuts, pcs.

For this purpose, geotechnical monitoring is carried out [10–12], including: seismic assessment of the processes of deformation and destruction of rocks in the rock mass; instrumental observations of the roof behavior; visual monitoring of the state of the working faces and adjacent workings. Seismic monitoring is carried out based on the observation network of the ISSI seismic monitoring system (South Africa). This system includes aboveground and underground parts, which ensures control over the geomechanical situation in all areas of development, including re-development, with the ability to promptly respond to any changes. Instrumental monitoring includes the installation of displacement sensors for the anal-



**Figure 1. Rework stage:** 1 – the contour of the arch formed between the barrier pillars; 2 – barrier sight; H – depth of the deposit; h – thickness of the deposit

**Сурет 1. Қайта өңдеу кезеңі:** 1 – тосқауыл кентірек арасында түзілетін күмбез контуры; 2 – тосқауыл кентірек; H – кен орнының жату тереңдігі; h – кен орнының қуаты.

**Рис. 1. Стадия повторной отработки:** 1 – контур свода, образуемый между барьерными целиками; 2 – барьерный целик; H – глубина залегания залежи; h – мощность залежи.

ysis of the quantum-deformed state of the rock mass, which allows for the timely detection of potential collapse zones and the adoption of measures to localize them. Visual monitoring of indicators by linear supervision is aimed at periodic assessment of changes in the state of the roof, barrier, inter-chamber and signal targets, as well as monitoring the state of the mined-out space to ensure safe working conditions.

All of the above activities are aimed at effectively conducting reprocessing without unnecessary losses of stocks in the ICP while observing safety regulations.

*The significance of the research conducted*

The justification and improvement of technological solutions for the panel-and-pillar mining system based on changes in the structural elements of the system and the optimization of their parameters, ensuring efficiency and completeness of the extraction of ore reserves, is a significant task for mining enterprises using this development system.

*Usefulness of the results*

Increased recovery of the deposit’s reserves is achieved through the implementation of a technology based on dividing the mining area into squares using strip pillars. The size of the square’s side corresponds to the distance between the inner walls of the barrier pillars, allowing for targeted redistribution of the load on the structural elements of the mining system.

Unlike traditional methods, the diameter of the inter-chamber pillars within the squares is determined taking into account the sub-arch load formed over the area of the square and between the barrier pillars, according to the proposed method.

An increase in the completeness of mineral extraction is also achieved by mining inter-chamber pillars under condi-

tions of controlled collapse within a limited area of the panel within each square.

Preliminary caving within a square provides the opportunity to develop barrier pillars from the adjacent side of the neighboring square, using the resulting clearing space.

Optimization of losses and reduction of dilution of mined ore are achieved by regulating the size of squares and the value of the permissible sub-arch load.

*Informativeness of the conducted research*

The proposed solution to the current scientific and technical problem of increasing the efficiency and safety of extraction of flat ore deposits by creating process flow charts based on new principles of designing development systems can be useful for mining industry specialists, mining scientists, as well as doctoral students, master’s students, and students majoring in «Mining».

*Practical significance of the results*

A new method for mining reserves within a panel has been developed, allowing for ore extraction without the need for backfilling, which significantly reduces mineral losses in inter-chamber pillars and increases the completeness of reserve recovery.

The developed technological solutions take into account the important relationship between economic efficiency and environmental safety. This is achieved through the rational use of underground space, the reduction of manual labor intensity, the development of geotechnologies, compliance with anthropogenic impact regulations, the use of recycled resources and substitute materials, and the mitigation of potential negative consequences.

It has been established that by pre-demolishing the supporting pillars and then controlled roof collapse to a predetermined height, it is possible to effectively remove barrier pillars from the cleared space of adjacent panels. With proper field preparation, this technology can also be used for subsequent removal of supporting pillars.

*Recommendations for implementation*

The proposed research results are recommended for use in the development of medium-thickness ore deposits using room-and-pillar and panel-and-pillar mining systems to increase the completeness of extraction of mineral reserves.

**Conclusion**

A resource-saving technology for the development of ore bodies is recommended, ensuring the complete extraction of mineral reserves from the subsoil.

The results of the implementation of the recommended technology make it possible to increase the level of industrial safety at mining enterprises and create prerequisites for an economical technology for the development of ore deposits in order to increase the completeness of mineral extraction.

**Acknowledgments**

*This article has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992803 «Development of a rational technology for conducting mine workings based on the impact on the technogenic state of the host rock mass»).*

## REFERENCES

1. Zamesov N.F. et al. *Razvitie intensivnykh metodov dobychi rud na bol'shikh glubinakh* [Development of intensive methods for ore mining at great depths]. Moscow: IPKON RAN SSSR, 1990. 236 p. (in Russian)
2. Freydin A.M., Neverov A.A., Neverov S.A. *Podzemnaya razrabotka rudnykh mestorozhdeniy* [Underground development of ore deposits]. Novosibirsk: IGD SO RAN, NGU, 2012. 235 p. (in Russian)
3. Borsh-Komponiets V.I., Makarov A.B. *Gornoe davlenie pri otrabotke moshchnykh pologikh rudnykh zalezhiy* [Rock pressure during mining of thick flat ore bodies]. M.: Nedra, 1986. 167 p. (in Russian)
4. Kurlenya M.V., Eremenko A.A., Shrepp B.V. *Geomekhanicheskie problemy razrabotki zhelezorudnykh mestorozhdeniy Sibiri* [Geomechanical problems of iron ore deposit development in Siberia]. Novosibirsk: Nauka, 2001. 184 p. (in Russian)
5. Ort V.G. *Osobennosti obrazovaniya poter' i razubozhivaniya pri razrabotke pologikh i naklonnykh zalezhiy s primeneniem samokhodnogo oborudovaniya* [Features of ore loss and dilution in mining of flat and inclined deposits using self-propelled equipment], *Gornyy zhurnal* [Mining Magazine]. 1979. No. 3. 28–32 pp. (in Russian)
6. A.s. SSSR. *Sposob razrabotki pologopadayushchikh rudnykh zalezhiy* [Method for developing gently dipping ore bodies]. No. 1784063; opubl. 1992 (in Russian)
7. *Issledovanie i sovershenstvovanie sistem razrabotki naklonnykh i krutopadayushchikh zalezhiy* [Study and improvement of systems for inclined and steep ore body mining], report No. 27-81-05. *ZhNIPICvetmet, Zhezkazgan*, 1982. 235 p. (in Russian)
8. Sabdenbekuly O., Lyan O.V., Alpyspaev K.A., Abeuov E.A. *Geomekhanicheskoe obosnovanie tekhnologii snizhayushchey poteri pri vyemke zapasov zalezhiy na niznikh gorizontakh* [Geomechanical justification of loss-reducing technology during extraction at lower levels], *Materialy NTK, posvyashchennoy 100-letiyu akademika K.I. Satpayeva* [Materials of the Scientific and Technical Committee dedicated to the 100th anniversary of Academician K.I. Satpayev], *Zhezkazgan*, 1999. 206–210 pp. (in Russian)
9. *Kontseptsiya povtornoй otrabotki zapasov mestorozhdeniya Zhaman-Aybat rudnik «Zhomart-1»* [Concept of re-mining the reserves of the Zhaman-Aibat deposit, 'Zhomart-1' mine]. *Almaty*, 2012. 145 p. (in Russian)
10. *Experimental study on the mechanical behavior of rocks under preserved geological conditions at various depths* / Xie H. [et al.] // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021. 138 p. (in English)
11. Malkovski P., Nedbalski Z. *Comprehensive geomechanical method for assessing rockburst hazards in underground mining* // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020. V. 30 (3). 345–355 pp. (in English)
12. Toderash M. *Brief overview of rock pressure and its manifestations in underground mining* // *Chronicle of Mining at Petroshan University*. 2023. 13–30 pp. (in English)

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Замесов Н.Ф. және т. б. *Үлкен тереңдікте кен өндірудің интенсивті әдістерін жасау*: М.: КСРО РФА ИПКОН, 1990. 236 б. (орыс тілінде)
2. Фрейдин А.М., Неверов А.А., Неверов С.А. *Кенді кен орындарын жерасты өндіру*: Новосибирск: РФА ИГД СБ, НМУ, 2012. 235 б. (орыс тілінде)
3. Борщ-Компониет В.И., Макаров А.Б. *Қалың жазық кен орындарын игеру кезіндегі тау жыныстарының қысымы*: М.: Недра, 1986. 167 б. (орыс тілінде)
4. Курленя М.В., Еременко А.А., Шрепп Б.В. *Сібірдегі темір кен орындарын игерудің геомеханикалық мәселелері*: Новосибирск: Ғылым, 2001. 184 б. (орыс тілінде)
5. *Орт В.Г. Өздігінен жүретін жабдықты пайдалана отырып, жазық және көлбеу кен орындарын игеру кезінде шығын мен сұйылтудың қалыптасу ерекшеліктері* // *Тау-кен журналы*. 1979. № 3. Б. 28–32 (орыс тілінде)
6. А.с. КСРО. *Кенді жұмсақ кен орындарын игеру әдісі*. № 1784063; баспа. 1992 (орыс тілінде)
7. *Көлбеу және тік шөгінділерді игеру жүйелерін зерттеу және жетілдіру*: есеп № 27-81-05. *ЖНИПИЦветмет, Жезқазған*, 1982. 235 б. (орыс тілінде)
8. Сабденбекұлы О., Лян О.В., Алпыспаев Қ.А., Әбеуов Е.А. *Төменгі горизонттағы кен орындарынан қорларды өндіру кезінде ысыраптарды азайту технологиясының геомеханикалық негіздемесі* // *Академик Қ.И. Сәтбаевтың 100 жылдығына арналған ФТК материалдары, Жезқазған*, 1999. Б. 206–210 (орыс тілінде)
9. *Жаман-Айбат кен орнының қорларын қайта өңдеу тұжырымдамасы, Жомарт-1 кеніші*: Алматы, 2012. 145 б. (орыс тілінде)
10. *Әртүрлі тереңдікте геологиялық жағдайларды сақтау кезінде тау жыныстарының механикалық қасиеттерін эксперименттік зерттеу* / Се Х. [және т. б.] // *Тау жыныстары механикасы және тау-кен ғылымдары халықаралық журналы*. 2021. Б. 138 (ағылшын тілінде)
11. *Малковски П., Недбальски З. Жерасты тау-кен жұмыстары кезінде тау соққысының қаупін бағалаудың кешенді геомеханикалық әдісі* // *Тау-кен ғылымы және техникасы халықаралық журналы*. 2020. Т. 30 (3). Б. 345–355 (ағылшын тілінде)

12. Тодераш М. Жерасты тау-кен жұмыстары кезіндегі тау жыныстары қысымының көрініс беру режимі туралы қысқаша шолу // Петрошани университетінің тау-кен ісі шежіресі. 2023. Б. 13–30 (ағылшын тілінде)

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Замесов Н.Ф. и др. Развитие интенсивных методов добычи руд на больших глубинах: М.: ИПКОН РАН СССР, 1990. 236 с. (на русском языке)
2. Фрейдин А.М., Неверов А.А., Неверов С.А. Подземная разработка рудных месторождений: Новосибирск: ИГД СО РАН, НГУ, 2012. 235 с. (на русском языке)
3. Борщ-Компонице В.И., Макаров А.Б. Горное давление при отработке мощных пологих рудных залежей: М.: Недра, 1986. 167 с. (на русском языке)
4. Курлень М.В., Еременко А.А., Шрепп Б.В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири: Новосибирск: Наука, 2001. 184 с. (на русском языке)
5. Орт В.Г. Особенности образования потерь и разубоживания при разработке пологих и наклонных залежей с применением самоходного оборудования // Горный журнал. 1979. № 3. С. 28–32 (на русском языке)
6. А.с. СССР. Способ разработки пологопадающих рудных залежей. №1784063; опубл. 1992 (на русском языке)
7. Исследование и совершенствование систем разработки наклонных и крутопадающих залежей: отчет №27-81-05. ЖНИПИЦветмет, Жезказган, 1982. 235 с. (на русском языке)
8. Сабденбеколы О., Лян О.В., Алпыспаев К.А., Абеуов Е.А. Геомеханическое обоснование технологии снижающей потери при выемке запасов залежей на нижних горизонтах // Материалы НТК, посвященной 100-летию академика К.И. Сатпаева, Жезказган, 1999. С. 206–210 (на русском языке)
9. Концепция повторной отработки запасов месторождения Жаман-Айбат рудник «Жомарт-1»: Алматы, 2012. 145 с. (на русском языке)
10. Экспериментальное исследование механического поведения горных пород при сохранении геологических условий на различных глубинах / Се Х. [и др.] // Международный журнал механики горных пород и горных наук. 2021. С. 138 (на английском языке)
11. Малковски П., Недбальски З. Комплексный геомеханический метод оценки опасности горных ударов при подземных горных работах // Международный журнал горной науки и техники. 2020. Т. 30 (3). С. 345–355 (на английском языке)
12. Тодераш М. Краткий обзор горного давления и режима его проявления при подземных горных работах // Летопись горного дела Университета Петрошани. 2023. С. 13–30 (на английском языке)

**Information about the authors:**

- Demin V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Development of Mineral Deposits», NJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan), [vladfdemin@mail.ru](mailto:vladfdemin@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1718-856X>  
**Zhumabekova A.**, Ph.D, acting docent of the Department «Development of Mineral Deposits», NJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan), [aila1980@mail.ru](mailto:aila1980@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1501-5382>  
**Abeuov Ye.**, Cand. techn. sciences, senior teacher of the Department «Development of Mineral Deposits», NJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan), [erkebulan69@mail.ru](mailto:erkebulan69@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6420-565X>  
**Mussin R.A.**, Ph.D, Associate Professor of the Department «Development of Mineral Deposits», NJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan), [R.A.Mussin@mail.ru](mailto:R.A.Mussin@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1206-6889>

**Авторлар туралы мәліметтер:**

- Демин В.Ф.**, техн. ғылым. докторы, «Пайдалы қазбалар кен орындарын игеру» кафедрасының профессоры, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ (Қарағанды қ., Қазақстан)  
**Жұмабекова А.Е.**, Ph.D докторы, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ «Пайдалы кен орындарын қазып өндіру» кафедрасының доцент м. а. (Қарағанды қ., Қазақстан)  
**Абеуов Е.А.**, техн. ғылым. канд., «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ «Пайдалы кен орындарын қазып өндіру» кафедрасының аға оқытушысы (Қарағанды қ., Қазақстан)  
**Мусин Р.А.**, Ph.D докторы, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ «Пайдалы кен орындарын қазып өндіру» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Сведения об авторах:**

- Демин В.Ф.**, д. т. н., профессор кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)  
**Жұмабекова А.Е.**, Ph.D, и. о. доцента кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)  
**Абеуов Е.А.**, к. т. н., ст. преподаватель кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)  
**Мусин Р.А.**, Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан)

Код МРНТИ 52.13.21

Н.Б. Бахтыбаев<sup>1</sup>, О.А. Абыль<sup>1</sup>, \*К.Т. Атагелдиев<sup>2</sup>, Е.Т. Нурбобоев<sup>3</sup><sup>1</sup>ТОО «Mining Research Group» (г. Караганда, Казахстан),<sup>2</sup>НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова»

(г. Караганда, Казахстан),

<sup>3</sup>Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова

(г. Ташкент, Узбекистан)

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КУСКОВАТОСТИ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖАЛЫН

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований, направленных на повышение качества буровзрывных работ для достижения оптимальной кусковатости взорванной горной массы на примере угольного месторождения Жалын. Проведен комплексный анализ с использованием сейсмографов ZET 7152-N и программного обеспечения WipFrag. Результаты показали, что при высокой плотности зарядов и уменьшении шага скважин достигается минимальный средний размер кусков, тогда как для крупных блоков наблюдается рост доли негабарита. Разработаны рекомендации по применению поправочных коэффициентов удельного расхода ВВ на основе моделей Кутузова Б.Н. и KUZ-RAM, что позволит оптимизировать расход ВВ, улучшить фрагментацию и снизить сейсмическое воздействие.

**Ключевые слова:** буровзрывные работы, кусковатость горной массы, удельный расход взрывчатых веществ, сейсмический мониторинг, WipFrag, модель KUZ-RAM, скорость колебаний частиц, фрагментация, месторождение Жалын.

### Жалын кенорны мысалында жарылған тау жыныстарының оңтайлы ірілігіне қол жеткізу үшін бұрғы-жарылыс жұмыстарының сапасын арттыру

**Аннотация.** Мақалада Жалын көмір кенорнының мысалында жарылған тау-кен массасының оңтайлы кесектілігіне қол жеткізу үшін бұрғы-жарылыс жұмыстарының сапасын арттыруға бағытталған зерттеулердің нәтижелері келтірілген. ZET 7152-N сейсмографтары мен WipFrag бағдарламалық жасақтамасын қолдана отырып кешенді талдау жүргізілді. Нәтижелер көрсеткендей, зарядтардың жоғары тығыздығы мен ұңғымалар қадамының азаюы кезінде кесектердің минималды орташа өлшеміне қол жеткізіледі, ал ірі блоктар үшін габариттен тыс фракция үлесінің артуы байқалады. Б.Н. Кутузов және KUZ-RAM модельдерінің негізінде Жарылғыш зат (ЖЗ) үлестік шығынының түзету коэффициенттерін қолдану бойынша ұсыныстар әзірленді, бұл ЖЗ шығынын оңтайландыруға, фрагментацияны жақсартуға және сейсмикалық әсерді азайтуға мүмкіндік береді.

**Түйінді сөздер:** бұрғылау-жарылыс жұмыстары, тау жыныстарының кесектелінуі, жарылғыш заттардың мөңгікті шығыны, сейсмикалық мониторинг, WipFrag, KUZ-RAM моделі, жарылыс параметрлерін оңтайландыру, фрагментация, Жалын кенорны.

### Improving the quality of drill-and-blast operations to achieve optimal rock fragmentation: a case study of the Zhalyin deposit

**Abstract.** The article presents the results of research aimed at improving the quality of drilling and blasting operations to achieve optimal fragmentation of the blasted rock mass, using the Zhalyin coal deposit as a case study. A comprehensive analysis was conducted using ZET 7152-N seismographs and WipFrag software. The results showed that a minimum average fragment size is achieved with high charge density and reduced borehole spacing, whereas an increase in the oversize fraction is observed for large blocks. Recommendations for applying correction factors for the specific consumption of explosives were developed based on the Kutuzov B.N. and KUZ-RAM models. These recommendations will make it possible to optimize explosive consumption, improve fragmentation, and reduce seismic impact.

**Key words:** drill-and-blast operations, rock fragmentation, specific explosive consumption, seismic monitoring, WipFrag, KUZ-RAM model, particle vibration velocity, fragmentation, Zhalyin deposit.

Буровзрывные работы (БВР) являются основным способом дробления горной массы в горнодобывающей промышленности. Они напрямую влияют на последующие процессы, такие как дробление и переработка горной массы, что делает важным их оптимизацию для повышения экономической и технологической эффективности. Одним из ключевых факторов, определяющих качество, оптимальными показателями буровзрывных работ являются гранулометрический состав взорванной горной массы и рациональное использование энергии взрыва с соблюдением проектных положений горных выработок. Оптимальное дробление снижает необходимость повторного измельчения негабаритов, сокращая затраты на взрывные работы и эксплуатацию оборудования, такого как дробилки. Рациональное распределение энергии взрыва с учетом сохранения контуров горных выработок способствует снижению объемов переизмельчения, уменьшению негабаритов и обеспечивает устойчивость бортов, что в целом положительно сказывается на работе предприятия [1–3].

Учитывая вышеперечисленные факторы, целью данной работы является повышение качества БВР для достижения оптимальной кусковатости взорванной горной массы

на примере месторождения Жалын за счет анализа физико-механических свойств массива, параметров ранее выполненных взрывов, мониторинга сейсмических воздействий и разработки обоснованных рекомендаций.

Для достижения поставленной цели был проведен анализ исходных данных месторождения Жалын и параметров ранее выполненных буровзрывных работ, выполнены инструментальные замеры сейсмического влияния взрывных работ на массив, оценка гранулометрического состава горной массы, а также разработаны рекомендации по повышению эффективности буровзрывных работ.

### Материалы и методы исследования

Исследуемый объект – угольное месторождение Жалын – расположено в Жанааркинском районе Улытауской области Республики Казахстан, в 350 километрах от города Караганды.

Особое значение для условий ведения буровзрывных работ имеет верхний угольный горизонт – наиболее мощный и устойчивый в строении. Его мощность колеблется от 8 до 44 м, с угольными пачками до 13 м, разделенными прослоями углистых и темно-серых аргиллитов.

Верхние слои разреза включают песчаники и алевролиты различного состава. Основу обломочного материала составляют слои кислых вулканитов, кремнистых пород, кварца, полевых шпатов, кварцитов и в меньшей степени – биотита, циркона и апатита. Размер обломков варьируется от 0,1 до 3 мм, форма преимущественно угловатая, сортировка плохая. Цемент песчаников представлен глинисто-карбонатными и сидеритовыми разновидностями.

Объемный вес пород варьируется от 2,2 до 2,7 т/м<sup>3</sup>, влажность – от 0,5 до 25,9%, пористость – от 1,5 до 26%. Наименьшие значения этих параметров характерны для плотных карбонатных пород, а наибольшие – для глинистых и песчаных отложений. Коэффициент крепости по шкале Протодяконова изменяется от 0,01 (глины) до 6 (известняки и диабазовые туфы). Удельное сопротивление сжатию составляет от 0,09 до 10–12 кг/см<sup>2</sup>.

Таким образом, сложное литолого-стратиграфическое строение месторождения Жалын, представленное чередованием различных по прочности и трещиноватости пород, оказывает значительное влияние на эффективность буровзрывных работ и конечную кусковатость взорванной горной массы. Эти особенности необходимо учитывать при проектировании и оптимизации технологических параметров [4].

В ходе изучения ранее выполненных взрывов на месторождении Жалын было проанализировано 10 блоков, охватывающих полезное ископаемое и породный массив. Объемы взрывающейся массы варьировались от 1 400 м<sup>3</sup> до 45 621 м<sup>3</sup>, с различной сеткой бурения от 7 × 6 м до 7 × 8 м и глубиной скважин в среднем от 5,0 до 10,3 м. Коэффициент крепости пород менялся от 1 до 5,5.

Количество скважин на каждый взрыв варьировалось от 5 до 45 и удельный расход ВВ – от 0,22 до 0,25 кг/м<sup>3</sup>.

Для мониторинга за БВР использовались сейсмографы ZET 7152-N VER.2. Система, состоящая из 2 сейсмографов, размещалась вблизи взрывающихся блоков на территории разреза.

Датчик № 1 – в непосредственной близости от взрывающихся блоков, в то время как датчик № 2 устанавливался на борту разреза. Пример готового к замеру виброметра иллюстрирован на рис. 1.

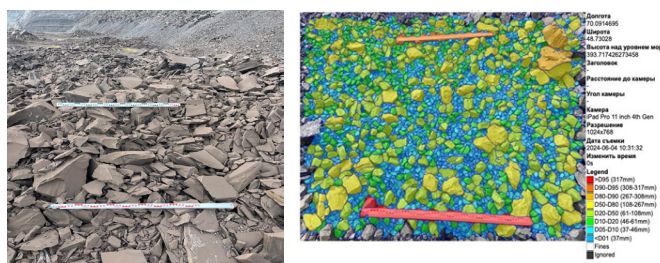
Перед началом работ в первую очередь были настроены каналы фильтрации записанных данных с виброметра. Во время взрывных работ для исследования скорости смещения и максимального ускорения частиц горных пород были настроены 6 каналов по осям XYZ с линейной и интегральной обработкой первого типа. Всего было зафиксировано 6 массовых взрывов.

Процесс обработки результатов замеров сейсмического влияния взрывных работ на массив состоит из воспроизведения ранее записанного взрыва через фильтр сигналов. Результаты взрыва в виде графика отображаются на многоканальном осциллографе, разделенный по единицам измерения и осям соответственно (рис. 3).

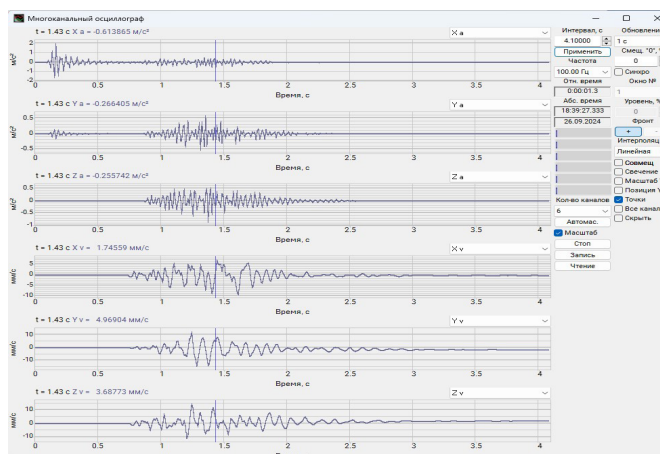
Для определения максимальных значений колебаний частиц и ускорения горных пород использовалась программа виброметр. Данная программа позволяет определить значения виброскорости, виброускорения и вибросмещения.



**Рис. 1. Установленный виброметр в рабочем состоянии.**  
**Сурет 1. Жұмыс күйінде орнатылған виброметр.**  
**Figure 1. Installed vibrometer in working condition.**



**а) б)**  
**Рис. 2. Гранулометрический анализ.**  
**Сурет 2. Гранулометриялық талдау.**  
**Figure 2. Granulometric analysis.**



**Рис. 3. Результат взрыва в многоканальном осциллографе.**  
**Сурет 3. Көп арналы осциллографтағы жарылыстың нәтижесі.**  
**Figure 3. The result of an explosion in a multichannel oscilloscope.**

Для оценки гранулометрического состава использовалось программное обеспечение WipFrag, которое анализирует цифровые изображения для определения размера

фрагментов. Понимание показателей фрагментации взорванной горной массы поможет оценить эффективность применяемых параметров взрывной сети [5–7].

Порядок работ для эффективного гранулометрического анализа:

1) выполнение качественных фотографий после взрывных работ с использованием геодезической рейки в количестве двух единиц в целях программного определения угла падения кучи для получения более детального анализа о размерах кусков на разной высоте от поверхности (рис. 2 а);

2) обработка фотографий в программном обеспечении *Winfrag*. Отрисовка контуров каждого фрагмента (рис. 2 б);

3) составление отчета и запуск аппаратного определения процента прохождения частиц через «сито» с заранее настроенными размерами.

### Результаты и обсуждение

Вышеизложенные исследования позволили выявить максимально отрицательные и максимально положительные значения по PPV и ускорению (рис. 4).

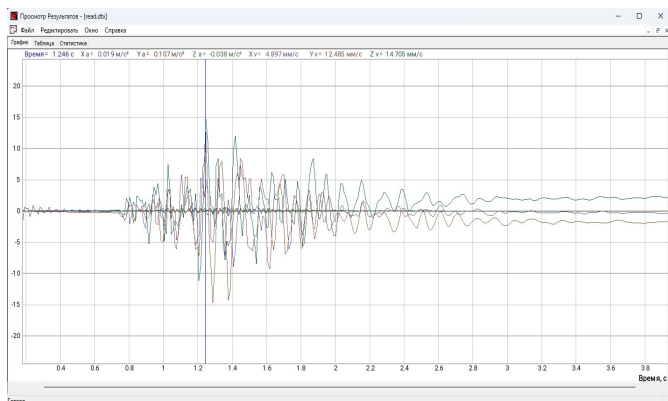


Рис. 4. Сейсмограмма обработанных записей ВР.

Сурет 4. ЖЖ өңделген жазбаларының сейсмограммасы.

Figure 4. Seismogram of processed BP records.

Анализ графиков показывает резкое снижение скорости колебаний частиц с увеличением расстояния до блока. На малых расстояниях до 100 м значения PPV достигают максимальных величин (например, для взрыва № 4 – до 1679,569 мм/с по направлению X на расстоянии 9,11 м). После 200 м значения уменьшаются до уровня менее 10 мм/с.

На представленном графике показана зависимость показателей PPV от расстояния до эпицентра взрыва (рис. 5).

На графике видно, что максимальные значения PPV отмечены вдоль оси X, что также подтверждается данными сейсмографа. Для направлений Y и Z значения PPV ниже, что может указывать на анизотропные свойства массива или особенности установки виброметра, так как сам виброметр был ориентирован на север, в то время как направление взрывной энергии пришлось на ось X.

При расстояниях более 150 м (например, для взрывов № 2 и № 5) значения PPV не превышают критических

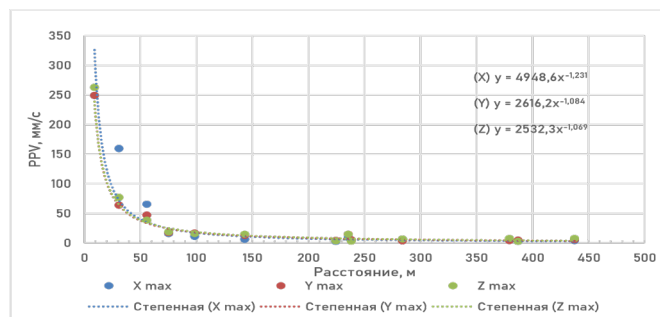


Рис. 5. Зависимость показателей скорости колебания частиц от расстояния.

Сурет 5. Бөлшектердің тербеліс жылдамдығы көрсеткіштерінің қашықтыққа тәуелділігі.

Figure 5. Dependence of particle vibration velocity on distance.

уровней, обеспечивая безопасность по сейсмическому влиянию взрывных работ для инфраструктуры.

Для взрыва № 4, где зафиксированы высокие значения PPV, объем блока составил 45 621 м<sup>3</sup>. Это может свидетельствовать о повышенной интенсивности взрыва при большем объеме заряда. Во время взрыва № 4 всего было использовано 9580 кг взрывчатого вещества «Нитрат Power». Замедление между скважинами составляет 25 мс, между рядами 42 мс. Инициация производилась от центра блока по двум направлениям – север и юг.

На расстоянии 250–500 м показатели PPV становятся минимальными (< 10 мм/с), что соответствует безопасному уровню вибраций для большинства объектов.

Согласно СН РК 2.03-28-2004 «Шкала оценки интенсивности землетрясений MSK-64 (К)» запись взрыва № 4 на расстоянии 9,11 м относится к 9 баллу по скорости смещения и 7 баллу по ускорению [8].

Ускорение частиц демонстрирует закономерности, схожие с PPV (рис. 6): резкое снижение вблизи взрыва и стабилизация на низких уровнях при увеличении расстояния. Например:

1) на расстояниях более 200 м ускорения стабилизируются на уровне менее 1 м/с<sup>2</sup>;

2) для блока № 4 максимальное ускорение вдоль оси X достигает 10,413 м/с<sup>2</sup>, что подтверждает интенсивность вибраций вблизи эпицентра.

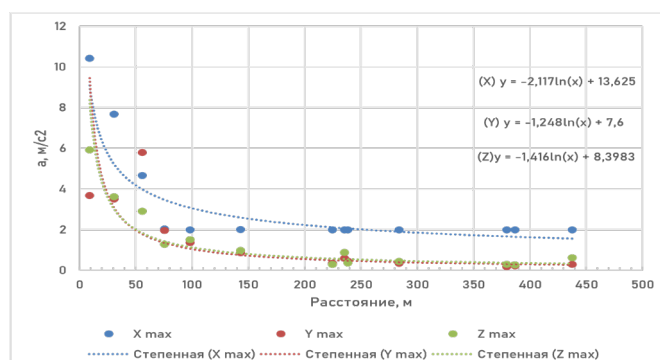


Рис. 6. Зависимость показателей ускорения от расстояния.

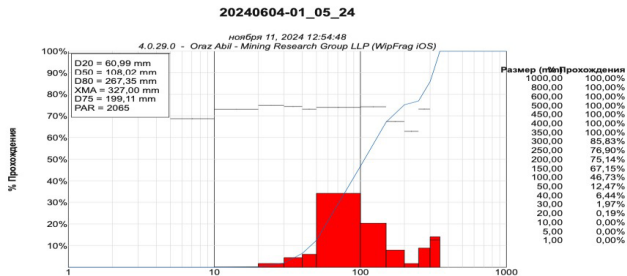
Сурет 6. Жылдамдату көрсеткіштерінің қашықтыққа тәуелділігі.

Figure 6. Dependence of acceleration indicators on distance.

# Разрушение горных пород

Значения ускорений быстрее снижаются с расстоянием по сравнению с PPV, что характерно для процессов диссипации энергии в массиве.

После обработки фотографий по всем наблюдаемым блокам был произведен статистический анализ результатов гранулометрического анализа, в ходе которого были определены средние размеры кусков (рис. 7).



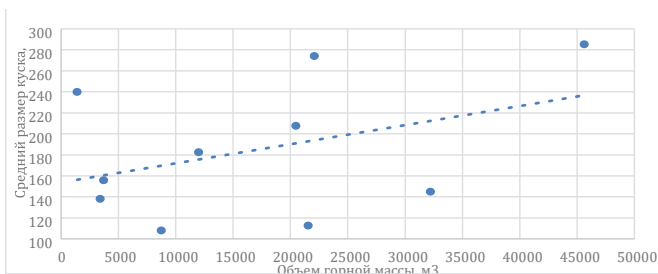
**Рис. 7. График распределения фракций взорванной горной массы.**

**Сурет 7. Жарылған тау-кен массасының фракцияларға бөліну кестесі.**

**Figure 7. Graph of the distribution of fractions of the blasted rock mass.**

Анализ гранулометрического состава горных пород по данным ПО WipFrag показал, что медианный размер фрагментов составляет  $D50 = 108,02$  мм, при значениях  $D20 = 60,99$  мм и  $D80 = 267,35$  мм, что свидетельствует о равномерной и мелкой фрагментации массива. Максимальный размер фрагментов не превышает 327 мм, более 75% взорванной горной массы представлено фракциями менее 200 мм, что соответствует требованиям к кондиционному куску.

В рамках работы выполнен анализ зависимости кусковатости взорванной горной массы от удельного расхода ВВ. На графике (рис. 8, 9) представлена корреляция между объемом горной массы ( $m^3$ ) и средним размером фрагментов породы (мм), полученным в результате буровзрывных работ. Выявленная зависимость аппроксимируется положительным линейным трендом. Тем не менее, количества наблюдаемых взрывных работ недостаточно для точного установления закономерности. Объем горной массы варьируется от 5000 до 45000  $m^3$ . Средний размер фрагментов составляет от 120 до 280 мм (таблица 1).

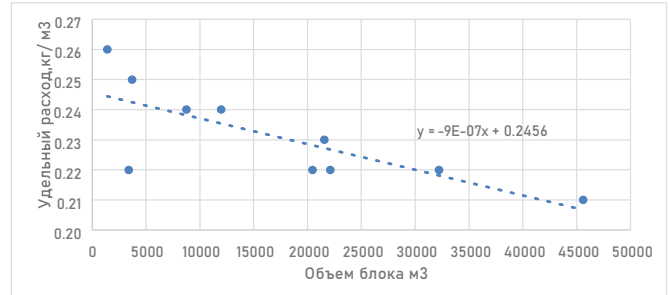


**Рис. 8. Зависимость среднего размера фрагментов от объема взорванной горной массы.**

**Сурет 8. Жарылған тау-кен массасы көлеміне орташа фрагмент өлшемінің тәуелділігі.**

**Figure 8. Average fragment size versus blasted rock mass volume.**

В отдельных случаях (например, при объемах около 25 000  $m^3$ ) наблюдаются значительно меньшие средние размеры фрагментов, что может быть следствием оптимального выбора параметров взрыва или высокой трещиноватости массива.

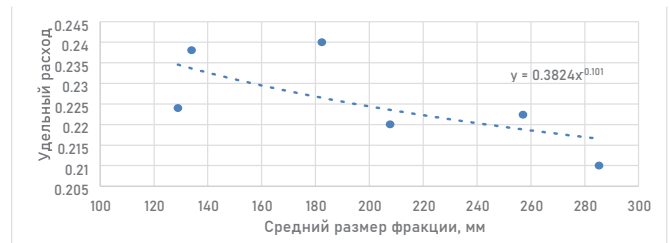


**Рис. 9. Зависимость удельного расхода ВВ от объема блока.**

**Сурет 9. Жарғыш заттың меншікті шығынының блок көлеміне тәуелділігі.**

**Figure 9. Specific explosive consumption versus block volume.**

Согласно выполненным наблюдениям, удельный расход взрывчатых веществ (ВВ) уменьшается с ростом объема блока. Для блоков с меньшим объемом удельный расход выше, достигая значений около 0,26  $kg/m^3$ , а для крупных блоков (около 45 000  $m^3$ ) он снижается до 0,21  $kg/m^3$ . Уравнение тренда отражает снижение удельного расхода примерно на  $9E-07$   $kg/m^3$  с каждым увеличением объема блока на 1  $m^3$ . Это свидетельствует о более эффективном использовании ВВ на больших объемах массива. Стоит отметить, что согласно рисунку 10, удельный расход ВВ обратно пропорционален среднему размеру фракций: при увеличении расхода до 0,24–0,26  $kg/m^3$  средний размер фракций составляет 120–150 мм. Для меньшего удельного расхода (0,21–0,22  $kg/m^3$ ) размеры фракций возрастают до 240–280 мм.



**Рис. 10. Зависимость среднего размера фракций от удельного расхода ВВ.**

**Сурет 10. Фракциялардың орташа мөлшерінің ЖЗ меншікті шығынына тәуелділігі.**

**Figure 10. Average fragment size versus specific explosive consumption.**

Блоки с меньшим объемом показывают меньший средний размер куска (137,99 мм) и более высокий удельный расход 0,246  $kg/m^3$ .

Крупные блоки имеют более крупный размер фракций 239,89 мм при низком удельном расходе 0,21  $kg/m^3$ , в связи

Таблица 1

## Результаты гранулометрического анализа

Кесте 1

## Гранулометриялық анализ нәтижелері

Table 1

## Results of grain-size analysis

Дата	Блок	Горная масса	Объем, м <sup>3</sup>	Сетка скважин, м	Глубина скважин, м	Уд. расход кг/м <sup>3</sup>	Средний размер куска, мм	Выход некондиционных кусков > 500 мм, %
04.06.24	02-05-24	порода	3400	7x6	6.4	0,22	137,99	0
04.06.24	01-05-24	уголь	8750	7x6	7.8	0,24	108,02	0
04.06.24	03-05-24	порода	3700	7x6	5	0,25	155,89	0
29.08.24	05-08-24	порода	22100	7x7	8.5	0,22	274,18	0
29.08.24	06-08-24	порода	1400	7x7	5.8	0,26	239,88	0
08.09.24	01-09-24	уголь	32200	7x6	7.4	0,22	145	0
08.09.24	02-09-24	уголь	21550	7x6	8.3	0,23	112,69	0
26.09.24	03-09-24	порода	45621	7x7	10.3	0,21	285,29	22,37
27.09.24	05-09-24	уголь	11998	7x7	10	0,24	182,44	0
28.09.24	04-09-24	порода	20475	7x6	8.2	0,22	207,72	0

с чем наблюдается значительный выход некондиционных кусков 22,37%. Глубина скважин 6,4–8,2 м и размер сетки 7 × 6 м или 7 × 7 м существенно влияют на гранулометрию, исходя из результатов в таблице 1.

Проведенный гранулометрический анализ выявил зоны с особенно мелкой фракцией пород. Исходя из результатов гранулометрического анализа (таблица 1) видно, что размер значительной части фрагментов существенно меньше проектного кондиционного значения (< 500 мм). Отмечается явный перерасход ВВ (таблица 1). Это указывает на наличие запаса по качеству фрагментации, который можно использовать для оптимизации параметров буровзрывных работ.

Тем не менее, при принятом кондиционном куске 500 мм появляется некий коэффициент запаса, при учете которого появляется возможность оптимизации параметров БВР с дальнейшей экономией ВВ.

Согласно источнику [9], были выполнены теоретические расчеты удельного расхода ВВ. Расчеты удельного расхода ВВ для взрывов № 1–3 (Нитронит Э100) и № 4–10 (Нитропауэр) производились отдельно из-за разницы применяемых ВВ.

$$q_p = 0.13 \cdot \gamma \cdot \sqrt[4]{f} \cdot (0.6 + 3.3 \cdot d \cdot d_e) \cdot (0.5 \div d_k)^{0.4} \cdot k \quad (1)$$

где  $\gamma$  – объемный вес породы, т/м<sup>3</sup>;

$f$  – коэффициент крепости

$d$  – диаметр заряда, мм;

$d_e$  – среднее расстояние между трещинами в массиве, м;

$d_k$  – кондиционный кусок, мм;

$k$  – коэффициент работоспособности ВВ.

Исходя из формулы 1, был произведен расчет удельного расхода ВВ. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

В результате визуального осмотра блоков во время и после проведения взрывных работ были зафиксированы и внесены в таблицу 2 данные о количестве «прострелов» и «отказов». Для оценки эффективности буровзрывных ра-

бот использовалась следующая методика: из общего числа скважин  $N$  вычиталось количество отказов  $N_{отказ}$ , а также половина от количества прострелов  $0.5N_{прострел}$ . Учет половины числа прострелов обусловлен тем, что скважина была отработана, но значительная часть энергии взрыва не была направлена в массив, что снижает эффективность использования взрывчатого вещества.

Согласно данным таблицы 2, эффективность БВР варьируется в диапазоне от 89,58% до 100%. Средний размер фрагментов породы находится в пределах от 108,02 мм до 285,29 мм, что соответствует установленным кондиционным значениям.

Из результатов можно заметить, что при расчетных показателях удельного расхода ВВ по угольным блокам, значения удельного расхода варьируются от 0,186 до 0,20 кг/м<sup>3</sup>. На основе этих данных был разработан поправочный коэффициент удельного расхода.

$$K_n = q_p \cdot q_\phi, \quad (2)$$

где  $q_p$  – расчетный удельный расход;

$q_\phi$  – фактический удельный расход.

Корректированный коэффициент учитывает максимальный размер кондиционного куска.

Поправочный коэффициент рекомендуется к применению при проектировании последующих массовых взрывов по следующей формуле:

$$q_{кор} = q_{проект} \cdot K_n. \quad (3)$$

Параллельно, были выполнены расчеты среднего размера куска (формула 4) по модели Кузнецова-Раммлера (KUZ-RAM) [10]. Имея выборку из 10 БВР, и их результатов в виде среднего размера куска и удельного расхода ВВ, были выполнены расчеты поправочного коэффициента. Результаты приведены в таблицу 3.

Таблица 2

## Результаты расчета эффективности БВР

Кесте 2

## Жарылыс жұмыстарының тиімділігін есептеу нәтижелері

Table 2

## Results of blasting and drilling operations efficiency calculations

Блок	Кол. скв.	Глубина скв., м	Сетка скважин	Отказные заряды	Прострелы	Удельный расход ВВ, кг/м <sup>3</sup>	Эффективность БВР, %	Ср. размер куска, мм	Расчетный удельный расход ВВ, кг/м <sup>3</sup>
02-05-24	14	6.4	7 x 6	-	-	0,28	100	137,99	0,39
01-05-24	27	7.8	7 x 6	-	-	0,29	100	108,02	0,186
03-05-24	23	5	7 x 6	-	-	0,28	100	155,89	0,466
05-08-24	48	8.5	7 x 7	4	3	0,30	89,58	274,18	0,53
06-08-24	5	5.8	7 x 7	-	-	0,34	100	239,88	0,35
01-09-24	90	7.4	7 x 6	-	4	0,34	97,7	145	0,20
02-09-24	57	8.3	7 x 6	-	2	0,36	98,24	112,69	0,19
03-09-24	99	10.3	7 x 7	6	-	0,37	93,9	285,29	0,53
05-09-24	45	10	7 x 7	4	-	0,35	91,1	182,44	0,19
04-09-24	55	8.2	7 x 6	-	1	0,30	99,09	207,72	0,57

$$d_{\text{ср}} = \frac{(0,15 \times (\rho_{\text{п}} \times f \times d_3)0,33 \times d_{\text{отд}})}{q \times e_{\text{ВВ}}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  – плотность породы, т/м<sup>3</sup>;

$d_3$  – диаметр заряда, м;

$f$  – коэффициент крепости по шкале М.М. Протождяконова;

$d_{\text{отд}}$  – диаметр естественной отдельности в массе, м;

$q$  – удельный расход ВВ, кг/м<sup>3</sup>;

$e_{\text{ВВ}}$  – переводной коэффициент как отношение теплоты взрыва эталонного к применяемому ВВ.

На диаграмме (рис. 11) приведены значения среднего размера куска при взрывных работах на угольных блоках. Замечается разница в 28 мм при удельном расходе 0,29 кг/м<sup>3</sup>. Крайний столбец при 0,35 кг/м<sup>3</sup> имеет значения

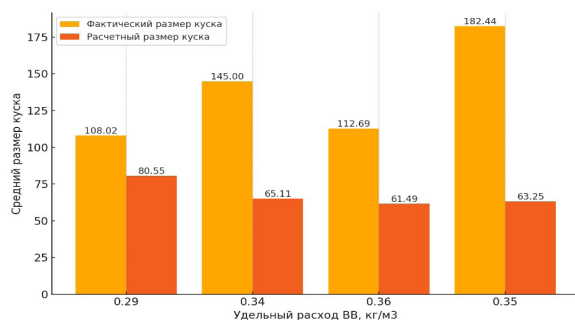


Рис. 11. Сравнение среднего размера куска фактического и расчетного по угольным блокам.

Сурет 11. Нақты және есептік көмір блоктары бойынша орташа кесек мөлшерін салыстыру.

Figure 11. Comparison of actual and calculated average lump size for coal blocks.

182,44 мм по фактическому размеру и 63,25 мм по расчетному размеру куска, при взрыве блока 05-09-24 были зафиксированы «отказы».

На рисунке 12 замечаются приближенные значения среднего размера куска при удельном расходе 0,28 кг/м<sup>3</sup>, что свидетельствует о корректности расчетов. В то же время наблюдается разница среднего размера куска, равная 100–120 мм при удельном расходе от 0,3–0,37 кг/м<sup>3</sup>. Это может быть связано с неоднородностью взрываеваемого массива.

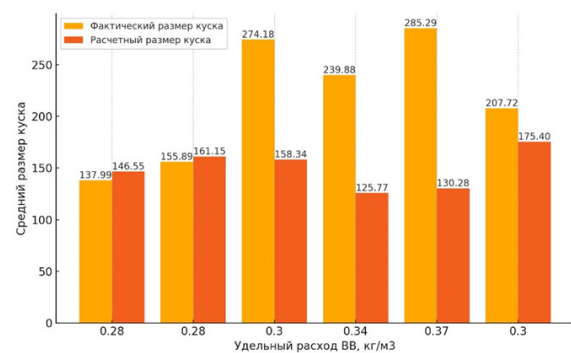


Рис. 12. Сравнение среднего размера куска фактического и расчетного по породным блокам.

Сурет 12. Нақты және есептік бос жыныстар блоктары бойынша орташа кесек мөлшерін салыстыру.

Figure 12. Comparison of actual and calculated average fragment size for rock blocks.

На основе данных расчетов рекомендуется принимать поправочный коэффициент при определении удельного

Таблица 3

Скорректированный расчет удельного расхода ВВ

Кесте 3

Жарылғыш заттардың меншікті шығынының түзетілген есебі

Table 3

Corrected calculation of specific explosive consumption

Блок	Проектный $q$ , кг/м <sup>3</sup>	Ср. размер куска, мм	Поправ. коэфф. по Кутузову	Поправ. коэфф. по KUZ-RAM
02-05-24	0,28	137,99	1,392	0,941
01-05-24	0,29	108,02	0,641	1,341
03-05-24	0,28	155,89	1,664	0,967
05-08-24	0,30	274,18	1,766	1,731
06-08-24	0,34	239,88	1,029	1,907
01-09-24	0,34	145	0,588	2,226
02-09-24	0,36	112,69	0,527	1,832
03-09-24	0,37	285,29	1,432	2,189
05-09-24	0,35	182,44	0,542	2,884
04-09-24	0,30	207,72	1,9	1,184

расхода ВВ для опытных взрывов для породных блоков по модели KUZ-RAM, а для угольных блоков по модели Кутузова. Рекомендуется проведение буровзрывных работ с дальнейшей корректировкой поправочного коэффициента.

### Выводы

В рамках исследований для достижения оптимальной кусковатости взорванной горной массы в условиях месторождения Жалын был проведен комплексный анализ горно-геологических условий, мониторинг буровзрывных работ и разработаны рекомендации по их оптимизации. Основные выводы исследования:

1) проведенный сейсмический мониторинг показал, что пиковые значения скорости колебаний частиц (PPV) наблюдаются на малых расстояниях от эпицентра взрыва до 100 м. На расстояниях свыше 200 м значения PPV стабилизировались на уровне < 10 мм/с, что соответствует требованиям безопасности;

2) анализ с использованием ПО WipFrag выявил зависимость среднего размера фрагментов от удельного расхода ВВ, глубины скважин и сетки бурения. Меньшие размеры фрагментов (до 137,99 мм) наблюдались для блоков с более высокой плотностью зарядов (удельный расход 0,25–0,26 кг/м<sup>3</sup>) и плотной сеткой бурения (7 × 6 м). Для крупных блоков (например, № 8, объем 45621 м<sup>3</sup>) наблюдались более крупные фрагменты (до 285,29 мм) и значительный выход некондиционных кусков (> 500 мм) в объеме 22,37%;

3) установлено, что достижение оптимальной кусковатости угля в диапазоне 108–274 мм обеспечивается при удельном расходе взрывчатого вещества 0,23–0,25 кг/м<sup>3</sup>, применении сетки бурения 7 × 6 м без выхода негабаритных фракций;

4) на основе выполненных расчетов рекомендуется использование поправочного коэффициента для удельного расхода взрывчатого вещества при проектировании и выполнении буровзрывных работ. Для определения поправочного коэффициента на породных блоках рекомендуется применять модель KUZ-RAM. Для угольных блоков предлагается использовать модель Кутузова. Расчеты по модели Кутузова могут снизить удельный расход ВВ, что приведет к экономии, так как имеется запас по размеру кусков;

5) результаты исследования позволяют выработать рекомендации по оптимизации параметров буровзрывных работ для обеспечения требуемой granulometрии взорванной массы и минимизации негативного сейсмического воздействия.

### Благодарность

Исследование проводилось в рамках выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по договору № 12-САЕ-23 по теме «Повышение качества буровзрывных работ для достижения оптимальной кусковатости взорванной горной массы в условиях месторождения Жалын, заключенного между ТОО «Сарыарка-ENERGY» и ТОО «Mining Research Group».

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Повышение эффективности разрушения горных пород с использованием предварительного ослабления горного массива / Абен Е.Х. [и др.] // Eurasian Mining. 2023. № 2 (40). С. 62–65 (на английском языке)
2. Черских О.И., Галимянов А.А., Гевало К.В. Повышение эффективности буровзрывных работ на угольном разрезе «Солнцевский» // Уголь. 2022. № 7. С. 45–52 (на английском языке)

3. Галимянов И.А., Соболев А.А. Влияние глубины добычи угля на эффективность буровзрывных работ на месторождении Уралуголь // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12–1. С. 69–75 (на английском языке)
4. Оценка наведенных вибраций, полученных из суперпозиции волн при взрывах с замедлением / Гоу Ю. [и др.] // Международный журнал механики горных пород и горных наук. 2021. № 144. С. 104814 (на английском языке)
5. Ишейский В., Маринин М., Должиков В. Комбинирование зон растрескивания после взрывания колонковых зарядов при разрушении горных пород // Международный журнал инженерных исследований и технологий. 2019. № 12 (12). С. 2953–2956 (на английском языке)
6. Отчет Гапеевской ГРЭ о детальной разведке месторождения Жалын за 1991–1993 гг. / Министерство геологии и охраны недр Республики Казахстан, Караганда, 1993. С. 1–3 (на русском языке)
7. СН РК 2.03-28-2004 «Шкала оценки интенсивности землетрясений MSK-64 (К)» (на русском языке)
8. Оценка и оптимизация подходов к взрывному делу для уменьшения негабаритных валунов и выступов в карьерах / Чжэндун Лэн [и др.] // Международный журнал горной науки и техники. 2020. № 30. С. 373–380 (на английском языке)
9. Курузов Б.Н. Справочник взрывника: М.: Недра, 1988. 511 с. (на русском языке)
10. Каннингем К.В.Б. Модель фрагментации Kuz-Rat – 20 лет спустя // Сборник трудов конференции Европейской федерации инженеров-взрывников, Брайтон: Брайтон, 2005. С. 201–210 (на английском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Тау жыныстарын алдын ала әлсіретуді қолдана отырып, оларды бұзу тиімділігін арттыру / Абен Е.Х. [және т. б.] // Еуразиялық тау-кен өнеркәсібі. 2023. № 2 (40). Б. 62–65 (ағылшын тілінде)
2. Черских О.И., Галимянов А.А., Гевало К.В. «Солнцевский» көмір разрезіндегі бұрғылау-жару жұмыстарының тиімділігін арттыру // Көмір. 2022. № 7. Б. 45–52 (ағылшын тілінде)
3. Галимянов И.А., Соболев А.А. Көмір өндіру тереңдігінің Уралуголь кен орнындағы бұрғылау-жару жұмыстарының тиімділігіне әсері // Тау-кен ақпараттық-талдау бюллетені. 2021. № 12–1. Б. 69–75 (ағылшын тілінде)
4. Баяулатқыш жарылыстар кезіндегі толқындардың суперпозициясынан алынған индукцияланған дірілдерді бағалау / Гоу Ю. [және т. б.] // Тау жыныстарының механикасы және тау-кен ғылымдары халықаралық журналы. 2021. № 144. Б. 104814 (ағылшын тілінде)
5. Ишейский В., Маринин М., Должиков В. Тау жыныстарын бұзу кезінде ұңғымалық зарядтарды жарудан кейінгі жарылу аймақтарын біріктіру // Инженерлік зерттеулер мен технологиялар халықаралық журналы. 2019. № 12 (12). Б. 2953–2956 (ағылшын тілінде)
6. Гапеев ГРЭ-нің 1991–1993 жж. Жалын кен орнын егжей-тегжейлі барлау туралы есебі / Қазақстан Республикасының Геология және жер қойнауын қорғау министрлігі, Қарағанды, 1993. Б. 1–3 (орыс тілінде)
7. ҚР ҚН 2.03-28-2004 «Жер сілкінісінің қарқындылығын бағалау шкаласы MSK-64 (К)» (орыс тілінде)
8. Карьерлердегі үлкен кесектер мен шошақтарды азайту үшін жару тәсілдерін бағалау және оңтайландыру / Чжэндун Лэн [және т. б.] // Тау-кен ғылымы мен техникасының халықаралық журналы. 2020. № 30. Б. 373–380 (ағылшын тілінде)
9. Курузов Б.Н. Жарылғыш анықтамалық: М.: Недра, 1988. 511 б. (орыс тілінде)
10. Каннингем К.В.Б. Kuz-Rat фрагментация моделі – 20 жылдан кейін // Еуропалық жару инженерлері федерациясы конференциясының жинағы, Брайтон: Брайтон, 2005. Б. 201–210 (ағылшын тілінде)

#### REFERENCES

1. Improving Efficiency of Rock Breaking Using Pre-Weakening of Rock Mass / Aben E.Kh. [et al.] // Eurasian Mining. 2023. No. 2 (40). 62–65 pp. (in English)
2. Cherskiikh O.I., Galimyanov A.A., Gevalo K.V. Enhancing Drilling and Blasting Operations at the Solntsevo Coal Strip Mine // Coal. 2022. No. 7. 45–52 pp. (in English)
3. Galimyanov I.A., Sobolev A.A. Influence of Coal Mining Depth on the Efficiency of Drilling and Blasting Operations at the Uralugol' Deposit // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2021. No. 12–1. 69–75 pp. (in English)
4. Assessment of induced vibrations obtained from superposition of waves in delayed blasts / Gou Y. [et al.] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. No. 144. 104814 pp. (in English)
5. Isheyskiy V., Marinin M., Dolzhikov V. Combination of cracking zones after blasting of core charges in rock breaking // International Journal of Engineering Research & Technology. 2019. No. 12 (12). 2953–2956 pp. (in English)
6. Otchet Gapeevskoi GRE o detal'noi razvedke mestorozhdeniya Zhalyn za 1991–1993 gg. [Report of the Gapeevskaya Geological Exploration Expedition on the detailed exploration of the Zhalyn deposit for 1991–1993], Ministerstvo geologii i okhrany nedr Respubliki Kazakhstan, Karaganda [Ministry of Geology and Subsoil Protection of the Republic of Kazakhstan, Karaganda]. 1993, 1–3 pp. (in Russian)

7. SN RK 2.03-28-2004 «Shkala otsenki intensivnosti zemletryaseniei MSK-64 (K)» [SN RK 2.03-28-2004 «Scale for assessing the intensity of earthquakes MSK-64 (K)»] (in Russian)
8. Evaluation and optimization of blasting approaches for reducing oversize boulders and ledges in open-pit mines / Zhengdong Leng [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. No. 30. 373–380 pp. (in English)
9. Kutuzov B.N. Spravochnik vzryvnika [Blaster's Handbook]. Moscow: Nedra, 1988, 511 p. (in Russian)
10. Cunningham C.V.B. The Kuz-Ram Fragmentation Model – 20 Years On. Proceedings of the European Federation of Explosives Engineers Conference, Brighton: Brighton, 2005. 201–210 pp. (in English)

**Сведения об авторах:**

**Бахтыбаев Н.Б.**, к.т.н, директор ТОО «Mining Research Group» (г. Караганда, Казахстан), [bakhtybayev@minrg.com](mailto:bakhtybayev@minrg.com); <http://orcid.org/0000-0002-9816-9765>

**Абил О.А.**, заместитель директора, ТОО «Mining Research Group» (г. Караганда, Казахстан), [orazabil@minrg.com](mailto:orazabil@minrg.com); <https://orcid.org/0000-0001-9939-9039>

**Атагелдиев К.Т.**, докторант, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), [kobeyatageldiyev@gmail.com](mailto:kobeyatageldiyev@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-1902-0170>

**Нурбобоев Е.Т.**, доцент кафедры «Горное дело и технологии», Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова (г. Ташкент, Узбекистан), [yorqin210@mail.ru](mailto:yorqin210@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0321-2792>

**Авторлар туралы мәліметтер:**

**Бахтыбаев Н.Б.**, т.ғ.к., «Mining Research Group» ЖШС директоры (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Әбил О.А.**, «Mining Research Group» ЖШС директоры орынбасары (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Атагелдиев К.Т.**, докторант, КеАҚ «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Нурбобоев Е.Т.**, «Тау-кен ісі және технологиялар» кафедрасының доценті, Ислам Каримов атындағы Ташкент мемлекеттік техникалық университеті (Ташкент қ., Өзбекстан)

**Information about the authors:**

**Bakhtybayev N.B.**, candidate of Technical Sciences, director of the LLP «Mining Research Group» LLP (Karaganda, Kazakhstan)

**Abil O.A.**, associate Director of the LLP «Mining Research Group» LLP (Karaganda, Kazakhstan)

**Atageldiyev K.T.**, PhD student, non-profit JSC «Karaganda Technical University named by Abylkas Saginov» (Karaganda, Kazakhstan)

**Nurboev E.T.**, Associate Professor of the Department of Mining and Technology, Islam Karimov Tashkent State Technical University (Tashkent, Uzbekistan)



**СПТО КРАНЫ**  
WWW.CRANE-EXPO.RU

**17-19 июня 2026**

г. Москва, ВДНХ,  
57 павильон

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

**СПТО КРАНЫ**

СПЕЦТЕХНИКА И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ЭКСПО ДИЗАЙН  
ВЫСТАВОЧНАЯ КОМПАНИЯ

Код МРНТИ 52.13.04

Ф.К. Низаметдинов<sup>1</sup>, А.Р. Смагулов<sup>2</sup>, \*А.И. Султанбекова<sup>1</sup>, А.Р. Естаева<sup>3</sup><sup>1</sup>НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан),<sup>2</sup>АО «Костанайские минералы» (г. Житикара, Казахстан),<sup>3</sup>НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина»

(г. Астана, Казахстан)

## НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ОТКОСОВ УСТУПОВ И БОРТОВ КАРЬЕРА С ПОМОЩЬЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЙ

**Аннотация.** В статье представлен обзор и разработана методика проведения наблюдений за деформационными процессами откосов уступов и бортов карьера с использованием наземных радиолокационных систем CHCNAV PS-SAR2000 и Leica IBIS FM-14. Рассмотрены основные типы радарных систем, принципы их функционирования и особенности применения в условиях открытых горных работ. Приведены результаты мониторинга устойчивости прибортового горного массива, а также описаны этапы обработки данных радиолокационной съемки с применением программного обеспечения CHCNAV MAS. Полученные результаты используются для выявления зон потенциальной неустойчивости, трещин, разломов и ослабленных участков, уточнения геологических разрезов, определения границ между различными типами пород и фиксации скрытых геологических нарушений, оказывающих влияние на прочность и устойчивость бортов карьера.

**Ключевые слова:** геомеханический мониторинг, георадарная съемка, деформации борта карьера, интерферометрия, плотность сканирования, величина смещений, устойчивость, коэффициент запаса, откос карьера, скорость смещений.

### Радиолокациялық өлшеу жүйелерінің көмегімен ашық кеніш кемер қиябеттері мен жағдауларының деформациялық процестерін бақылау жүргізу

**Аннотация.** Мақалада Жетіқара кен орнының тау-кен-геологиялық жағдайлары мен оларды игеру кезіндегі геотехникалық ерекшеліктері қарастырылған. CHCNAV PS-SAR2000 және Leica Ibis FM-14 наземдік радиолокациялық жүйелерін қолдана отырып, карьердің беткейлері мен бүйірлерінде жүретін деформациялық процестерді бақылау әдістемесі ұсынылған. Радиолокациялық жүйелердің негізгі түрлері, жұмыс істеу қағидалары және ашық тау-кен жұмыстары жағдайында қолдану ерекшеліктері сипатталған. CHCNAV MAS бағдарламалық жасақтамасы көмегімен радиолокациялық деректерді өңдеу кезеңдері келтірілген. Алынған нәтижелер ықтимал тұрақсыздық аймақтарын, жарықтар мен ақауларды, тау жыныстары массивіндегі әлсіреген учаскелерді анықтауға, егжей-тегжейлі геологиялық кесінділерді нақтылауға тұрақтылығына әсер ететін жасырын геологиялық бұзылуларды анықтауға мүмкіндік береді.

**Түйінді сөздер:** геомеханикалық бақылау, радиолокациялық түсірілім, ашық кеніш жағдауының деформациясы, интерферометрия, сканерлеу тығыздығы, жылжу шамасы, тұрақтылық, қор коэффициенті, ашық кеніш қиябеті, жылжу жылдамдығы.

### Observations of deformation processes of slopes, ledges and sides of the quarry using radar measurement systems

**Abstract.** The article presents the mining and geological conditions of the Dzhetysay deposit and their influence on the stability of quarry slopes. A methodology for monitoring deformation processes of bench and pit wall slopes using the CHCNAV PS-SAR2000 and Leica IBIS FM-14 ground-based radar systems is described. The main types of radar systems, their operating principles, and specific features of application under open-pit mining conditions are considered. The stages of processing radar survey data using the CHCNAV MAS software are outlined. The obtained results can be applied to identify zones of potential instability, cracks, fractures, and weakened areas within the rock mass, to refine detailed geological cross-sections, determine boundaries between different rock types, and detect hidden geological disturbances that may significantly affect the strength and stability of quarry walls.

**Key words:** geomechanical monitoring, georadar survey, deformations of the side of the quarry, interferometry, scanning density, displacement magnitude, stability, margin coefficient, slope of the quarry, displacement velocity.

### Введение

Характерной чертой современного этапа развития открытой добычи полезных ископаемых является вовлечение в эксплуатацию месторождений со сложными геологическими и горнотехническими условиями разработки. Это, в первую очередь, связано с увеличением их глубины разработки и, во вторую, происходит изменение геологической ситуации, что неблагоприятно сказывается на прогнозировании состояния устойчивости откосов уступов и бортов карьера. Нарушения устойчивости откосов влекут за собой увеличение объемов вскрыши, непроизводительные расходы на дополнительную переэкскавацию, нарушают режим работы на карьере, вызывают простои и аварии горнотранспортного оборудования и приносят значительный материальный ущерб.

Разработка месторождений открытым способом всегда сопровождается комплексом инструментального маркшейдерского мониторинга состояния откосов уступов, бортов карьеров для обеспечения своевременного предупреждения развития деформаций и корректировки углов откосов в зависимости от изменяющейся горно-геологи-

ческой ситуации для обеспечения безопасности и эффективности ведения горных работ.

Широко применяются радиолокационные системы на ряде карьеров месторождений России, таких как Гайское ОАО «Гайский ГОК, Горевский ГОК, на руднике «Железный» АО «Ковдорский ГОК» в условиях Крайнего Севера, а также при разработке месторождений в США, Австралии, Индии, ЮАР, Чили и Британской Колумбии [1, 2, 3].

### Методы

Деформационные процессы на карьерах являются результатом сочетания природных, инженерно-технологических и внешних факторов. Среди основных факторов, влияющих на устойчивость откосов, выделяют следующие [4, 5, 6]:

- геологические факторы, включающие слабые, трещиноватые или слоистые породы, наличие разломов и зон выветривания, а также высокую водонасыщенность массива, которые существенно снижают прочность откосов и способствуют развитию микро- и макродеформаций;

- геомеханические факторы, проявляющиеся в рекомендации чрезмерно крутых и высоких откосов уступов и деформаций нижележащих слоев;

- гидрологические факторы, включающие инфильтрацию дождевых и талых вод, а также высокий уровень подземных вод, что увеличивает гидростатическое давление в породах и снижает их сопротивление сдвигу;

- технологические факторы, связанные с проведением взрывных работ, движением тяжелой техники и резким изменением конфигурации выемки, что вызывают локальные разрушения массива, микротрещины и очаги потенциальной неустойчивости.

Основной формой проявления геомеханических процессов является формирование зон неупругих деформаций и разрушений [4, 5]. Вследствие этого преобладающим видом потери устойчивости обнажений в пределах уступов является образование отдельных вывалов, размеры которых определяются размерами структурных неоднородностей. Исследования направлены на выявление деформаций откосов на основе их автоматизированного мониторинга для прогноза устойчивого состояния приобтовых массивов карьера [7].

По результатам спектрального сейсмического профилирования была проведена интерпретация результатов и вынос на топооснову карьера вновь выявленные структурные аномалии, совмещены с имеющимися данными о геомеханическом состоянии карьерного пространства, а также создана геомеханическая модель карьера с включением в нее всех полученных разрезов и электротомографии аномальных зон.

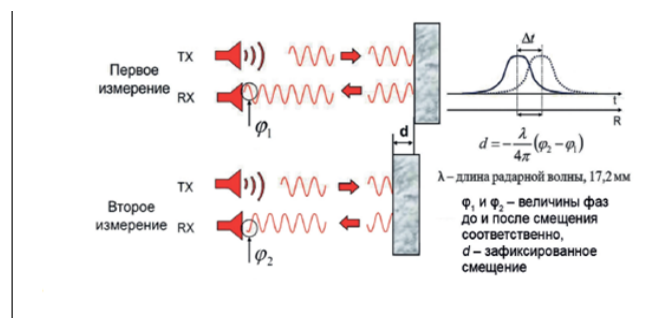
Наблюдения за сдвижением горных пород и земной поверхности с использованием радарной интерферометрии (радиолокационный мониторинг) успешно осуществляется за рубежом с середины 1990-х годов. Существует два метода радарной интерферометрии: спутниковая и наземная. Целью мониторинга с помощью радиолокационных данных является своевременное выявление смещений и деформаций земной поверхности и сооружений на основе регулярного получения информации об исследуемом объекте дистанционными методами. В последние годы использование радарной интерферометрии становится более актуальным и эффективным.

Наземные интерферометрические радары представляют собой современные высокоточные дистанционные системы наблюдения, предназначенные для мониторинга смещений и деформаций откосов, уступов и других потенциально неустойчивых элементов бортов карьеров. Метод основан на регистрации разности фаз электромагнитных волн, отраженных от поверхности контролируемого участка в разные моменты времени, что позволяет определять величину смещения с миллиметровой точностью.

Главным преимуществом технологии является возможность непрерывного мониторинга в режиме реального времени, независимо от времени суток, освещенности и погодных условий, без необходимости установки отражателей или маркеров на контролируемой поверхности. Это обеспечивает безопасность наблюдений и возможность контроля за труднодоступными или опасными участками борта. Радар устанавливается на устойчивом основании на одном из бортов карьера и направляется на исследуемый участок противоположного борта. В процессе работы система формирует радиолокационные изображения, в кото-

рых отраженные сигналы интерферируются между последовательными измерениями. На основе фазовой разности вычисляются смещения поверхности с субмиллиметровой точностью [8, 9].

На рис. 1 представлена схема принципа работы радарной системы, основанной на измерении фазового сдвига отраженного сигнала. Передатчик (TX) излучает электромагнитную волну, которая отражается от поверхности и фиксируется приемником (RX). При первом и втором измерениях регистрируются фазы сигнала ( $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ).



**Рис. 1. Принцип работы радиолокационной системы при измерении смещений поверхности.**

**Сурет 1. Беттің жылжуын өлшеу кезінде радиолокациялық жүйенің жұмыс принципі.**

**Figure 1. The principle of operation of the radar system when measuring surface displacements.**

Разность фаз позволяет вычислить смещение поверхности  $d$  по известной длине радиоволны. Этот метод лежит в основе интерферометрического радарного мониторинга, обеспечивая высокоточное определение даже миллиметровых перемещений.

Время сканирования области зависит от ряда факторов:

- размера исследуемого участка;
- расстояния между радаром и объектом наблюдения (до 4 км);
- плотности сканирования (число точек на единицу площади);
- метеорологические условия (влажность, осадки, температура воздуха).

Полученные данные поступают в вычислительный модуль, где выполняется автоматическая обработка и визуализация. Результаты отображаются в виде тепловых карт смещений и графиков временных зависимостей, а программное обеспечение автоматически подает сигналы тревоги, если зафиксированные деформации превышают заданные пороговые значения. Для мониторинга сдвижений откосов применяются два основных типа радарных систем:

1. Радары с реальной апертурой (Real Aperture Radar, RAR). Используют направленную антенну («тарелку»), формирующую узкий луч, который сканирует поверхность в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Этот тип радаров обеспечивает высокое пространственное разрешение, но требует больше времени для полного охвата участка.

2. Радары с синтезированной апертурой (Synthetic Aperture Radar, SAR). Формируют широкий луч, охваты-

вающий весь контролируемый участок. Во время съемки антенна перемещается вдоль линейного рельса, что позволяет синтезировать виртуальную апертуру и получить изображение высокой детализации. GB-InSAR-системы этого типа являются наиболее распространенными для карьеров благодаря сочетанию высокой точности и скорости сканирования [10].

Результаты мониторинга отображаются в двух основных формах:

1. *Тепловая карта деформаций* визуализирует скорость и направление смещений в цветовой шкале: от «холодных» тонов (стабильные участки) до «теплых» (активные зоны движения);

2. *Графики временных зависимостей* показывают изменение величины и скорости смещений в конкретных точках. Пользователь может выбрать несколько ключевых участков для анализа динамики деформаций и прогнозирования развития процессов.

Современные системы GB-InSAR обладают рядом важных конструктивных преимуществ:

- *мобильность (установка на прицепе или транспортном средстве);*

- *возможность безопасного удаления оборудования во время взрывных работ;*

- *автоматическая маркишейдерская привязка;*

- *модульная архитектура, позволяющая подключать дополнительные сенсоры (метеостанции, камеры и т. д.) [11].*

Новые программные комплексы позволяют выполнять прогнозирование времени возможного обрушения, используя временные ряды скоростей смещений и математические модели ускорения деформационных процессов.

Исследование возможности интеграции автоматизированного мониторинга в режиме реального времени с применением радарной интерферометрии осуществлена на карьере Джетыгаринского месторождения для наблюдений за сдвижением горных пород.

На поверхности карьерного поля (рис. 2) установлены два типа радиолокационных систем: CHCNAV PS-SAR2000 и Leica IBIS FM-14. Ширина зоны сканирования составляла 1,5 км, что обеспечивало полное покрытие сканируемого борта.

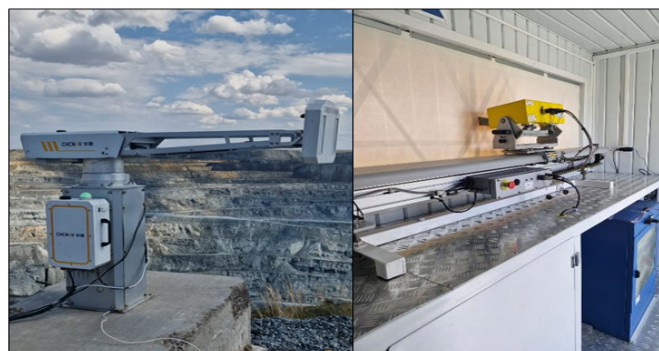
Существующие радиолокационные системы мониторинга склонов направлены на измерение смещений поверхности. Георадары, работающие на других частотах и принципах, позволяют заглянуть внутрь массива и открывают следующие научные перспективы:

- *детальное картирование внутренней структуры и скрытых дефектов (выявление скрытых геологических нарушений; выявление пустот внутри массива; мониторинг водонасыщенности;*

- *развитие методов обработки и интерпретации данных: исследования направлены на совершенствование программного обеспечения для анализа сложных георадарных данных, в частности на применение искусственного интеллекта и машинного обучения;*

- *интеграция с другими технологиями (возможность использования комплексного подхода);*

- *совершенствование геомеханического моделирования.*



**Рис. 2. Радиолокационные системы CHCNAV PS-SAR2000 и Leica IBIS FM-14, установленные на борту карьера.**

**Сурет 2. Ашық кеніш жағдайында орнатылған CHCNAV PS-SAR2000 және Leica IBIS FM-14 радиолокациялық жүйелері.**

**Figure 2. CHCNAV PS-SAR2000 and Leica IBIS FM-14 radar systems installed on board the quarry.**

### Результаты

Задачи исследований включали определение параметров работы оборудования в горнотехнических условиях, сопоставление результатов с данными традиционного мониторинга, формирование методических рекомендаций по внедрению систем, оборудования и методики [11]. Для сравнения технических характеристик применяемых радарных систем были проанализированы два наиболее распространенных типа оборудования: интерферометрический радар IBIS FM-14 и радар CHCNAV PS-SAR2000 (таблица 1). В таблице представлены ключевые параметры, определяющие их функциональные возможности в условиях горнотехнического мониторинга.

Сравнение показало, что каждая из систем обладает собственными преимуществами: LEICA IBIS FM-14 – высокая чувствительность и развитая аналитика, CHCNAV PS-SAR2000 – большая скорость обновления данных и панорамный обзор. Выбор оборудования определяется конкретными задачами мониторинга и условиями работы на объекте.

Цветовая шкала показывает распределение высот, а маркер указывает положение и ориентацию радарной станции. Данный рисунок используется для визуализации рельефа и результатов радарного мониторинга устойчивости бортов карьера (рис. 3). Он позволяет оценить пространственное распределение высот, определить потенциально неустойчивые участки и проанализировать максимальные величины смещений поверхности.

На рис. 4 представлена карта смещений поверхности борта карьера, полученная методом радарного мониторинга. Это визуализация деформационной активности откосов с использованием цветовой шкалы, где каждый цвет соответствует определенной величине смещения. Цветовая шкала справа показывает величину смещений в миллиметрах.

Красные зоны – области наибольших смещений и потенциальной нестабильности. Желтые и зеленые – умеренные смещения. Голубые и синие – минимальные или

Таблица 1

Основные характеристики радиолокационных систем

Кесте 1

Радиолокациялық жүйелердің негізгі сипаттамалары

Table 1

Main characteristics of radar systems

Параметр	IBIS FM-14	CHCNAV PS-SAR2000
Тип радара	Интерферометрический, Ku-диапазон (~17.2 ГГц)	SAR X-диапазон (~10 ГГц)
Дальность действия	До 5 км	До 5 км
Минимальное смещение	< 0.1 мм	≈ 0.1 мм
Частота съемки	1 снимок / 30 сек	1 снимок / 10–15 сек
Пространственное разрешение	до 0.5–1 м	до 0.7–1 м
Угол обзора	80 x 60	360 x 60
ПО	Guardian (аналитика, тревоги, 3D)	MAS (просто и понятно), тревоги
Фильтрация и сглаживание	Гибкая настройка	Порог фильтра (например, 50)
Интерфейс	Сложнее	Простой, интуитивный

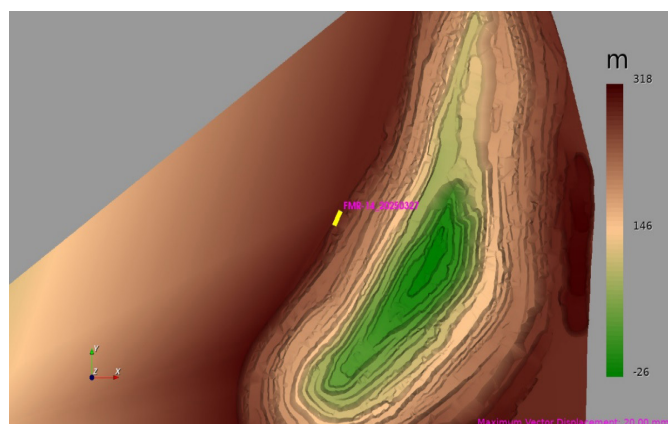


Рис. 3. Схема расположения радарных установок на борту Джетыгаринского карьера.

Сурет 3. Жетіқара ашық кенішінің жағдайында радиолокациялық қондырғылардың орналасу схемасы.

Figure 3. The layout of radar installations on board the Jetygara quarry.

отсутствующие смещения (стабильные участки). По геометрии уступов на фоне хорошо заметны контуры отдельных уступов и берм, которые окрашены согласно их подвижности. Красные полосы вдоль откосов свидетельствуют о зонах, где наблюдается повышенная деформационная активность.

На рис. 5 приведена динамика скорости смещений в течение периода с конца марта по июль 2025 года. На изображении видны отдельные маркеры/точки (черные точки) – это элементы сетки данных или контрольные точки анализа. Текстовые данные внизу. Указаны параметры съемки: расстояние до радара, высота установки, координаты, угол обзора и др. Эти данные нужны для интерпретации и привязки измерений к местности.

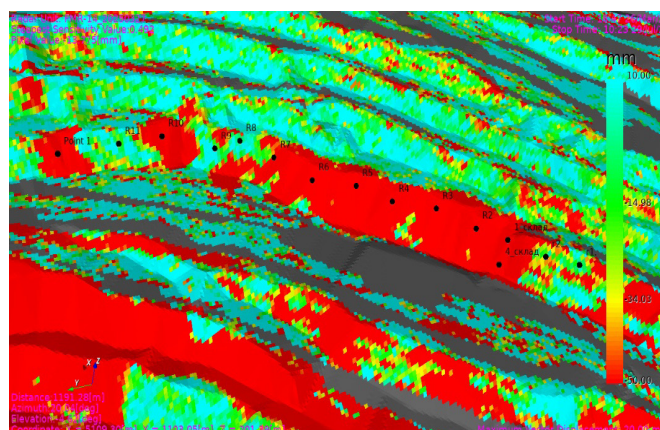


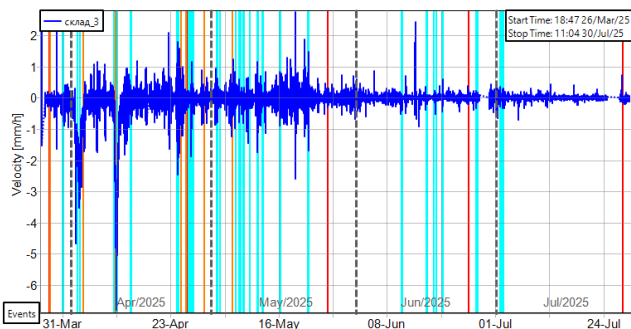
Рис. 4. Вид откоса карьера, зафиксированный радиолокационной системой.

Сурет 4. Радиолокациялық жүйемен бекітілген ашық кеніш қиябетінің түрі.

Figure 4. View of the quarry slope recorded by the radar system.

Синяя линия отражает изменения скорости деформаций во времени, оставаясь в пределах близких к нулю значений, что указывает на стабильное состояние наблюдаемого участка. Вертикальные цветные линии обозначают зафиксированные события или предупреждения системы мониторинга, связанные с изменениями параметров измерений или условиями работы оборудования.

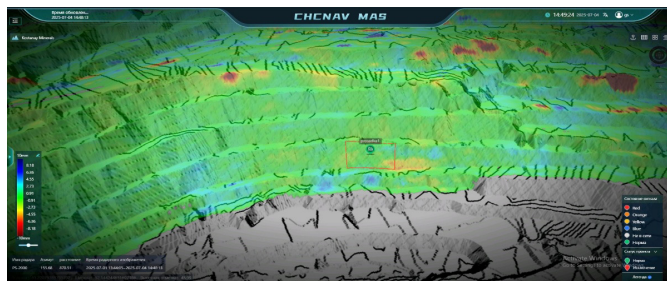
На рис. 6 представлен интерфейс программного обеспечения CHCNAV MAS, визуализирующий результаты радарного мониторинга устойчивости откосов карьера. CHCNAV MAS – программное обеспечение для автоматизированных платформ, предназначенное для мониторинга в реальном времени, визуализации данных и управления оповещениями. CHCNAV MAS объединяет технологии



**Рис. 5. Динамика скорости смещений (Velocity, мм/ч) LEICA IBIS FM-14 в течение периода с конца марта по июль 2025 года.**

**Сурет 5. Жылжуларды жылдамдық динамикасы (Velocity, мм/сағ) LEICA IBIS FM-14 2025 жылдың наурыз айының соңынан бастап шілде айының кезеңінде.**

**Figure 5. Dynamics of displacement velocity (mm/h) LEICA IBIS FM-14 during the period from the end of March to July 2025.**



**Рис. 6. Интерфейс программного обеспечения CHCNAV MAS.**

**Сурет 6. CHCNAV MAS бағдарламалық интерфейсі. Figure 6. CHCNAV MAS Software Interface.**

Интернета вещей (IoT), больших данных и 3D визуализации для управления и анализа данных с устройств удаленного мониторинга и позволяет в режиме реального времени отслеживать, визуализировать данные и управлять оповещениями [9, 10, 11].

Цветовая карта отображает величины смещений поверхности: зеленые области указывают на стабильное состояние, тогда как желтые, красные и фиолетовые зоны отражают повышенную деформационную активность. На карте отмечены контрольные точки и события системы. В нижней части представлена временная диаграмма изменения скорости смещений, позволяющая

анализировать динамику деформаций в режиме реального времени.

В ходе тестирования выделены несколько зон для мониторинга, что позволило провести детальный анализ данных и оценить состояние каждого участка. Графики деформации и скорости, полученные в ходе тестирования, демонстрируют четкую корреляцию и высокую детализацию данных, что является ключевым показателем эффективности георадаров в условиях мониторинга геотехнических параметров бортов карьера.

**Заключение**

Использование радиолокационных систем для проведения наблюдений за деформационными процессами уступов и бортов карьера позволяет получить результаты, направленные, в первую очередь, на обеспечение безопасности ведения горных работ.

Основные итоги применения радиолокационных систем позволяют:

- выявлять зоны потенциальной неустойчивости, такие как трещины, разломы, ослабленные участки и полости в массиве горных пород;
- получить детальные геологические разрезы, определить границы между различными типами пород и выявить скрытые геологические нарушения, которые могут влиять на устойчивость борта;
- отслеживать динамику развития деформаций бортов карьера на ранних стадиях.

**Выводы**

1. Получены данные о локальных деформациях с амплитудой до 3–5 мм в сутки и установлены зоны повышенной активности деформаций. Обе системы показали высокую корреляцию (> 95%) между собой и с традиционными методами мониторинга.
2. Установлены диапазоны эффективности работы CHCNAV PS-SAR2000 для мониторинга широких зон и Leica IBIS FM-14 для детального наблюдения локальных участков.
3. Выявлено, что при сопоставлении данных наблюдений, полученных с двух георадарных установок, зафиксированы идентичные результаты по накоплению смещений и свидетельствует о высокой достоверности и точности георадара PSSAR-2000, что в свою очередь подтверждает соответствие данной установки современным мировым аналогам.
4. Подтверждена высокая эффективность радарных систем CHCNAV PS-SAR2000 и Leica IBIS FM-14 для управления состоянием массива при открытой разработке, что повышает безопасность и эффективность ведения горных работ.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Hutchinson J., Bonneau D., DiFrancesco P.M., Farmakis I., Graham A., Burns R. Наблюдение и оценка инженерно-геологических средств контроля и механизмов разрушения склонов горных пород с использованием данных дистанционного зондирования // Американский геофизический союз, осеннее заседание 2020 г., тезисы № NH034-01 (на английском языке)
2. Koufopoulou A., Diamanti N., Vargemetsis G., Tsourlos P. Применение георадара для оценки качества мрамора в карьере // 29-я Европейская конференция по экологической и инженерной геофизике, 2023. С. 1–5 (на английском языке)

3. Реализация стратегии моделирования трещиноватости на основе георадарной съемки на большой площади уступа известнякового карьера / Mohamed Elkarmoty [и др.] // Геонауки. 2024. С. 1–15 (на английском языке)
4. Мониторинг устойчивости бортов карьеров Казахстана / Низаметдинов Ф.К. [и др.] // Маркшейдерский вестник. 2013. № 3. С. 19–24 (на русском языке)
5. Ожигина С.Б. Устойчивость карьерных откосов на сложноструктурных месторождениях. Совершенствование способа расчета устойчивости карьерных откосов для сложноструктурных месторождений: монография. 2013. 148 с. (на русском языке)
6. Исследование геомеханических условий Джетыгаринского месторождения хризотил-асбеста, обоснование оптимальных технологических параметров бортов карьера и разработка системы мониторинга деформационных процессов в контурах 1-й очереди отработки карьера: отчет научно-технический (промежуточный, 2 этап). Науч. рук. Сашурин А. Д. ИГД УрО РАН, Екатеринбург, 2015, 125 с. (на русском языке)
7. Определение устойчивых углов откосов уступов и бортов Джетыгаринского карьера: отчет по НИР/Магнитогорский горно-металлургический институт, Магнитогорск, 1967, 241 с. (на русском языке)
8. Исследование гидрогеологического строения Джетыгаринского месторождения хризотил-асбеста и разработка проекта осушения карьера в предельном контуре: отчет научно-технический (заключительный). Науч. рук. Сашурин А.Д. ИГД УрО РАН, Екатеринбург, 2017, 211 с. (на русском языке)
9. Геомеханический мониторинг – оценка геомеханического состояния и устойчивости горного массива Джетыгаринского карьера, разработка рекомендаций по безопасному производству горных работ: отчет научно-технический (заключительный). Науч. рук. Мельник В.В. ТОО «ИГД Казахстан», Нур-Султан, 2021, 280 с. (на русском языке)
10. Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева / Исмагилов Р.И. [и др.] // Горная промышленность. 2020. № 3. С. 84–90 (на русском языке)
11. Макеев М.А. Инновации на службе промышленной безопасности: опыт использования передовых радарных систем контроля устойчивости бортов карьеров – Reutech на предприятиях РФ // Горная промышленность. 2017. № 2 (132). С. 48–49 (на русском языке)

#### ПАЙДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Hutchinson J., Vonpeau D., DiFrancesco P.M., Farmakis I., Graham A., Burns R. Қашықтықтан зондталатын деректерді пайдалана отырып, тау жыныстарының беткейлеріндегі мінез-құлықтың инженерлік геологиялық бақылаулары мен бұзылу механизмдерін бақылау және бағалау // Американдық геофизикалық одақ, күзгі отырыс 2020, тезис № NH034-01 (ағылшын тілінде)
2. Koufopoulou A., Diamanti N., Vargemzis G., Tsourlos P. Ашық кеніштегі мәрмәр сапасын бағалау үшін жерге нетін радарды (GPR) қолдану // Экологиялық және инженерлік геофизиканың 29-шы Еуропалық кездесуі, 2023. Б. 1–5 (ағылшын тілінде)
3. Әктас ашық кенішінің үлкен кемер алаңында радиолокациялық түсірілімге негізделген жарықшақты модельдеу стратегиясын жүзеге асыру / Mohamed Elkarmoty [және т. б.] // Геология ғылымдары. 2024. Б. 1–15 (ағылшын тілінде)
4. Қазақстан ашық кеніштер жағдаулар тұрақтылығының мониторингі / Низаметдинов Ф.К. [және т. б.] // Маркшейдерлік хабаршы. 2013. № 3. Б. 19–24 (орыс тілінде)
5. Ожигина С.Б. Күрделі құрылымдық кен орындарындағы ашық кеніш қиябеттер тұрақтылығы. Күрделі құрылымдық кен орындары үшін ашық кеніш қиябеттерінің тұрақтылығын есептеу тәсілін жетілдіру: монография. 2013. 148 с. (орыс тілінде)
6. Жетіқара хризотил-асбест кен орнының геомеханикалық жағдайларын зерттеу, ашық кеніш жағдауларының оңтайлы технологиялық параметрлерін негіздеу және ашық кенішті игеру 1-ші кезегінің контурында деформациялық процестердің мониторингі жүйесін әзірлеу: ғылыми-техникалық есеп (аралық, 2-кезең). Ғылыми жет. Сашурин А.Д. ТКИ РҒА Орал бөлімі, Екатеринбург, 2015, 125 б. (орыс тілінде)
7. Жетіқара ашық кеніш кемер қиябеттері мен жағдауларының тұрақты бұрыштарын анықтау: ҒЗЖ/Магнитогорск тау-кен металлургия институты бойынша есеп, Магнитогорск, 1967, 241 б. (орыс тілінде)
8. Жетіқара хризотил-асбест кен орнының гидрогеологиялық құрылымын зерттеу және шекті контурдағы ашық кенішті құрғату жобасын әзірлеу: ғылыми-техникалық есеп (қорытынды). Ғылыми жет. Сашурин А.Д. ТКИ РҒА Орал бөлімі, Екатеринбург, 2017, 211 б. (орыс тілінде)
9. Геомеханикалық мониторинг Жетіқара ашық кенішінің тау алабының геомеханикалық жай-күйі мен орнықтылығын бағалау, тау-кен жұмыстарын қауіпсіз өндіру бойынша ұсынымдар әзірлеу:

ғылыми-техникалық есеп (қорытынды). Ғылыми жет. Мельник В.В. «Қазақстан ТКИ» ЖШС, Нұр-Сұлтан, 2021, 280 б. (орыс тілінде)

10. А.В. Варичев атындағы Михайловка КБК оңтүстік ашық кенішінде тік бұрышты конвейерлік кешеннің құрылыс учаскесінде георадарды пайдалану (тестілеу тәжірибесі) / Исмагилов Р.И. [және т. б.] // Тау-кен өнеркәсібі. 2020. № 3. Б. 84–90 (орыс тілінде)
11. Makeev M.A. Өнеркәсіптік қауіпсіздік қызметіндегі инновациялар: Ашық кеніш жағдайының тұрақтылығын бақылаудың озық радиолокациялық жүйелерін пайдалану тәжірибесі РФ кәсіпорындарында Reutech // Тау-кен өнеркәсібі. 2017. № 2 (132). Б. 48–49 (орыс тілінде)

#### REFERENCES

1. Hutchinson J., Bonneau D., DiFrancesco P.M., Farmakis I., Graham A., Burns R. Observation and assessment of engineering geology controls and failure mechanisms on rock slope behaviour utilizing remotely sensed data // American Geophysical Union, Fall Meeting 2020, Abstracts No. NH034-01 (in English)
2. Koufopoulou A., Diamanti N., Vargemezis G., Tsourlos P. Application of Ground Penetrating Radar (GPR) for Marble Quality Assessment in a Quarry // 29th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2023. 1–5 pp. (in English)
3. Implementation of a Fracture Modeling Strategy Based on Georadar Survey in a Large Area of Limestone Quarry Bench / Mohamed Elkarmoty [et al.] // Geosciences. 2024. 1–15 pp. (in English)
4. Monitoring ustoichivosti bortov kar'erov Kazakhstana [Monitoring the stability of the sides of quarries in Kazakhstan], Nizametdinov F.K. [et al.], Marksheiderskii vestnik [Surveying Bulletin]. 2013. No. 3. 19–24 pp. (in Russian)
5. Ozhigina S.B. Ustoichivost' kar'ernykh otkosov na slozhnostrukturnykh mestorozhdeniyakh. Sovershenstvovanie sposoba rascheta ustoichivosti kar'ernykh otkosov dlya slozhnostrukturnykh mestorozhdenii: monografiya [Stability of quarry slopes in complex-structured deposits. Improving the method of calculating the stability of quarry slopes for complex-structured deposits: Monograph]. 2013. 148 p. (in Russian)
6. Issledovanie geomekhanicheskikh uslovii Dzhetygarinskogo mestorozhdeniya khризотил-асбеста, obosnovanie optimal'nykh tekhnologicheskikh parametrov bortov kar'era i razrabotka sistemy monitoringa deformatsionnykh protsessov v konturakh 1-i ocheredi otrabotki kar'era: otchet nauchno-tekhnicheskii (promezhutochnyi, 2 etap) [Investigation of the geomechanical conditions of the Dzhetygarinsky chrysotile-asbestos deposit, substantiation of optimal technological parameters of the sides of the quarry and development of a system for monitoring deformation processes in the contours of the 1st stage of quarry mining: scientific and technical report (intermediate, 2nd stage)]. Scientific hand. Sashurin A.D. IGD UrO RAN [Institute of Mining Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], Ekaterinburg, 2015, 125 p. (in Russian)
7. Opredelenie ustoichivyykh uglov otkosov ustupov i bortov Dzhetygarinskogo kar'era: otchet po NIR/ Magnitogorskii gorno-metallurgicheskii institut [Determination of stable angles of slopes of ledges and sides of the Dzhetygarinsky quarry: a research report/Magnitogorsk Mining and Metallurgical Institute], Magnitogorsk, 1967, 241 p. (in Russian)
8. Issledovanie gidrogeologicheskogo stroeniya Dzhetygarinskogo mestorozhdeniya khризотил-асбеста i razrabotka proekta osusheniya kar'era v predel'nom konture: otchet nauchno-tekhnicheskii (zaklyuchitel'nyi) [Investigation of the hydrogeological structure of the Dzhetygarinsky chrysotile-asbestos deposit and development of a quarry drainage project in the limiting contour: scientific and technical report (final)]. Scientific hands. Sashurin A.D. IGD UrO RAN [Institute of Mining Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], Yekaterinburg, 2017. 211 p. (in Russian)
9. Geomekhanicheskii monitoring – otsenka geomekhanicheskogo sostoyaniya i ustoichivosti gornogo massiva Dzhetygarinskogo kar'era, razrabotka rekomendatsii po bezopasnomu proizvodstvu gornyykh rabot: otchet nauchno-tekhnicheskii (zaklyuchitel'nyi) [Geomechanical monitoring – assessment of the geomechanical condition and stability of the Dzhetygara quarry mountain range, development of recommendations for safe mining operations: scientific and technical report (final)]. Scientific hands. Melnik V.V. TOO «IGD Kazakhstan» [Institute of Mining Kazakhstan LLP], Nur-Sultan, 2021, 280 p. (in Russian)
10. Ispol'zovanie (opyt testirovaniya) georadara na uchastke stroitel'stva krutonaklonnogo konveiernogo kompleksa na yuzhnom kar'ere Mikhailovskogo GOKa im. A.V. Varicheva [The use (testing experience) of GPR at the construction site of the steep-slope conveyor complex at the southern quarry of the Mikhailovsky GOK named after A.V. Varichev], Ismagilov R.I. [et al.], Gornaya promyshlennost' [Mining Industry]. 2020. No. 3. 84–90 pp. (in Russian)
11. Makeev M.A. Innovatsii na sluzhbe promyshlennoi bezopasnosti: opyt ispol'zovaniya peredovykh radarnyykh sistem kontrolya ustoichivosti bortov kar'erov – Reutech na predpriyatiyakh RF [Innovations in

*the industrial safety service: the experience of using advanced radar systems for monitoring the stability of quarry sides – Reutech at enterprises of the Russian Federation], Gornaya promyshlennost' [Mining Industry]. 2017. No. 2 (132). 48–49 pp. (in Russian)*

#### Сведения об авторах:

**Низаметдинов Ф.К.**, д.т.н., профессор кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), [niz36@mail.ru](mailto:niz36@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1933-6351>

**Смагулов А.Р.**, директор АО «Костанайские минералы» (г. Житикара, Казахстан), [smagulov\\_ar@mail.ru](mailto:smagulov_ar@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0005-6997-5679>

**Султанбекова А.И.**, магистрант кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия» НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), [Sultanbekova@inbox.ru](mailto:Sultanbekova@inbox.ru); <https://orcid.org/0009-0006-8489-0021>

**Естаева А.Р.**, м.т.н., ст. преподаватель кафедры «Геодезия и картография» НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина» (г. Астана, Казахстан), [estaeva\\_a@mail.ru](mailto:estaeva_a@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7242-0931>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Низаметдинов Ф.К.**, т.ғ.д., «Әбілқас Сағынов Қарағанды техникалық университеті», «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының профессоры (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Смагулов А.Р.**, «Костанайские минералы» АҚ директоры (Жітіқара қ., Қазақстан)

**Султанбекова А.И.**, «Әбілқас Сағынов Қарағанды техникалық университеті», «Маркшейдерлік іс және геодезия» кафедрасының магистранты (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Естаева А.Р.**, т.ғ.м., С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, «Геодезия және картография» кафедрасының аға оқытушысы (Астана қ., Қазақстан)

#### Information about the authors:

**Nizametdinov F.K.**, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Surveying and Geodesy, NAO «Karaganda Technical University named after A. Saginov» (Karaganda, Kazakhstan)

**Smagulov A.R.**, Director of «Kostanay Minerals» JSC (Gitikara, Kazakhstan)

**Sultanbekova A.I.**, Master's student of the Department of Surveying and Geodesy, NAO «Karaganda Technical University named after A. Saginov» (Karaganda, Kazakhstan)

**Yestayeva A.R.**, Master of Technical Sciences, senior lecturer at the Department of Geodesy and Cartography, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin (Astana, Kazakhstan)



**Machine Building and Metal Working**

# XVII

МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ПРОМЫШЛЕННАЯ  
ВЫСТАВКА

2026

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА

#### Организатор:



МВК «Атакент-Экспо»  
Республика Казахстан, 050057, г. Алматы,  
ул. Тимирязева, 42  
Тел.: +7 (727) 275 09 11, Моб.: +7 701 477 84 18  
E-mail: [venera@atakentexpo.kz](mailto:venera@atakentexpo.kz)  
[www.machinery-expo.kz](http://www.machinery-expo.kz)

#### Официальная поддержка:



Министерство индустрии и  
инфраструктурного  
развития Республики Казахстан

[machinery-expo.kz](http://machinery-expo.kz)



Казахстан, Алматы  
ВЦ «Атакент»

12 - 14 МАЯ

Код МРНТИ 52.13.23:52.13.25

М.А. Байкенжин<sup>1</sup>, \*Ж.Б. Рашид<sup>1</sup>, Ш.А. Очилов<sup>2</sup><sup>1</sup>НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан),<sup>2</sup>Университет геологических наук (г. Ташкент, Узбекистан)

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕССТОЕЧНОЙ КРЕПИ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОКРУЖАЮЩИМ МАССИВОМ ПОРОД

**Аннотация.** В статье представлено физическое моделирование бесстоечной шарнирной крепи, предназначенной для поддержания подготовительных горных выработок. Основная цель данного исследования – экспериментально подтвердить результаты ранее выполненного численного анализа напряженно-деформированного состояния конструкции и тем самым доказать достоверность и эффективность шарнирной схемы по сравнению с традиционной прямолинейной балкой. Моделирование проводилось с использованием программного комплекса Ansys Mechanical и гидравлического пресса GCTS PLT-2W. Полученные данные показали, что шарнирная крепь обеспечивает более равномерное распределение нагрузок, повышает несущую способность и снижает давление на боковые стенки выработки, что подтверждает ее практическую эффективность в реальных горных условиях.

**Ключевые слова:** бесстоечная крепь, шарнирная конструкция, подготовительные выработки, физическое моделирование, численное моделирование, GCTS PLT-2W, напряженно-деформированное состояние, распределение нагрузок, устойчивость выработки.

### Қоршаған тау жыныстары массивімен өзара әрекеттесетін тірексіз бекітпенің физикалық модельдеуі

**Аннотация.** Мақалада дайындық тау-кен қазбаларын бекітуге арналған тірексіз шарнирлі крептің физикалық модельдеуі ұсынылған. Зерттеудің негізгі мақсаты – конструкцияның кернеулі-деформацияланған күйінің бұрын орындалған сандық талдау нәтижелерін эксперименттік түрде растау және шарнирлі сұлбаның дәстүрлі түзу арқалықпен салыстырғандағы сенімділігі мен тиімділігін дәлелдеу. Модельдеу Ansys Mechanical бағдарламалық кешені мен GCTS PLT-2W гидравликалық пресі қолдану арқылы жүргізілді. Алынған нәтижелер шарнирлі крепь жүктемелердің біркелкі таралуын қамтамасыз ететінін, көтергіш қабілетін арттыратынын және қазбаның бүйір қабырғаларына түсетін қысымды төмендететінін көрсетті, бұл оның нақты тау-кен жағдайларындағы практикалық тиімділігін дәлелдейді.

**Түпінді сөздер:** тірексіз бекітпе, шарнирлі конструкция, дайындық қазбалары, физикалық модельдеу, сандық модельдеу, GCTS PLT-2W, кернеулі-деформацияланған күй, жүктемелердің таралуы, қазбаның тұрақтылығы.

### Physical modeling of strutless support interacting with the surrounding rock mass

**Abstract.** The paper presents physical modeling of a strutless hinged support designed for maintaining development mine workings. The main objective of the study is to experimentally confirm the results of a previously performed numerical analysis of the stress-strain state of the structure and thereby demonstrate the reliability and efficiency of the hinged scheme compared to a traditional straight beam. The modeling was carried out using the Ansys Mechanical software package and a GCTS PLT-2W hydraulic press. The obtained results show that the hinged support provides a more uniform load distribution, increases load-bearing capacity, and reduces pressure on the sidewalls of the working, confirming its practical effectiveness under real mining conditions.

**Key words:** strutless support, hinged structure, development workings, physical modeling, numerical modeling, GCTS PLT-2W, stress-strain state, load distribution, working stability.

### Введение

Одной из актуальных задач современного горного дела является обеспечение устойчивости подготовительных выработок при сложных горно-геологических условиях. От надежности и эффективности работы крепи зависит безопасность ведения горных работ и долговечность эксплуатации выработок. Традиционные конструкции, выполненные в виде цельной прямолинейной балки, нередко оказываются недостаточно устойчивыми при воздействии переменных нагрузок, что приводит к деформациям и дополнительным напряжениям в боковых частях выработки [1–2].

Применение численного и физического моделирования позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние элементов крепи и выявлять закономерности их взаимодействия с окружающим массивом пород [3]. Использование таких инструментов, как Ansys Mechanical, обеспечивает возможность точного расчета распределения нагрузок, а физические эксперименты позволяют подтвердить достоверность полученных расчетных данных [4–6].

Проблема исследования заключается в необходимости экспериментального подтверждения численных расчетов и сравнительной оценки различных конструктивных схем бесстоечной крепи. Недостаточная изученность совместной работы элементов шарнирной системы и массива пород в условиях реальных нагрузок требует дополнительного анализа и проверки [7].

Целью исследования является подтверждение результатов численного анализа напряженно-деформированного

состояния бесстоечной шарнирной крепи и доказательство ее преимуществ перед традиционной прямолинейной балочной конструкцией.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- проведение физического моделирования работы бесстоечной шарнирной крепи с использованием гидравлического пресса GCTS PLT-2W;
- сопоставление результатов физических испытаний с данными численного моделирования, выполненного в Ansys Mechanical;
- анализ различия в напряженно-деформированном состоянии для шарнирной и прямолинейной схем крепи;
- определение конструктивных особенностей, обеспечивающих повышение несущей способности и снижение давления на боковые стенки выработки.

### Методология исследования

Для обоснования эффективности предлагаемой конструкции были проведены численные исследования с использованием программного комплекса Ansys Mechanical, а также физическое моделирование на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W. В рамках численного моделирования были рассмотрены следующие варианты конструкции крепи:

- верхняя выработка в виде прямой балки;
- верхняя выработка, разделенный на две части шарниром, с различными углами наклона составных частей балки (20°, 25°, 30°, 35°).

Основной целью численного моделирования было выявление оптимального угла наклона для минимизации напряжений в конструкции [8].

Методология исследования основана на комплексном применении численного и физического моделирования, что позволило всесторонне оценить работу бесстоечной крепи и ее взаимодействие с окружающим массивом пород. На первом этапе было выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции с использованием программного комплекса Ansys Mechanical. В расчетной постановке учитывались геометрические и прочностные характеристики элементов крепи, а также граничные условия, моделирующие опирание крепи на боковые стенки выработки и воздействие горного давления.

В ходе численного моделирования были рассмотрены два основных конструктивных решения: верхняк в виде цельной прямолинейной балки и верхняк, разделенный на две части шарнирным соединением. Для шарнирной схемы анализировались различные углы наклона составных элементов, равные 20°, 25°, 30° и 35°, с целью определения оптимальной геометрии конструкции. Основным критерием оценки являлись величины и характер распределения эквивалентных напряжений, а также деформации в наиболее нагруженных зонах крепи.

На втором этапе исследования было проведено физическое моделирование работы крепи на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W. Для этого были изготовлены физические модели верхняка в виде прямой балки и шарнирной балки с углом наклона, выбранным по результатам численного анализа. Нагружение осуществлялось поэтапно до достижения предельного состояния, при этом регистрировались зависимости нагрузки от перемещения и фиксировались значения максимальной воспринимаемой нагрузки.

Заключительным этапом методологии стало сопоставление результатов численного и физического моделирования. Сравнительный анализ позволил оценить степень соответствия расчетных и экспериментальных данных, подтвердить достоверность численных моделей и выявить конструктивные преимущества бесстоечной шарнирной крепи по сравнению с традиционной прямолинейной балочной схемой [9–10].

### Результаты и обсуждения

В результате выполненного численного моделирования установлено, что конструктивная схема бесстоечной крепи с шарнирным соединением обеспечивает более благоприятное распределение напряжений по сравнению с традиционной прямолинейной балкой. Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что при использовании шарнирного верхняка происходит снижение концентрации эквивалентных напряжений в центральной части конструкции и их перераспределение в сторону опорных зон, что уменьшает риск локальных разрушений.

Сравнительный анализ различных углов наклона составных элементов шарнирного верхняка показал, что наилучшие показатели достигаются при угле 25°. В этом случае фиксируется минимальная интенсивность напря-

жений и наиболее равномерное их распределение по всей длине верхняка. При углах 20° и 35° наблюдается увеличение напряжений в зоне шарнира, а при угле 30° – рост деформаций в центральной части конструкции, что свидетельствует о снижении эффективности данных вариантов.

Результаты физического моделирования, выполненного на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W, подтвердили выводы численного анализа. Испытания показали, что предельная нагрузка для прямолинейной балки составила 76,91 кН, тогда как для шарнирной конструкции с углом наклона 25° данный показатель достиг 117,78 кН. Таким образом, применение шарнирной схемы позволило увеличить несущую способность верхняка более чем на 50% по сравнению с традиционной конструкцией.

Кроме того, в ходе физических испытаний было установлено, что характер деформирования шарнирной крепи отличается более плавным развитием деформаций без резких скачков, что указывает на повышение ее работоспособности и устойчивости при возрастании нагрузки. Локализация зон максимальных деформаций, выявленных в ходе экспериментов, хорошо согласуется с результатами численного моделирования, что подтверждает корректность принятых расчетных предпосылок.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что бесстоечная шарнирная крепь обладает повышенной несущей способностью, более равномерно воспринимает горное давление и снижает нагрузку на боковые стенки выработки. Это подтверждает ее эффективность и целесообразность применения в условиях подготовительных горных выработок при сложном напряженном состоянии массива пород.

Компьютерное исследование показало, что наибольшую эффективность в плане снижения напряжений продемонстрировал верхняк с углами наклона его составных частей 25°. В этом случае интенсивность напряжений была ниже по сравнению с другими углами наклона, что позволило рекомендовать данный угол как оптимальный для реализации в конструктивной части крепи.

Для подтверждения численных результатов было проведено физическое моделирование на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W. Эксперименты включали испытания двух вариантов конструкции: прямой балки и балки, разделенной на две части шарниром.

Результаты испытаний показали следующие значения предела прочности на сжатие:

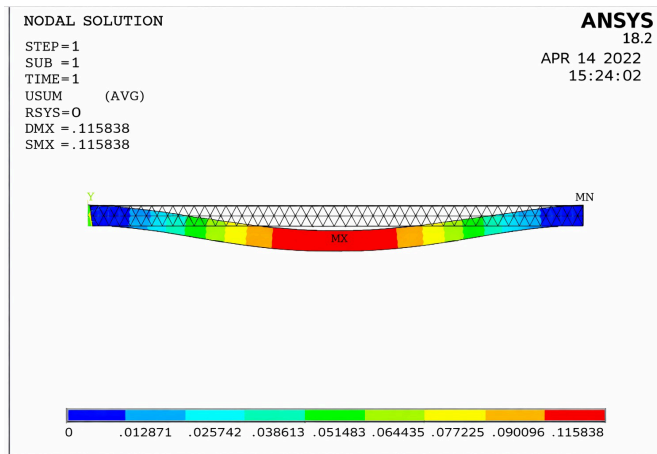
- для прямой балки – 76,91 кН;

- для балки, разделенной на две части шарниром с углом наклона 25° – 117,78 кН.

Кроме того, было подтверждено расположение точек с максимальными деформациями, что подтвердило расчетные данные о наиболее уязвимых участках конструкции, что позволит усилить крепь, применив дополнительные простые в изготовлении и установке конструктивные элементы [2].

Результаты моделирования для прямой балки приведены на рис. 1.

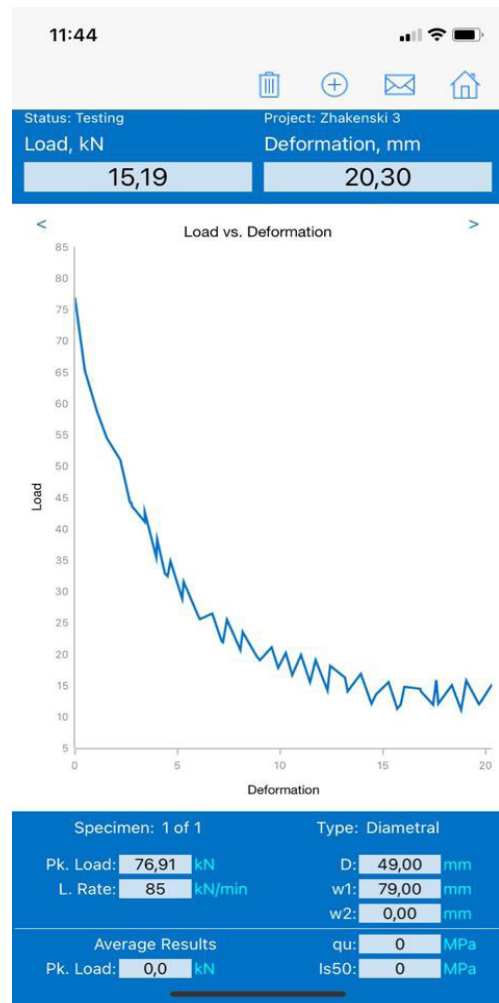
Анализ рисунка показывает хорошее соответствие результатов численного моделирования данным физического эксперимента. Максимальные деформации, локализован-



а)



б)



в)

**Рис. 1. Результаты численного и физического моделирования работы верхняка бесстоечной крепи:**

а) распределение вертикальных перемещений верхняка, полученное по результатам численного моделирования в программном комплексе ANSYS, демонстрирующее максимальные прогибы в центральной части балки; б) общий вид экспериментальной установки и образца верхняка в процессе физического моделирования на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W; в) экспериментальная диаграмма зависимости нагрузки от деформации, отражающая характер работы конструкции вплоть до достижения предельного состояния.

**Сурет 1. Тірексіз крестің жоғарғы арқалығының жұмысын сандық және физикалық модельдеу нәтижелері:**

а) ANSYS бағдарламалық кешенінде жүргізілген сандық модельдеу нәтижелері бойынша алынған үстіңгі арқалықтың тік орын ауыстыруларының таралуы, арқалықтың орталық бөлігінде ең үлкен иілудердің байқалатынын көрсетеді; б) GCTS PLT-2W гидравликалық пресінде физикалық модельдеу жүргізу барысында эксперименттік қондырғының және үстіңгі арқалық үлгісінің жалпы көрінісі; в) жүктеме мен деформация арасындағы тәуелділіктің эксперименттік диаграммасы, конструкцияның шекті күйге жеткенге дейінгі жұмыс сипатын бейнелейді.

**Figure 1. Results of numerical and physical modeling of the performance of the strutless support top beam:**

а) distribution of vertical displacements of the top beam obtained from numerical modeling results in the ANSYS software package, demonstrating maximum deflections in the central part of the beam; б) general view of the experimental setup and the top beam specimen during physical modeling on the GCTS PLT-2W hydraulic press; в) experimental load-deformation diagram reflecting the structural behavior up to the ultimate limit state.

ные в центральной части верхняка, подтверждают корректность принятой расчетной схемы. Экспериментальная кривая «нагрузка – деформация» характеризуется плавным снижением несущей способности после достижения пикового значения нагрузки, что свидетельствует о работоспособности конструкции и отсутствии хрупкого разрушения.

В результате численного моделирования напряженно-деформированного состояния верхняка бесстоеч-

ной крепи установлено, что максимальные вертикальные перемещения для конструкции в виде прямой балки достигают 20,30 мм, при этом наибольшие деформации локализуются в центральной части пролета. Максимальная воспринимаемая нагрузка в данном варианте конструкции составила 76,91 кН, что соответствует достижению предельного состояния по прочности.

Для шарнирной конструкции верхняка с углом наклона составных элементов  $25^\circ$ , определенным как оптимальный по результатам численного анализа, зафиксировано снижение максимальных напряжений и более равномерное распределение деформаций. Экспериментально установленная предельная нагрузка для данного варианта составила 117,78 кН, что превышает аналогичный показатель для прямолинейной балки на 40,87 кН, или примерно на 53%.

В ходе физического моделирования на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W при нагрузке 15,19 кН была зарегистрирована деформация образца, равная 20,30 мм, что соответствует начальному этапу интенсивного деформирования конструкции. Максимальная скорость нагружения в ходе эксперимента составляла 85 кН/мин, диаметр испытуемого образца – 49 мм, длина рабочей части – 79 мм.

Экспериментальная диаграмма «нагрузка – деформация» показала, что после достижения пикового значения нагрузки 76,91 кН для прямолинейной балки наблюдается постепенное снижение несущей способности без резкого разрушения, что указывает на пластический характер деформирования. Для шарнирной конструкции характер разрушения оказался более устойчивым, с плавным разви-

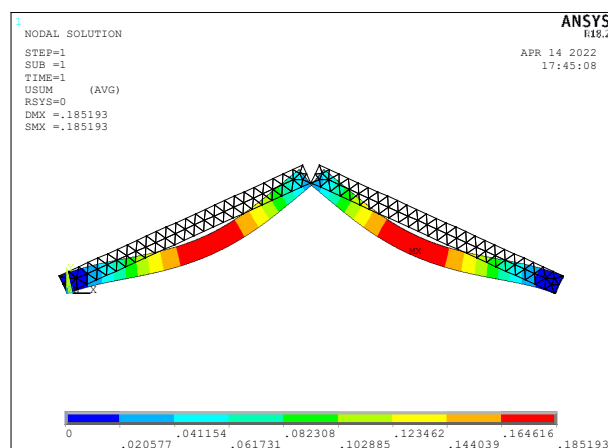
тием деформаций и отсутствием локальных концентраций напряжений.

Полученные численные значения подтверждают, что применение бесстоечной шарнирной крепи с углом наклона  $25^\circ$  обеспечивает значительное увеличение несущей способности, снижение уровня деформаций и повышение общей устойчивости конструкции по сравнению с традиционной прямолинейной схемой.

Результаты моделирования для бесстоечной шарнирной крепи приведены на рис. 2.

По результатам численного моделирования установлено, что максимальные эквивалентные напряжения в элементах шарнирного верхняка достигают 185,19 МПа. Наибольшие значения напряжений локализуются в зонах, прилегающих к шарнирному соединению и переходным участкам между центральной и боковыми частями конструкции, тогда как в центральной зоне наблюдается более равномерное распределение напряжений без выраженных концентраций.

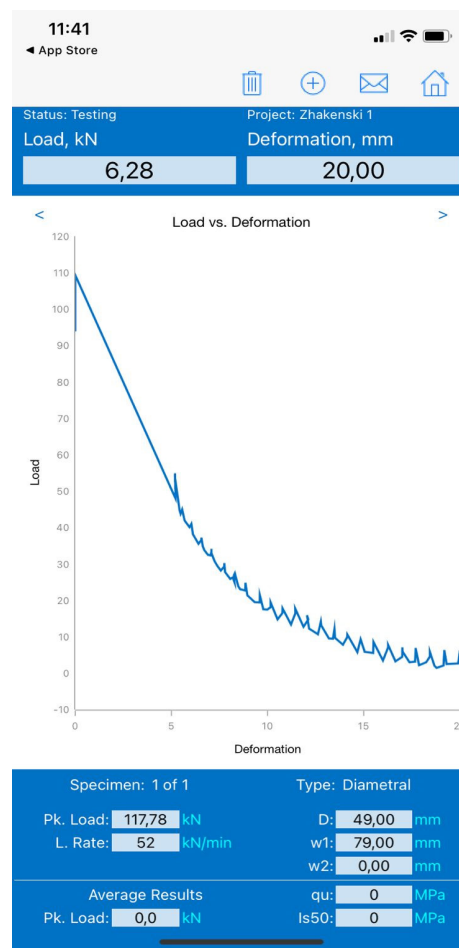
Максимальные вертикальные перемещения конструкции, полученные в ходе расчета, составляют 20,0 мм, что соответствует допустимому уровню деформаций для рассматриваемой схемы крепи. По сравнению с прямолиней-



a)



б)



в)

**Рис. 2. Результаты моделирования для бесстоечной шарнирной крепи.**

**Сурет 2. Тірексіз шарнирлі бекітпе үшін модельдеу нәтижелері.**

**Figure 2. Modeling results for the strutless hinged support.**

ной балкой отмечается снижение прогибов в центральной части и перераспределение деформаций в сторону боковых элементов.

Результаты физического моделирования, выполненного на гидравлическом прессе GCTS PLT-2W, показали, что при деформации 20,0 мм текущая нагрузка составляет 6,28 кН, что соответствует стадии упругопластического деформирования конструкции. Максимальная воспринимаемая нагрузка для шарнирной крепи достигла 117,78 кН, что характеризует ее предельную несущую способность.

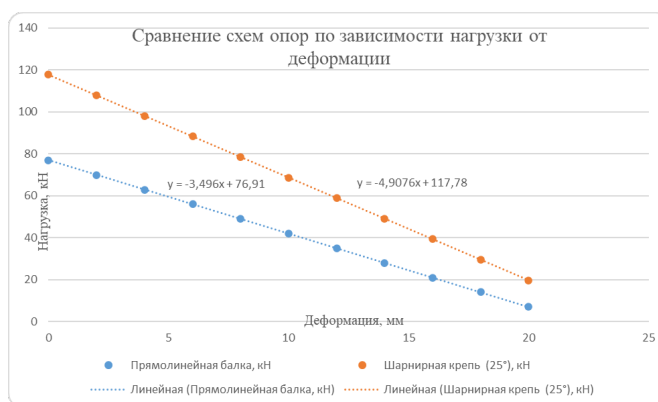
Скорость нагружения в ходе эксперимента составляла 52 кН/мин, диаметр испытуемого образца – 49 мм, длина рабочей части – 79 мм. Экспериментальная диаграмма «нагрузка – деформация» имеет плавный нисходящий характер после достижения пикового значения нагрузки, что указывает на отсутствие хрупкого разрушения и высокую энергоёмкость шарнирной конструкции.

Таким образом, совокупность численных и экспериментальных данных подтверждает, что бесстоечная шарнирная крепь обладает повышенной несущей способностью (117,78 кН) и более благоприятным напряженно-деформированным состоянием по сравнению с традиционной прямолинейной схемой, что свидетельствует о ее высокой эффективности при поддержании подготовительных горных выработок. Сводные количественные результаты численного и физического моделирования, а также процентное сравнение шарнирной крепи с прямолинейной балкой приведены в таблице 1.

Установлено, что применение бесстоечной шарнирной крепи с углом наклона 25° обеспечивает увеличение предельной несущей способности с 76,91 до 117,78 кН, что соответствует приросту на 53,1% по сравнению с прямолинейной балкой. При этом максимальные деформации конструкции остаются практически на одном уровне (около 20 мм), что свидетельствует о более эффективной работе конструкции без увеличения прогибов. Численное моделирование показало, что для шарнирной крепи

максимальные эквивалентные напряжения составляют 185,19 МПа и характеризуются более равномерным распределением по элементам конструкции, тогда как для прямолинейной балки наблюдаются выраженные локальные концентрации напряжений в центральной части пролета. Экспериментальные диаграммы «нагрузка – деформация» подтверждают, что шарнирная схема демонстрирует упругопластический характер деформирования с плавным снижением несущей способности после достижения пиковых нагрузок, в отличие от прямолинейной балки, для которой разрушение носит более резкий характер.

Как показано на рис. 3, шарнирная крепь демонстрирует более высокий уровень несущей способности и более устойчивый характер деформирования по сравнению с прямолинейной балкой.



**Рис. 3. Сравнительная диаграмма «нагрузка – деформация» для прямолинейной балки и бесстоечной шарнирной крепи (25°).**

**Сурет 3. Түзу арқалық пен тірексіз шарнирлі крепь (25°) үшін «жүктеме–деформация» салыстырмалы диаграммасы.**

**Figure 3. Comparative load–deformation diagram for a straight beam and a strutless hinged support (25°).**

*Сравнительные результаты численного и физического моделирования бескаркасных опор*

*Таблица 1*

*Қаңқасыз тіректерді сандық және физикалық модельдеудің салыстырмалы нәтижелері*

*Кесте 1*

*Comparative results of numerical and physical modeling of frameless supports*

*Table 1*

Показатель	Прямолинейная балка	Шарнирная крепь (25°)	Изменение, %
Максимальная нагрузка, кН	76,91	117,78	+53,1 %
Максимальная деформация, мм	20,30	20,00	-1,5 %
Максимальные эквивалентные напряжения, МПа	выше, локальные концентрации	185,19 (равномернее распределены)	—
Характер деформирования	выраженная концентрация в центре	перераспределение к шарниру	—
Тип разрушения	ближе к хрупкому	упругопластический, плавный	—
Скорость нагружения, кН/мин	85	52	-38,8 %
Диаметр образца, мм	49	49	0
Длина рабочей части, мм	79	79	0

Анализ сравнительного графика «нагрузка – деформация» показывает существенные различия в работе прямолинейной балки и бесстоечной шарнирной крепи. Для прямолинейной балки максимальная воспринимаемая нагрузка составляет 76,91 кН, при этом при деформации 10 мм нагрузка снижается до approximately 34–36 кН, а при деформации 20 мм – до 10–12 кН, что свидетельствует о резком снижении несущей способности конструкции после достижения пикового значения.

В то же время для бесстоечной шарнирной крепи с углом наклона  $25^\circ$  максимальная нагрузка достигает 117,78 кН, что превышает аналогичный показатель прямолинейной балки на 40,87 кН, или 53,1%. При деформации 10 мм шарнирная конструкция сохраняет нагрузку на уровне 50–55 кН, что на 45–60% выше по сравнению с прямой балкой. При деформации 20 мм нагрузка шарнирной крепи составляет 22–25 кН, тогда как для прямолинейной балки данный показатель не превышает 12 кН.

Таким образом, при одинаковом уровне деформаций шарнирная крепь демонстрирует существенно более высокую остаточную несущую способность и более плавный характер снижения нагрузки. Площадь под кривой «нагрузка – деформация», характеризующая энергоёмкость конструкции, для шарнирной крепи значительно больше, что указывает на ее повышенную работоспособность и устойчивость к прогрессирующему деформированию.

Полученные числовые значения подтверждают, что внедрение шарнирного соединения позволяет не только

увеличить предельную нагрузку более чем на 50%, но и обеспечить более стабильную работу крепи в постпиковом режиме, что имеет важное практическое значение для поддержания подготовительных горных выработок в условиях повышенного горного давления.

### Заключение

В работе выполнено численное и физическое моделирование работы бесстоечной шарнирной крепи. Установлено, что применение шарнирного соединения в верхняке обеспечивает более равномерное распределение напряжений и снижение их концентрации по сравнению с прямолинейной балкой. По результатам численного анализа оптимальным признан угол наклона составных элементов  $25^\circ$ , при котором достигаются минимальные значения эквивалентных напряжений.

Экспериментальные испытания показали, что предельная несущая способность шарнирной крепи составляет 117,78 кН, что на 53,1% выше, чем у прямолинейной балки (76,91 кН), при сопоставимых максимальных деформациях порядка 20 мм. Анализ диаграмм «нагрузка – деформация» подтвердил более устойчивый упругопластический характер работы шарнирной конструкции и ее повышенную энергоёмкость.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности бесстоечной шарнирной крепи и обосновывают целесообразность ее применения для поддержания подготовительных горных выработок в условиях повышенного горного давления.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Байкенжин М.А., Рашид Ж.Б. Исследование работы безопорной шарнирной крепи в подготовительных выработках // Труды межд. научно-практической конф. «Сагынские чтения», Караганда, 2021. С. 1141–1143 (на казахском языке)
2. Моделирование влияния усилителей из прокатного профиля на несущую способность арочной крепи / Байкенжин М. [и др.] // Mining of Mineral Deposits. 2022. Т. 16. № 1. С. 84–91 (на английском языке)
3. Хек Э., Браун Э.Т. Подземные выработки в скальных породах: Лондон: Институт горного дела и металлургии, 1980. 527 с. (на английском языке)
4. Брэди Б.Х.Г., Браун Э.Т. Механика горных пород для подземных горных работ. 3-е изд.: Дордрехт: Springer, 2004. 628 с. (на английском языке)
5. Пальмстрем А., Брэх Э. Использование и неправильное применение систем классификации массива горных пород с особым вниманием к системе Q // Tunnelling and Underground Space Technology. 2006. Т. 21. № 6. С. 575–593 (на английском языке)
6. Бартон Н. Качество горных пород, сейсмическая скорость, затухание и анизотропия: Boca Raton: CRC Press, 2006. 744 с. (на английском языке)
7. Ли Ц.Ц. Принципы проектирования анкерного крепления // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Т. 9. № 3. С. 396–414 (на английском языке)
8. Виндзор К.Р., Томпсон А.Г. Системы укрепления горных пород // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1992. Т. 29. № 4. С. 363–369 (на английском языке)
9. Сингх Б., Гозл Р.К. Инженерная классификация массива горных пород: тоннели, фундаменты и оползни: Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2011. 306 с. (на английском языке)
10. Контоянни В., Стирос С. Индуцированные деформации при проходке тоннелей: данные геодезического мониторинга // Engineering Geology. 2005. Т. 79. № 1–2. С. 115–126 (на английском языке)

### ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Байкенжин М.А., Рашид Ж.Б. Дайындық қазбаларындағы тірексіз шарнирлі бекітпенің жұмысын зерттеу // «Сагын оқулары» халықаралық ғылыми-практикалық конференциясының еңбектері, Қарағанды, 2021. Б. 1141–1143 (қазақ тілінде)
2. Байкенжин М., Асанова З., Рашид З., Касимов А., Иваделинова Д., Жунис Г. Аркалық бекітпенің көтергіш қабілетіне иелетелген профильді күшейткіштердің әсерін модельдеу / Байкенжин М. [және т. б.] // Mining of Mineral Deposits. 2022. Т. 16. № 1. Б. 84–91 (ағылшын тілінде)

3. Хек Э., Браун Э.Т. Тау жыныстарындағы жерасты қазбалары: Лондон: Тау-кен және металлургия институты, 1980. 527 б. (ағылшын тілінде)
4. Брэди Б.Х.Г., Браун Э.Т. Жерасты тау-кен жұмыстарына арналған тау жыныстары механикасы. 3-басылым: Дордрехт: Springer, 2004. 628 б. (ағылшын тілінде)
5. Пальмстрем А., Броч Э. Тау жыныстары массивін жіктеу жүйелерін қолдану және қате қолдану (Q-жүйесі мысалында) // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006. Т. 21. № 6. Б. 575–593 (ағылшын тілінде)
6. Бартон Н. Тау жыныстарының сапасы, сейсмикалық жылдамдық, әлсіреу және анизотропия: Boca Raton: CRC Press, 2006. 744 б. (ағылшын тілінде)
7. Ли С.С. Анкерлік бекітпені жобалау принциптері // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. Т. 9. № 3. Б. 396–414 (ағылшын тілінде)
8. Виндзор К.Р., Томпсон А.Г. Тау жыныстарын бекіту жүйелері // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1992. Т. 29. № 4. Б. 363–369 (ағылшын тілінде)
9. Сингх Б., Гоэл Р.К. Тау жыныстары массивін инженерлік жіктеу: тоннельдер, іргемастар және көшкіндер: Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2011. 306 б. (ағылшын тілінде)
10. Контоянни В., Стирос С. Тоннель қазу кезіндегі индукцияланған деформациялар: геодезиялық бақылаулар деректері // *Engineering Geology*. 2005. Т. 79. № 1–2. Б. 115–126 (ағылшын тілінде)

## REFERENCES

1. Baikenzhin M.A., Rashid Zh.B. Study of the performance of a strutless hinged support in development mine workings // *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Saginov Readings», Karaganda, 2021, 1141–1143 pp. (in Kazakh)*
2. Modeling the influence of rolled profile strengtheners on the load-bearing capacity of arch supports [et al.] / Baykenzhin M. // *Mining of Mineral Deposits*. 2022. V. 16. No. 1. 84–91 pp. (in English)
3. Hoek E., Brown E.T. *Underground Excavations in Rock*: London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980. 527 p. (in English)
4. Brady B.H.G., Brown E.T. *Rock Mechanics for Underground Mining: 3rd ed.* Dordrecht: Springer, 2004. 628 p. (in English)
5. Palmstrom A., Broch E. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006. V. 21. No. 6. 575–593 pp. (in English)
6. Barton N. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*: Boca Raton: CRC Press, 2006, 744 p. (in English)
7. Li C.C. Principles of rockbolting design // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017. V. 9. No. 3. 396–414 pp. (in English)
8. Windsor C.R., Thompson A.G. Rock reinforcement systems // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1992. V. 29. No. 4. 363–369 pp. (in English)
9. Singh B., Goel R.K. *Engineering Rock Mass Classification: Tunnelling, Foundations and Landslides*: Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. 306 p. (in English)
10. Kontogianni V., Stiros S. Induced deformation during tunnel excavation: Evidence from geodetic monitoring // *Engineering Geology*. 2005. V. 79. No. 1–2. 115–126 pp. (in English)

## Сведения об авторах:

**Байкенжин М.А.**, к.т.н., доцент, Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан), (г. Караганда, Казахстан), [mbmqm@mail.ru](mailto:mbmqm@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7345-3375>

**Рашид Ж.Б.**, докторант ГДД-20-1, Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан), (г. Караганда, Казахстан), [zhuldyz.rashid@mail.ru](mailto:zhuldyz.rashid@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4261-4786>

**Очилов Ш.А.**, доктор Ph.D, доцент, заведующий кафедрой горного дела и технологий, Университет геологических наук (Министерство высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан), (г. Ташкент, Узбекистан), [o.shuhrat@mail.ru](mailto:o.shuhrat@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-5611-482X>

## Авторлар туралы мәліметтер:

**Байкенжин М.А.**, т.ғ.к., доцент, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті (Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі), (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Рашид Ж.Б.**, ГДД-20-1 білім беру бағдарламасының докторанты, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті (Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі) (Қарағанды қ., Қазақстан)

**Очилов Ш.А.**, Ph.D докторы, доцент, Тау-кен ісі және технологиялар кафедрасының меңгерушісі, Геология ғылымдары университеті (Өзбекстан Республикасы Жоғары білім, ғылым және инновациялар министрлігі) (Ташкент қ., Өзбекстан)

## Information about the authors:

**Baikenzhin M.A.**, Candidate of Technical Sciences (PhD equivalent), Associate Professor, Abylka Saginov Karaganda Technical University (Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan) (Karaganda, Kazakhstan)

**Rashid Zh.B.**, Ph.D doctoral student (GDD-20-1), Abylka Saginov Karaganda Technical University (Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan), (Karaganda, Kazakhstan)

**Ochilov Sh.A.**, Ph.D, Associate Professor, Head of the Department of Mining Engineering and Technologies, University of Geological Sciences (Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan) (Tashkent, Uzbekistan)

Код МРНТИ 36.23.31

А.А. Алтаева<sup>1</sup>, \*Б.Б. Садыков<sup>2</sup>, А. Акзамбекулы<sup>1</sup>, Т.Е. Назыров<sup>1</sup>  
 ТОО «Международная образовательная корпорация» (г. Алматы, Казахстан),  
 ТОО «Leica Geosystems» (г. Алматы, Казахстан)

## ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ВБЛИЗИ ШАХТНЫХ ПОЛЕЙ

**Аннотация.** На Анненском участке Джекказганского месторождения при подземной добыче наблюдаются значительные вертикальные осадки земной поверхности, угрожающие инфраструктуре и безопасности работ. Для анализа применен интегрированный подход, включающий спутниковую интерферометрию SBAS-InSAR, высокоточные GNSS-наблюдения и нивелирование. Мониторинг проводился с 2018 по 2024 годы на основе данных Sentinel-1 и наземных измерений, что обеспечило точное выявление деформаций. Максимальные осадки достигали -28 мм/год, преимущественно в зонах старых выработок и горного давления. Сопоставление данных подтвердило точность методов. Анализ позволил разграничить техногенные и природные осадки, что важно для управления рисками. Методика подходит для долговременного мониторинга и повышения безопасности эксплуатации.

**Ключевые слова:** земная поверхность, мониторинг деформаций, смещения, техногенные осадки, геоинформационный анализ, GNSS-наблюдения, нивелирование.

### Кеніш алаңдары маңындағы шөгү процестерін бағалауда спутниктік және жерүсті әдістерін қолдану

**Аннотация.** Анненск кеніші, Жезказған кен орнының жерасты өндіру кезінде жер бетінің сәуір вертикалды сөггілулері байқалады, бұл инфрақұрылым мен қауіпсіздікке қауіп төндіреді. Зерттеу үшін SBAS-InSAR спутниктік интерферометриясы, жоғары дәлдікті ЖНСЖ бақылаулары және нивелирлеу әдістері біріктірілді. Мониторинг 2018–2024 жылдары Sentinel-1 спутниктері мен жердегі өлшеулер негізінде жүргізілді. Максималды сөггілулер -28 мм/жылға дейін жетті, көбінесе ескі өндіру орындары мен тау-кен қысым аумақтарында. Мәліметтерді салыстыру әдістердің дәлдігін көрсетті. Техногендік және табиғи сөггілулерді айыру тәуекелдерді басқаруға көмектеседі. Ұсынылған әдіс ұзақ мерзімді бақылау мен қауіпсіздікті арттыруға тиімді.

**Түйінді сөздер:** жер беті, деформацияларды бақылау, жылжулар, техногенді шөггілулер, геоақпараттық талдау, ЖНСЖ бақылаулары, нивелирлеу.

### Application of satellite and ground-based methods for assessing subsidence processes near mining fields

**Abstract.** Significant vertical subsidence of the earth's surface is observed at the Annen section of the Jezkazgan deposit during underground mining, posing risks to infrastructure and safety. An integrated approach combining SBAS-InSAR satellite interferometry, high-precision GNSS observations, and leveling was applied. Monitoring from 2018 to 2024 used data from Sentinel-1 satellites and ground measurements. Maximum subsidence reached -28 mm/year, mainly near old workings and areas of mining pressure. Data comparison confirmed method accuracy. Differentiation of technogenic and natural subsidence aids risk management. The proposed method is effective for long-term monitoring and enhancing operational safety.

**Key words:** earth surface, deformation monitoring, displacements, technogenic subsidence, geoinformation analysis, GNSS observations, levelling.

### Введение

Осадочные процессы, возникающие в результате подземной добычи полезных ископаемых, представляют серьезную геомеханическую и инженерную проблему. Эти процессы сопровождаются изменением напряженно-деформированного состояния массива горных пород и, как следствие, ведут к формированию осадков земной поверхности различной интенсивности. Особенно остро данная проблема стоит в районах с длительной историей горных работ, где наблюдаются кумулятивные деформации, оказывающие влияние на промышленную, транспортную и жилую инфраструктуру [1, 2]. В Казахстане подобные явления актуальны для многих горнопромышленных регионов, в том числе Центрального Казахстана, где расположено Анненское месторождение.

Анненское месторождение – один из значимых объектов медной промышленности региона, характеризующийся сложной геологической структурой, наличием тектонически нарушенных зон и значительными объемами подземной добычи. В таких условиях повышается риск развития техногенных геодинамических процессов, в том числе провалов, трещинообразования, локальных и площадных осадков поверхности [3]. Мониторинг этих процессов необходим не только для обеспечения безопасных условий эксплуатации шахт, но и для оценки рисков воздействия на окружающую среду и населенные пункты, находящиеся в зоне влияния.

В традиционной практике контроля над осадками земной поверхности применяются методы геодезического нивелирования и GPS/GNSS-наблюдений, которые обе-

спечивают высокую точность, но требуют значительных трудовых и временных ресурсов, а также не всегда позволяют охватить большие территории [4]. В последние десятилетия значительное развитие получили дистанционные методы мониторинга, в частности, спутниковая радиолокационная интерферометрия (InSAR), позволяющая получать данные об осадках с сантиметровой точностью в режиме реального времени или близки к нему [5, 6].

Особую ценность представляет метод Small Baseline Subset (SBAS-InSAR), позволяющий анализировать временные ряды спутниковых снимков и выявлять малые деформации с высокой достоверностью. Его применение особенно эффективно при наличии архивных спутниковых данных, таких как Sentinel-1, что делает возможным ретроспективный анализ и выявление закономерностей деформационных процессов [7, 8]. Однако данные InSAR требуют верификации и калибровки по наземным измерениям, в первую очередь GNSS и нивелированию. Поэтому наибольший эффект достигается при интеграции спутниковых и традиционных методов наблюдения [9, 10].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью создания надежной системы мониторинга осадков земной поверхности в районе Анненского месторождения, где в последние годы наблюдаются признаки активизации геодинамических процессов. Новизна работы заключается в применении комплексного подхода, сочетающего спутниковые и наземные данные, с последующей их пространственно-временной интеграцией в среде геоинформационных систем (ГИС).

Цель исследования – оценка эффективности совместного использования спутниковой интерферометрии (SBAS-InSAR) и наземных методов (GNSS, нивелирование) для детектирования и анализа осадочных процессов в районе Анненского месторождения. Задачи исследования включают: анализ геологической и горнотехнической обстановки исследуемой территории; сбор, обработку и интерпретацию спутниковых и наземных данных; пространственный анализ зон деформаций; выявление закономерностей осадочных процессов.

Полученные результаты могут быть использованы для принятия обоснованных управленческих решений в сфере промышленной безопасности, рационального недропользования, а также для построения прогностических моделей поведения земной поверхности при дальнейшем развитии горных работ.

### Объект и методы исследования

Джезказганское медное месторождение, расположенное в центральной части Казахстана (Карагандинская область), представляет собой один из крупнейших в мире стратиформных сульфидных медных объектов. Рудоносность приурочена к верхнепротерозойским красноцветным толщам, представленным чередующимися слоями песчаников, алевролитов, аргиллитов и конгломератов. Месторождение характеризуется платформенным типом залегания рудных тел, что обуславливает сравнительно устойчивые условия ведения горных работ. Тем не менее, на ряде участков наблюдаются тектонические нарушения, разломы, субвертикальные сбросы и тектонические трещины, что может способствовать развитию локальных деформаций.

Шахта Анненская, одна из ключевых действующих шахт Джезказганского рудного поля, эксплуатируется с середины XX века. За десятилетия добычи здесь сформировались крупные подземные полости, в результате чего изменился естественный режим напряжений в массиве. Это обуславливает развитие осадочных процессов, проявляющихся в виде постепенных и дифференцированных вертикальных смещений земной поверхности. Наблюдение и оценка этих процессов является важной задачей для обеспечения устойчивости инженерных сооружений и прогнозирования возможных аварийных ситуаций.

Настоящее исследование основано на комплексном подходе к мониторингу осадочных процессов, включающем интеграцию спутниковых (дистанционных) и традиционных наземных методов. Такой подход позволяет получить как широкую пространственную охватность (за счет InSAR), так и высокоточную локальную верификацию (за счет GNSS и нивелирования).

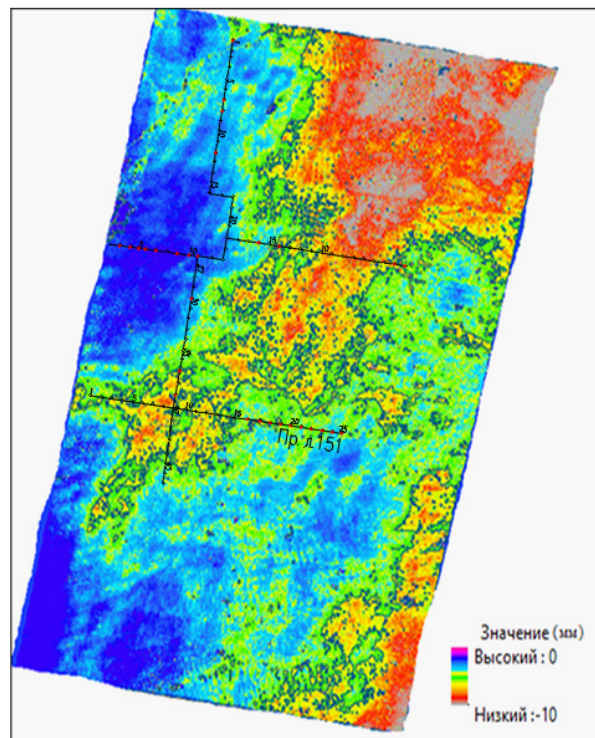
#### Спутниковый мониторинг методом SBAS-InSAR

Метод интерферометрической обработки радарных изображений (InSAR) позволяет детектировать деформации земной поверхности с сантиметровой и даже миллиметровой точностью. В рамках работы использован подход Small Baseline Subset (SBAS-InSAR), позволяющий анализировать многовременные спутниковые снимки с малым интерферометрическим базисом.

Для анализа использовались данные спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, предоставляемые в рамках программы Copernicus Европейского космического агентства (ESA). Объект охвата: территория радиусом около 10 км вокруг шахты Анненская. Период наблюдений – с января 2018 года по март 2024 года. Всего обработано более 120 сцен в формате SLC (Single Look Complex).

Обработка данных выполнялась с использованием следующих программных решений: ESA SNAP Toolbox – начальная калибровка, выравнивание изображений, генерация интерферограмм; StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) – реализация SBAS-алгоритма, построение временных рядов и скоростных карт деформаций; SNAPHU – фазовая развертка интерферограмм.

В результате получены пространственные карты вертикальных смещений и временные ряды осадочных процессов (рис. 1) [11]. Разрешение по пространству составило 14 x 14 м, точность оценки скорости – порядка 2–5 мм/год.



**Рис. 1. Карта смещений земной поверхности на Анненском руднике за период с января 2018 года по март 2024 года.**

**Сурет 1. Аннен кенішіндегі жер бетіндегі ығысу картасы (2018 жылғы қаңтар – 2024 жылғы наурыз аралығы).**

**Figure 1. Surface displacement map at the Annensky mine from January 2018 to March 2024.**

Особое внимание уделено интерпретации зон с ускоренными осадками, превышающими -10 мм/год, которые потенциально указывают на опасные участки геодинамической активности, связанные с выработанными пространствами и зонами ослабления пород.

### GNSS-наблюдения

GNSS-наблюдения были проведены на опорных пунктах, установленных в пределах потенциально деформируемых зон, включая территорию над горными выработками и вблизи инфраструктурных объектов (шахтные здания, промышленные объекты, транспортные пути).

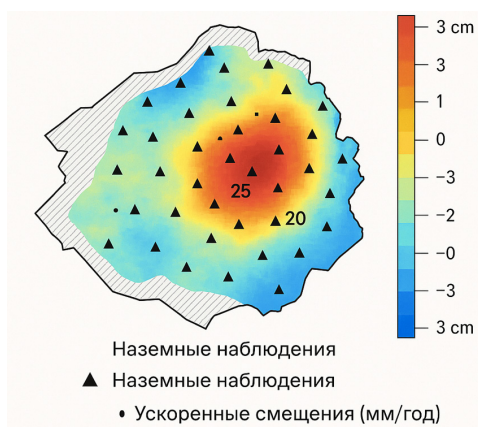
Для измерений использовалось современное геодезическое оборудование (GNSS-приемники), обеспечивающее высокоточное позиционирование в режиме статики и кинематики. Координаты пунктов определялись в системе WGS 84, дальнейшая обработка выполнялась в специализированном программном обеспечении для постобработки GNSS-данных.

Наблюдения велись в два этапа:

*первый – в августе 2022 г. (базовое состояние);*

*второй – в сентябре 2023 г. (повторное измерение).*

По результатам наблюдений выявлены локальные осадки на отдельных участках, соответствующие спутниковым данным (сходимость в пределах 1–2 см), что подтверждает достоверность InSAR-результатов (рис. 2). На нескольких пунктах зафиксированы ускоренные смещения до 25 мм/год, что коррелирует с участками максимальных значений по спутниковым данным.



**Рис. 2. Результаты GNSS-наблюдений.**  
**Сурет 2. GNSS-бақылау нәтижелері.**  
**Figure 2. GNSS observation results.**

### Геодезическое нивелирование

Для получения высокоточных данных по вертикальным перемещениям были проведены циклы прецизионного нивелирования II класса. Использовалось современное цифровое нивелирное оборудование, обеспечивающее точность измерений до 0.3 мм/км.

Маршруты нивелирования пролегли через опорные пункты в зоне шахтных полей, включая участки с признаками деформаций, а также контрольные участки вне зоны влияния. Повторные измерения проводились с интервалом 12 месяцев, что позволило вычислить годовую скорость осадков.

Максимальные величины осадков зафиксированы на участке вблизи главного ствола шахты и в районе старых выработок. Величины осадков составили от 5 до 27 мм/год. Результаты нивелирования использованы как опорные

данные для калибровки InSAR-моделей и подтверждения GNSS-наблюдений.

### Геоинформационная обработка и интеграция данных

Интеграция спутниковых и наземных данных проводилась в среде ArcGIS Pro. Все результаты были приведены к единой системе координат и привязаны к цифровой модели рельефа (ЦМР), созданной на основе данных ASTER и локального ЛИДАР-сканирования.

В систему были загружены следующие слои:

*карты осадок по данным InSAR (SBAS);*

*координаты и векторы смещений по GNSS;*

*точки нивелирования с атрибутивной информацией;*

*шахтные контуры и подземные выработки (векторные планы);*

*геологические карты (трещиноватость, разломы);*

*инфраструктура (дороги, здания, водоемы).*

Путем пространственного анализа (инструменты Overlay и Spatial Analyst) определены участки пересечения зон активных осадков с инженерной и природной инфраструктурой. Это позволило выделить потенциально опасные участки и зоны дальнейшего контроля.

Следует отметить, что методы InSAR чувствительны к погодным условиям, растительному покрову и геоморфологии поверхности. В условиях городской застройки и в районах с изменчивым рельефом возможны ошибки фазовой развертки и снижение плотности отражателей. Поэтому обязательным этапом являлась фильтрация данных, исключение участков с низкой когерентностью и перекрестная валидация наземными измерениями.

GNSS и нивелирование, в свою очередь, требуют периодических выездов и доступа к реперам, что ограничивает их оперативность, но обеспечивает эталонную точность. Интеграция различных методов позволяет нивелировать слабые стороны каждого из них, обеспечивая объективную картину деформационных процессов.

### Выводы

Результаты исследования позволили выявить пространственно и временно детализированную картину осадочных процессов в районе шахты Анненская. Использование интегрированного подхода, включающего спутниковые и наземные методы, обеспечило как охват большой территории, так и локальную высокоточную оценку смещений земной поверхности.

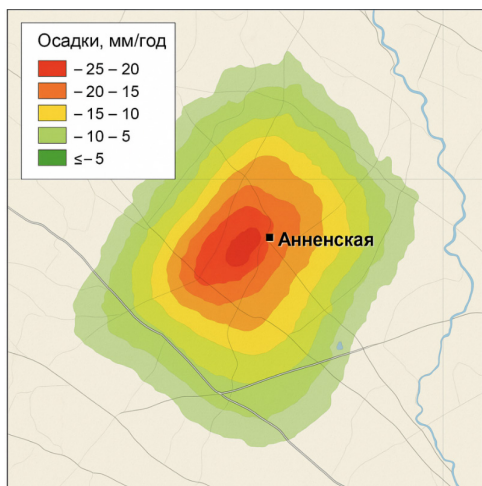
Анализ результатов интерферометрической обработки спутниковых снимков Sentinel-1 показал наличие устойчивых негативных трендов вертикальных смещений на территории, прилегающей к шахтному полю (рис. 3). Основные деформации локализованы:

*вблизи главного ствола шахты Анненская;*

*в зоне старых выработок западного блока;*

*вдоль инфраструктурных коридоров (подъездные пути, коммуникации).*

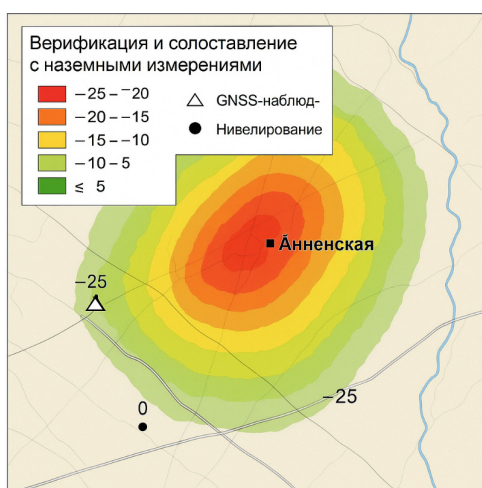
Скорости осадков в указанных зонах достигают -20...-28 мм/год, при этом область наибольшей концентрации деформаций занимает площадь около 1,6 км<sup>2</sup>. Динамика осадков в этих участках носит квазилинейный характер, что свидетельствует об их техногенной природе.



**Рис. 3. Результат интерферометрической обработки спутниковых снимков Sentinel-1.**  
**Сурет 3. Sentinel-1 спутниктік суреттерін интерферометриялық өңдеу нәтижесі.**  
**Figure 3. Result of interferometric processing of Sentinel-1 satellite images.**

На периферии шахтного поля (более 2 км от действующих выработок) зарегистрированы осадки, не превышающие -5 мм/год, что укладывается в допустимые фоновые геологические значения. Это позволяет определить границы влияния горных работ на поверхность.

Результаты GNSS-наблюдений подтвердили наличие осадков на тех же участках, что и спутниковые данные. На двух ключевых пунктах, расположенных в пределах активной зоны, зафиксированы вертикальные смещения на 22 мм и 25 мм соответственно за год (рис. 4). Эти значения практически совпадают с данными InSAR, расхождение составляет менее 10%, что находится в пределах допустимой погрешности.



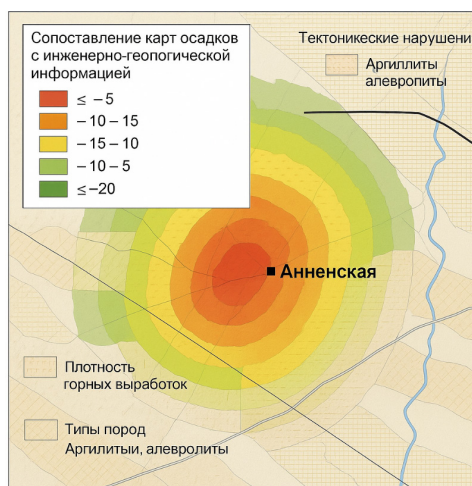
**Рис. 4. Верификация и сопоставление с наземными измерениями.**  
**Сурет 4. Жерүсті өлшеулермен верификация және салыстыру.**  
**Figure 4. Verification and comparison with ground-based measurements.**

На реперах, расположенных вне зоны влияния шахты (контрольная группа), смещения были незначительными (0–3 мм), что подтверждает надежность фиксации процессов именно в пределах зоны выработок.

По результатам двух циклов прецизионного нивелирования, выполненных в 2022 и 2023 годах, выявлены осадки на отдельных участках маршрута: максимальные значения: 26,4 мм/год; средние значения по зоне деформации: 18,7 мм/год.

Профильные графики по линии нивелирного маршрута (пересекающего шахтную зону) показали четкую вогнутую форму осадочной воронки. Центр воронки совпадает с зоной наиболее интенсивных подземных выработок и расположен в пределах 200 м от ствола шахты.

Сопоставление карт осадков с инженерно-геологической информацией позволило установить корреляцию между зонами максимальных деформаций и следующими факторами: плотностью горных выработок (чем больше глубин и объем добычи, тем выше скорость осадков); близостью к тектоническим нарушениям (вдоль локальных разломов наблюдаются резкие градиенты осадков); типом пород: в районах с повышенной трещиноватостью (аргиллиты и алевролиты) осадки более выражены, чем в зонах с массивными песчаниками (рис. 5).



**Рис. 5. Сопоставление карт осадков.**  
**Сурет 5. Шөгү карталарын салыстыру.**  
**Figure 5. Comparison of subsidence maps.**

Пространственный анализ также выявил зоны, в которых осадки земной поверхности распространяются на территорию промышленной инфраструктуры: административные здания, линии электропередачи, дороги. В одной из таких зон зафиксировано проседание основания асфальтового покрытия, что потенциально свидетельствует о влиянии деформаций на эксплуатационные характеристики объектов.

Построенные временные ряды по данным SBAS-InSAR показали, что большинство осадков развиваются с квазилинейной динамикой, без резких скачков. Это говорит о стабильном (но продолжающемся) перераспределении напряжений в породах. Однако в отдельных участках (в районе старых выработок) наблюдается ускорение смещений

в период 2022–2023 гг., что может быть связано с просадкой обрушившихся камер или вторичными деформациями массива.

По данным GNSS также фиксируются устойчивые тренды, что делает возможным экстраполяцию поведения земной поверхности на последующие периоды при сохранении режима отработки.

Важно отметить, что анализ совокупных данных позволил выделить две группы осадочных процессов:

**техногенные осадки** – локализованы в пределах 1–2 км от шахтной инфраструктуры, характеризуются высокими скоростями (до -30 мм/год), резкими пространственными градиентами и совпадают с зонами подземной отработки;

**фоновые-природные осадки** – фиксируются в удаленных районах (более 3 км от шахты), имеют равномерное распределение и низкие скорости (-1...-4 мм/год), что может быть связано с природными консолидационными процессами или сезонным изменением влагосодержания.

Таким образом, спутниковые и наземные методы позволили четко разграничить области техногенного влияния и

природного оседания, что важно для планирования мер мониторинга и управления рисками.

Полученные результаты представляют интерес для: инженерных служб шахты – как основа для уточнения зон риска; экологических служб – при оценке потенциального влияния на окружающую среду; органов местного самоуправления – в части градостроительного планирования и размещения новых объектов инфраструктуры; научного сообщества – как кейс по комплексному мониторингу в условиях интенсивного недропользования.

Методика интеграции спутниковых и наземных данных может быть масштабирована на другие участки Дзезказганского рудного района и использована для создания автоматизированной ГИС-системы деформационного мониторинга.

### Благодарность

Статья написана по результатам диссертационной работы автора статьи Садыкова Б.Б. на тему: «Совершенствование метода управления рисками в условиях интенсивной разработки месторождения на основе использования ГИС-технологий», г. Алматы, 2022 г.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шаовэй Ли, Вэньбинь Сюй, Чживэй Ли. Обзор алгоритмов, приложений и проблем временных рядов SBAS InSAR // Геодезия и геодинамика. 2022. Т. 13. № 2. С. 114–126 (на английском языке)
2. Применение технологии интерферометрического радиолокатора с синтезированной апертурой для оценки деформаций искусственной взлетно-посадочной полосы / Князев А.Г. [и др.] Геодезия и картография. 2025. № 12. С. 13–18 (на русском языке)
3. Филипяк К. Мониторинг оседаний горнодобывающей промышленности путем интеграции дифференциальной радиолокационной интерферометрии и методов постоянных рассеивателей // Европейский журнал дистанционного зондирования. 2021. Т. 54. С. 241–245 (на русском языке)
4. Ширшова В.Ю. Опыт мониторинга оседаний земной поверхности в урбанизированных районах методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на примере города Санкт-Петербург // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. № 4. С. 399–408 (на русском языке)
5. Обнаружение проседания поверхности в районе добычи угля с помощью метода DINSAR / Шаочунь Донг [и др.] // Журнал наук о Земле. 2013. Т. 24. № 3. С. 449–456 (на русском языке)
6. Бат-Эрдэнэ Б., Энхжаргал Б., Отгонбаяр Д. Анализ временных рядов оседаний, вызванных горными работами, в засушливом регионе Монголии на основе SBAS-InSAR // Дистанционное зондирование. 2024. Т. 16. Вып. 12. С. 2166–2169 (на русском языке)
7. Садыков Б., Алтаева А., Стеллинг В. Мониторинг смещений и деформаций земной поверхности на Анненском месторождении // Комплексное использование минерального сырья. 2021. № 3 (322). С. 43–50 (на английском языке)
8. Исследование по прогнозированию проседания земель в горнодобывающих районах на основе SBAS-InSAR и сравнения нескольких моделей / Ян Ц. [и др.] // Журнал исследований в области науки и техники. 2024. № 6 (12). С. 63–71 (на русском языке)
9. Чай Х., Ху Дж., Гэн С. Метод мониторинга проседания грунта в горнодобывающих районах методом SBAS-InSAR путем объединения с данными измерений // Журнал Китайского угольного общества. 2021. № 46 (S1). С. 17–24 (на русском языке)
10. Мониторинг просадки поверхности в горнодобывающем районе SBAS-InSAR на базе Sentinel-1A / Чжоу Вэньтао [и др.] // Журнал шахт, металлов и топлива. 2021. № 69 (1). С. 5–11 (на русском языке)
11. Садыков Б.Б. Совершенствование метода управления рисками в условиях интенсивной разработки месторождений на основе использования ГИС-технологий: дисс. ... д-ра философии (Ph.D): Алматы, 2022. 128 с. (на русском языке)

### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Шаовэй Ли, Вэньбинь Сюй, Чживэй Ли. SBAS InSAR уақыттық қатар алгоритмдері, қолдану аясы және мәселелеріне шолу // Geodesy and Geodynamics. 2022. Т. 13. № 2. Б. 114–126 (ағылшын тілінде)
2. Жасанды ұшу-қону жолағының деформацияларын бағалау үшін синтезделген апертурасы бар интерферометриялық радиолокатор технологиясын қолдану / Князев А.Г. [және т. б.] // Геодезия және картография. 2025. № 12. Б. 13–18 (орыс тілінде)

3. Филипяк К. Дифференциальный радар интерферометриясы мен тұрақты шашыратқыш әдістерін біріктіру арқылы тау-кен жұмыстарының әсерінен болатын шөгуді мониторингі // *European Journal of Remote Sensing*. 2021. Т. 54. Б. 241–245 (ағылшын тілінде)
4. Ширшова В. Ю. Урбандалған аумақтарда жер бетінің шөгуді радиолокациялық спутниктік интерферометрия әдісімен мониторингтеу тәжірибесі (Санкт-Петербург қаласы мысалында) // *Жоғары оқу орындарының хабаршысы. Геодезия және аэрофототүсіріс*. 2020. № 4. Б. 399–408 (орыс тілінде)
5. Көмір өндіру аймағындағы жер бетіндегі шөгуді DInSAR әдісі арқылы анықтау / Шаочунь Донг [және т. б.] // *Journal of Earth Science*. 2013. Т. 24. № 3. Б. 449–456 (ағылшын тілінде)
6. Бат-Эрдэнэ Б., Энхжаргал Б., Отгонбаяр Д. Моңғолияның құрғақ аймағында тау-кен жұмыстарының әсерінен болатын шөгуге SBAS-InSAR негізіндегі уақыттық қатарлық талдау // *Remote Sensing*. 2024. Т. 16. № 12. Б. 2166–2169 (ағылшын тілінде)
7. Садықов Б., Алтаева А., Стеллинг В. Аннен кен орнында жер бетінің ығысулары мен деформацияларын мониторингтеу // *Минералдық шикізатты кешенді пайдалану*. 2021. № 3 (322). Б. 43–50 (ағылшын тілінде)
8. Тау-кен аймақтарындағы жер шөгуді болжау бойынша зерттеу: SBAS-InSAR және көп үлгіні салыстыру / Ян Ц. [және т. б.] // *Journal of Research in Science and Engineering*. 2024. № 6 (12). Б. 63–71 (ағылшын тілінде)
9. Чай Х., Ху Дж., Гэн С. Өлшенген деректермен біріктірілген SBAS-InSAR әдісі арқылы тау-кен аймақтарындағы жер шөгуді мониторингілеу // *Journal of China Coal Society*. 2021. № 46 (S1). Б. 17–24 (ағылшын тілінде)
10. Sentinel-1A деректеріне негізделген SBAS-InSAR әдісімен тау-кен аймағындағы жер шөгуді мониторингілеу / Чжоу Вэньтао [және т. б.] // *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2021. № 69 (1). Б. 5–11 (ағылшын тілінде)
11. Садықов Б.Б. ГАЗ-технологияларды пайдалану негізінде кен орындарын қарқынды игеру жағдайында тәуекелдерді басқару әдісін жетілдіру: философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация: Алматы, 2022. 128 б. (орыс тілінде)

#### REFERENCES

1. Shaowei Li, Wenbin Xu, Zhiwei Li. Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges // *Geodesy and Geodynamics*. 2022. V. 13. Issue 2. 114–126 pp. (in English)
2. Primenenie tekhnologii interferometricheskogo radiolokatora s sintezirovannoi aperturoi dlya otsenki deformatsii iskusstvennoi vzletno-posadochnoi polosy [Application of Interferometric Synthetic Aperture Radar Technology for Assessing Deformations of an Artificial Runway], Knyazev A.G. [et al.], *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*. 2025. No. 12. 13–18 pp. (in Russian)
3. Filipiak K. Monitoring mining-induced subsidence by integrating differential radar interferometry and persistent scatterer techniques // *European journal of remote sensing*. 2021. V. 54. 241–245 pp. (in English)
4. Shirshova V.Yu. Opyt monitoringa osedanii zemnoi poverkhnosti v urbanizirovannykh raionakh metodom radiolokatsionnoi sputnikovoi interferometrii na primere goroda Sankt-Peterburg [Experience in Monitoring Land Surface Subsidence in Urbanized Areas Using Radar Satellite Interferometry: A Case Study of Saint Petersburg], *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Proceedings of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Surveying]*. 2020. No. 4. 399–408 pp. (in Russian)
5. Shaochun Dong, Hongwei Yin, Suping Yao, Fei Zhang. Detecting surface subsidence in coal mining area based on DInSAR technique / Shaochun Dong [et al.] // *Journal of Earth Science*. 2013. V. 24. No. 3. 449–456 pp. (in English)
6. Bat-Erdene B., Enkhjargal B., Otgonbayar D. Time-Series Analysis of Mining-Induced Subsidence in the Arid Region of Mongolia Based on SBAS-InSAR // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. Issue 12. 2166–2169 pp. (in English)
7. Sadykov B., Altayeva A., Stelling W. Monitoring of displacements and deformations of the earth's surface at the Annensky field // *Integrated use of mineral raw materials*. 2021. No. 322 (3). 43–50 pp. (in English)
8. Research on Land Subsidence Prediction in Mining Areas Based on SBAS-InSAR and Multi-Model Comparison / Yang Q. [et al.] // *Journal of Research in Science and Engineering*. 2024. No. 6 (12). 63–71 pp. (in English)
9. Chai H., Hu J., Geng S. SBAS-InSAR monitoring method of ground subsidence in mining areas by fusion with measured data // *Journal of China Coal Society*. 2021. No. 46 (S1). 17–24 pp. (in English)
10. Surface subsidence monitoring in mining area of SBAS-InSAR based on Sentinel-1A / Zhou Wentao [et al.] // *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2021. No. 69 (1). 5–11 pp. (in English)
11. Sadykov B.B. Sovershenstvovanie metoda upravleniya riskami v usloviyakh intensivnoi razrabotki mestorozhdenii na osnove ispol'zovaniya GIS-tekhnologii: diss. ... d-ra filosofii (Ph.D) [Improvement of the Risk Management Method under Intensive Mineral Deposit Development Based on the Use of GIS Technologies: Ph.D Dissertation]. Алматы, 2022. 128 p. (in Russian)

**Сведения об авторах:**

*Алтаева А.А.*, Ph.D доктор, ассоциированный профессор, ТОО «Международная образовательная корпорация» (г. Алматы, Казахстан), *a.aselya\_92@mail.ru*; <https://orcid.org/0000-0002-1675-6828>

*Садықов Б.Б.*, Ph.D доктор, ассоциированный профессор, ТОО «Leica Geosystems», (г. Алматы, Казахстан), *batyrkhan\_sadykov@mail.ru*; <https://orcid.org/0000-0003-2037-247X>

*Акзамбекулы А.*, ассоциированный профессор, ТОО «Международная образовательная корпорация» (г. Алматы, Казахстан), *a.akzambekuly@gmail.com*; <https://orcid.org/0009-0001-7172-1054>

*Назыров Т.Е.*, магистрант кафедры «Геодезия и картография, кадастр», ТОО «Международная образовательная корпорация» (г. Алматы, Казахстан), *t.nazyrov@mok.kz*; <https://orcid.org/0009-0004-5640-6365>

**Авторлар туралы мәліметтер:**

*Алтаева А.А.*, Ph.D докторы, қауымдастырылған профессор, «Халықаралық білім беру корпорациясы» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан).

*Садықов Б.Б.*, Ph.D докторы, қауымдастырылған профессор, «Leica Geosystems» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

*Акзамбекулы А.*, қауымдастырылған профессор, «Халықаралық білім беру корпорациясы» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

*Назыров Т.Е.*, Ph.D «Геодезия және картография, кадастр» кафедрасының магистранты, «Халықаралық білім беру корпорациясы» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

**Information about the authors:**

*Altaeva A.A.*, Ph.D doctor, associate professor, International Educational Corporation LLP (Almaty, Kazakhstan)

*Sadykov B.B.*, Ph.D, Associate Professor, LLP «Leica Geosystems» (Almaty, Kazakhstan)

*Akzambekuly A.*, Associate Professor, International Educational Corporation LLP (Almaty, Kazakhstan)

*Nazyrov T.E.*, Master's Student, Department of Geodesy, Cartography, and Cadastre, International Educational Corporation LLP (Almaty, Kazakhstan)

XXXIV Международная специализированная  
выставка технологий горных разработок

# УГОЛЬ и МАЙНИНГ РОССИИ 2026

XI Международная специализированная выставка

## НЕДРА РОССИИ

XVI Международная специализированная выставка

## ОХРАНА, БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

VII Специализированная выставка

## ПРОМТЕХЭКСПО



МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:  
Выставочный комплекс «Кузбасская ярмарка»,  
ул. Автотранспортная, 51, г. Новокузнецк,  
т: 8 (800) 500-40-42

ШИРЕ, ЧЕМ КУЗБАСС!  
ГЛУБЖЕ, ЧЕМ УГОЛЬ!



Код МРНТИ 52.31.39

O.D. Gavrilenko<sup>1</sup>, Zh.T. Bagasharova<sup>2</sup>, G.D. Berkinbayev<sup>3</sup>, \*D.R. Nazyrova<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan),  
<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan),  
<sup>3</sup>ECOSERVICE-S LLP (Almaty, Kazakhstan)

## APPLICATION OF SENTINEL-2 SPECTRAL INDICES FOR REMOTE MAPPING OF ORE MINERALIZATION IN THE DEPOSITS OF EAST KAZAKHSTAN

**Abstract.** The paper discusses the application of Sentinel-2 multispectral data for remote mapping of ore mineralization within the open pit and waste dumps of the Nikolaevsk deposit, the underground workings and dumps of the Artemyevsk deposit, and the tailings facility of the Nikolaevsk processing plant. The aim is to assess the potential of integrated spectral index analysis for identifying mineralization within surface and underground mining areas of the largest polymetallic deposits in the Shemonaikha ore zone. A median composite for 2022–2023 was generated, and NDVI, Clay, Ferrous, Alunite, Brightness, and BSI indices were calculated. After normalization, a spectral anomaly map was produced and compared with mining contours and technogenic formations. High Clay, Alunite, and Ferrous values correspond to hydrothermal–metasomatic alteration zones.

**Key words:** Sentinel-2, spectral indices, remote sensing, polymetallic deposits, spectral anomaly mapping.

### Шығыс Қазақстан кен орындарының минералдануын қашықтықтан картографиялау үшін Sentinel-2 спектрлік индекстерін қолдану

**Аннотация.** Мақалада Sentinel-2 мультиспектрлік деректерін пайдалану арқылы Николаев кен орнының карьері мен үйінділері, Артемьев кен орнының шахталары мен үйінділері және Николаев байыту фабрикасының хвостохранилищесі аумағында рудалы минералдануды қашықтықтан картографиялау қарастырылды. Зерттеудің мақсаты – Шемонаиха кенді аймағындағы ірі полиметалл кен орындарының жерүсті және жерасты тау-кен жұмыстары шегінде минералдануды анықтау үшін спектралдық индекстердің интегралды талдау әлеуетін бағалау. 2022–2023 жж. медианалық композит құрастырылып, NDVI, Clay, Ferrous, Alunite, Brightness және BSI индекстері есептелді. Нормализация негізінде спектралдық аномалиялар картасы жасалып, ол тау-кен қазбалары мен техногендік түзілімдермен салыстырылды. Clay, Alunite және Ferrous жоғары мәндері гидротермалдық-метасоматикалық өзгерістерге сәйкес келетіні көрсетілді.

**Түйінді сөздер:** Sentinel-2, спектралдық индекстер, қашықтан зондау, полиметалл кен орындары, спектралдық аномалияларды картографиялау.

### Применение спектральных индексов Sentinel-2 для дистанционного картографирования рудной минерализации месторождений Восточного Казахстана

**Аннотация.** В статье рассматривается применение мультиспектральных данных Sentinel-2 для дистанционного картографирования рудной минерализации в пределах карьера и отвалов Николаевского месторождения, шахт и отвалов Артемьевского месторождения, а также хвостохранилища Николаевской обогатительной фабрики. Цель – оценка потенциала интегрального анализа спектральных индексов для выявления минерализации в зонах поверхностных и подземных горных работ крупнейших полиметаллических объектов Шемонаихинской рудной зоны. Построен медианный композит за 2022–2023 гг., рассчитаны индексы NDVI, Clay, Ferrous, Alunite, Brightness и BSI. На основе нормализации создана карта спектральных аномалий, сопоставленная с горными выработками и техногенными образованиями. Показано соответствие высоких значений Clay, Alunite и Ferrous зонам гидротермально-метасоматических изменений.

**Ключевые слова:** Sentinel-2, спектральные индексы, дистанционное зондирование, полиметаллические месторождения, картографирование спектральных аномалий.

### Introduction and literature review

With the growing need for rapid and cost-effective exploration, the use of remotely sensed Earth observation (RSE) data for the initial identification of potentially mineralised zones is of particular relevance [1]. In traditional practice, mapping hydrothermal alteration and oxidised weathering zones requires extensive fieldwork and expensive spectral analysis techniques, which limits coverage of areas, especially in hard-to-reach areas.

Remote sensing, especially using Sentinel-2 multispectral data (10–60 m, VNIR and SWIR bands), has proven to be an effective tool for initial assessment of spectral-mineralogical anomalies associated with mineralisation due to free access to data and high spatial and temporal resolution [2]. Recent studies have demonstrated that Sentinel-2 is suitable for mapping iron oxides (hematite, goethite) and hydroxylated minerals due to the presence of narrow-focus VNIR and red-edge bands sensitive to iron and hydroxyl [3].

Anifadi et al. used Sentinel-2 together with ASTER and Hyperion to delineate hydrothermal alteration zones (clay and aluminosilicate minerals) on the Tibetan Plateau [4]. Ge et al. conducted a study in the Cuprite area (Nevada), showing that Sentinel-2-based indices (Ferrous, Ferric oxides) reliably identify iron-bearing minerals [5]. In Indonesia, Purwadi et al. successfully detected rare earth minerals in mining tailings using Sentinel-2 MSI [6].

In 2024, Abdelkader et al. integrated Sentinel-2 and ASTER data to improve lithological mapping in the shortwave infrared [7]. In addition, a review by Shirmard et al. emphasises that smart processing techniques, including machine learning, enhance the potential of satellite data to build mineralisation prospectivity maps [8]. In parallel, recent studies emphasise the digitalisation of mining operations and the integration of geoinformation systems as part of the overall technological transformation of the sector [9].

Thus, recent literature confirms that Sentinel-2 is capable of detecting spectral signatures of hydrothermal alteration, iron oxides and clay minerals – using indices similar to those applied in this study (NDVI, Ferrous, Alunite, Clay, Brightness, BSI). These approaches effectively complement traditional field methods, especially at the early stages of geological exploration and in remote regions [10].

The Shemonaikha ore zone is characterized by a complex geological structure, a variety of ore types, and a high level of geological exploration, making this region an optimal testing ground for satellite-based mineralization detection. It comprises four ore fields, comprising over 80 ore bodies. The largest of these are the Artemyevsk and Nikolaevsk polymetallic deposits (copper, lead, zinc, gold, and silver), whose ores are processed at the Nikolaevsk processing plant.

The Nikolaevsk deposit is a pyrite-polymetallic (volcanic-sedimentary) deposit of the Altai ore type (similar to the Kuroko type). It is confined to the Nikolaevsk volcano-tectonic depression. The ore bodies occur in rocks of the Nikolaevsk suite (Middle Devonian), represented by acidic effusive rocks (rhyolites). The ore bodies are represented by huge lenses of massive pyrite ores with high copper content and associated lead and zinc. Gold, silver, selenium, and tellurium are also present. The deposit was initially mined using open-pit mining (the famous Nikolaevsk quarry); later, underground mining of the remaining reserves was adopted.

The Artemyevsk deposit is located in a deeply buried block of the same structure. Mineralization is confined to the contact of felsic and basic volcanics, often controlled by shear zones and faults. The deposit is characterized by more complex metasomatic transformation of the ores and belongs to the gold-copper-polymetallic type. The ores at the deposit are complex (*Cu, Zn, Pb, Au, Ag*). It differs from the ores of the Nikolaevsk deposit in having higher gold and zinc grades, as well as a significant proportion of cuprous ores in the lower horizons. The deposit is currently mined exclusively using underground mining. Development is carried out through vertical shafts using modern systems with goaf backfill. However, space maps near the deposit show a significant number of waste dumps.

The objective of the study is to evaluate the capability of Sentinel-2 integral analysis of spectral indices for mapping mineralisation features and to develop an approach to quantitative validation and filtering of false positive anomalies.

Research Objectives:

1. Calculate diagnostic spectral indices (NDVI, Clay, Ferrous, Alunite, Brightness, BSI) for selected deposits;
2. Construct an integral map of spectral anomalies and compare it with known contours of ore bodies;
3. Quantify the coincidence of anomalies with ore contours and the proportion of false positives;
4. Develop and test rules for filtering out false anomalies.

### Methods and materials

**Satellite data.** Multispectral Sentinel-2 satellite images provided by the European Space Agency through the USGS Earth Explorer platform were used as input data. To improve the reliability of interpretation and minimise the influence of cloud cover and atmospheric distortions, a median composite scene was generated for the period 2022–2023, providing a stable representation of the spectral characteristics of the Earth's surface.

**Pre-processing.** Processing included atmospheric correction, calculation of spectral indices and visualisation of the results using QGIS and ENVI. All indices were normalised to the range [0, 1] using formula (7) to ensure comparability of values.

**Diagnostic spectral indices.** In the present study, diagnostic spectral indices were used to identify mineralogical anomalies, which is consistent with modern approaches to spectral mapping. Within the framework of this study, six Sentinel-2-based spectral indices were calculated:

1. NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) – vegetation cover indicator;

2. Clay Index – sensitive to clay minerals;

3. Ferrous Index – reflects the content of iron-containing minerals;

4. Alunite Index – reveals hydrothermal minerals (alunite, sericite);

5. Brightness Index – characterises the overall reflectivity of the surface;

6. Bare Soil Index (BSI) – identifies exposed soils and rocks.

Formulas and spectral channels follow ESA recommendations for Sentinel-2 and are given in subsections NDVI, Clay, Ferrous, Alunite, Brightness, BSI.

**NDVI (Normalised Vegetation Index).** One of the most widely used indices designed to estimate vegetation density and soil moisture. It is calculated using the formula:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \quad (1)$$

where Band 8 (*NIR*, 842 nm) and Band 4 (*Red*, 665 nm) channels are used for Sentinel-2.

NDVI values range from -1 to +1, where positive values indicate the presence of vegetation and near zero or negative values indicate exposed surfaces or water bodies. In this study, NDVI was used to exclude vegetated areas and to highlight exposed bedrock.

**Clay Index.** This index is used to identify areas with high content of clay minerals such as kaolinite, illite and smectite. The index is calculated as the ratio of near and mid-infrared reflectivity:

$$Clay\ Index = \frac{SWIR_1}{SWIR_2}, \quad (2)$$

where Band 11 (*SWIR<sub>1</sub>*, 1610 nm) and Band 12 (*SWIR<sub>2</sub>*, 2190 nm) channels are used for Sentinel-2.

Clay minerals have a characteristic absorption around 2.2 μm, making this index effective in delineating zones of hydrothermal alteration.

**Ferrous Index.** The index is designed to identify areas with increased content of secondary ironbearing minerals such as hematite and goethite. These minerals are characterised by high reflectivity in the shortwave infrared range and reduced reflectivity in the near infrared. The index formula is:

$$Ferrous\ Index = \frac{SWIR_1}{NIR}, \quad (3)$$

where Band 11 (*SWIR<sub>1</sub>*, 1610 nm) and Band 8 (*NIR*, 842 nm) channels are used for Sentinel-2.

Elevated index values may indicate zones of oxidation, weathering with accumulation of ferruginous compounds and tectonic disturbances. In the study, this index was used to highlight oxidised weathering zones and potential ferruginous anomalies.

**Alunite Index.** The index is used to map minerals of hydrothermal origin such as alunite, sericite and kaolinite (Yamaguchi, 2003). These minerals show pronounced spectral absorption in the range of about 2.2 μm.

The index is calculated using the formula:

$$\text{Alunite Index} = \frac{\text{SWIR}_2}{\text{SWIR}_1}, \quad (4)$$

where Band 12 ( $\text{SWIR}_2$ , 2190 nm) and Band 11 ( $\text{SWIR}_1$ , 1610 nm) channels correspond to Sentinel-2.

Elevated index values may be indicators of zones of advanced argillisation, often associated with epithermal and porphyry systems. In the study, this index was used to highlight zones of hydrothermal alteration.

**Brightness Index.** The index reflects the overall brightness of the surface and is used to identify areas with highly reflective light-coloured rocks such as quartz, salts and carbonates (Qiu, 2017). One formula is the square root of the sum of the squares of the reflectance squares in the visible range:

$$\text{Brightness Index} = \sqrt{\text{Red}^2 + \text{Green}^2 + \text{Blue}^2}, \quad (5)$$

where Band 4 (**Red**, 665 nm), Band 3 (**Green**, 560 nm) and Band 2 (**Blue**, 490 nm) channels were used for Sentinel-2.

Elevated brightness values may indicate light-coloured quartz-sericite alteration, leach zones or exposed salts. In the context of this study, the index was used to highlight highly reflective zones with possible lithochemical anomalies.

**Bare Soil Index.** The index aims to highlight areas with minimal vegetation cover and maximum soil or rock exposure (Mzid, 2021). The formula used takes into account the difference between  $\text{SWIR} + \text{Red}$  and  $\text{NIR} + \text{Blue}$  components:

$$\text{BSI} = \frac{(\text{SWIR}_1 + \text{Red}) - (\text{NIR} + \text{Blue})}{(\text{SWIR}_1 + \text{Red}) + (\text{NIR} + \text{Blue})}, \quad (6)$$

where Band 11 ( $\text{SWIR}_1$ , 1610 nm), Band 4 (**Red**, 665 nm), Band 8 (**NIR**, 842 nm) and Band 2 (**Blue**, 490 nm) were used for Sentinel-2.

BSI values above zero correspond to bare surfaces not covered by vegetation. In the study, the index was used to highlight exposed areas suitable for further geospectral analysis.

**Integral spectral anomaly map.** For a comprehensive assessment of spectral anomalies potentially associated with zones of mineralisation, an integral approach based on the summation of normalised values of spectral indices has been implemented as part of this study. This method allows to aggregate the information obtained on various geologically significant features (vegetation, exposed rocks, clay and ferruginous minerals, hydrothermal alteration, etc.) and reflect it in the form of a single integral map of anomalies.

At the first stage, all calculated spectral indices were brought to a single scale (from 0 to 1) by linear normalisation using the formula:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}, \quad (7)$$

where  $X$  is the initial index value;

$X_{min}$  and  $X_{max}$  are the minimum and maximum index values within the whole scene.

The normalised values for each index were then summed pixel by pixel to construct an integral spectral anomaly map reflecting the cumulative intensity of occurrences associated with the ore occurrences.

The final step involved grading the anomalous values to interpret the results. Based on the statistical distribution of pixel values of the integral map (using quantiles), three classes were identified:

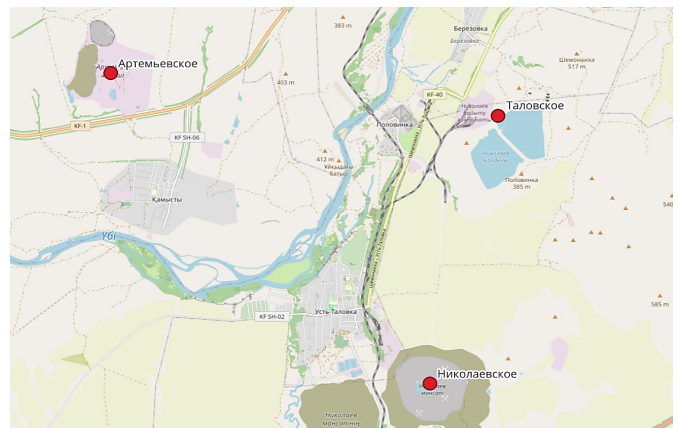
1. *Background value* – values lying within the lower 60% of the distribution;
2. *Weak anomaly* – values between the 60th and 85th percentile;
3. *Strong anomaly* – values above the 85th percentile.

This approach allows us not only to localise potentially promising areas, but also to quantify the severity of anomalies. In the future, the results can be compared with geological data, field observations or geophysical surveys to refine the forecast.

**Quantitative validation.** In order to objectively assess the quality of the identified anomalies, validation was performed using spatial intersection of known ore occurrence points (and non-ore control points) with the classified anomaly map. The following metrics were calculated: Precision – the proportion of anomalous points correctly corresponding to ore occurrences; Recall – the proportion of ore occurrences captured by anomalies; and F1-score – the harmonic mean of Precision and Recall.

This allowed us to quantify both the ability of the method to capture known zones of mineralisation and the level of false positives.

**Study area.** The quarry and mine dumps of the Nikolaevsk deposit, the mines and mine dumps of the Artemyevsk deposit, and the tailings of the Nikolaevsk processing plant, located within the Shemonaikha ore zone, which is a large mineragenic taxon of Rudny Altai, were selected as the objects of study (Figure 1).



**Figure 1.** The study area with the location of the quarry and mine dumps of the Nikolaevsk deposit, mines and mine dumps of the Artemyevsk deposit, and the tailings storage facility of the Nikolaevsk processing plant.  
**Сурет 1.** Николаев кен орны карьері мен үйінділері, Артемьев кен орны жерасты қазбалары мен үйінділері және Николаев байыту фабрикасының хвостохранилищесі орналасқан зерттеу аумағы.  
**Рис. 1.** Район исследования с расположением карьера и отвалов Николаевского месторождения, шахт и отвалов Артемьевского месторождения, а также хвостохранилища Николаевской обогатительной фабрики.

### Results and Discussion

A study of six Sentinel-2 spectral indices was conducted to identify spectral signatures of mineralized zones within the quarry and waste dumps of the Nikolaevsk deposit, the mines and waste dumps of the Artemyevsk deposit, and the tailings storage facility of the Nikolaevsk processing plant. The value ranges reported below refer to the original (non-normalised) index values; normalisation to [0, 1] was applied only for the integral anomaly map. Whilst these areas have been studied, the objective of the study was to establish the extent to which remote sensing can capture geologically significant anomalies by spectral characteristics without the use of additional geological and structural data.

The results obtained showed that spectral indices allow differentiating areas with pronounced signs of hydrothermal alteration, outcrops of sulphide mineralisation and anthropogenic impact. Interpretations for each of the indices are summarised below and also there are maps of the distribution of each of the indices reflecting various aspects of vegetation, mineralisation and surface geological features (Figure 2–7).

*NDVI (vegetation index).* NDVI values range from -0.31 to 0.60, reflecting the contrast between anthropogenically disturbed areas and areas of stable vegetation cover. The minimum values reliably indicate areas of open-pit mining and mineral processing, including the quarry and mine dumps of the Nikolaevsk deposit, the mines and mine dumps of the Artemyevsk deposit, as well as the tailings storage facilities of the Nikolaevsk processing plant. The highest values are observed along floodplains and pastures, confirming the sensitivity of NDVI to the extent of vegetation degradation. The index, although not specific to ore occurrences, allows differentiating technogenic objects within the deposits.

*Clay Index (Clay Index).* The index range (0.80 to 1.73) is characterized by localized maxima forming concentric halos around the quarry and man-made formations of the Nikolaevsk deposit, the mines and waste dumps of the Artemyevsk deposit, and especially the tailings ponds of the Nikolaevsk processing plant. These halos correspond to kaolinite-hydromica mineral associations accumulating in waste dumps and

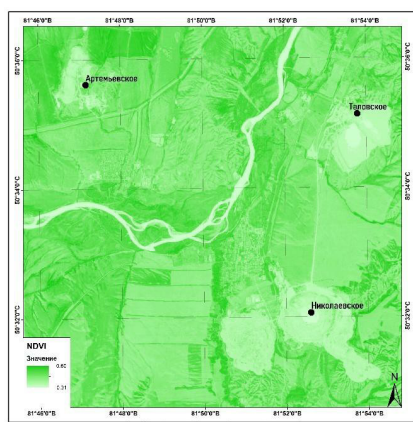


Figure 2. NDVI map.  
Сурет 2. NDVI индексінің картасы.  
Рис. 2. Карта индекса NDVI.

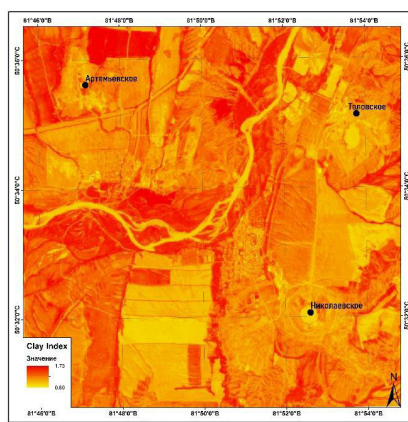


Figure 3. Clay Index map.  
Сурет 3. Clay Index индексінің картасы.  
Рис. 3. Карта индекса Clay Index.

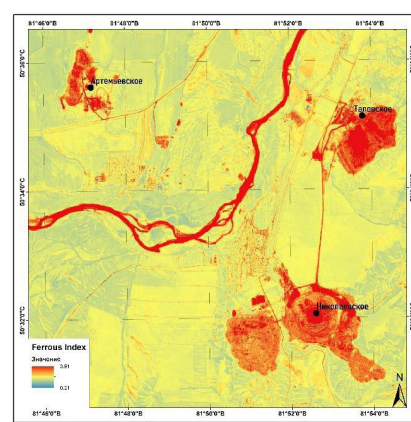


Figure 4. Map of Ferrous Index.  
Сурет 4. Ferrous индексінің картасы.  
Рис. 4. Карта индекса Ferrous.

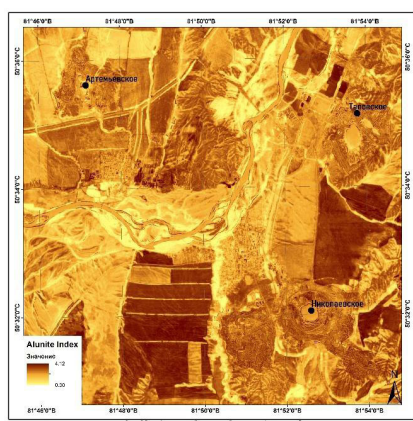


Figure 5. Alunite Index map.  
Сурет 5. Alunite индексінің картасы.  
Рис. 5. Карта индекса Alunite.

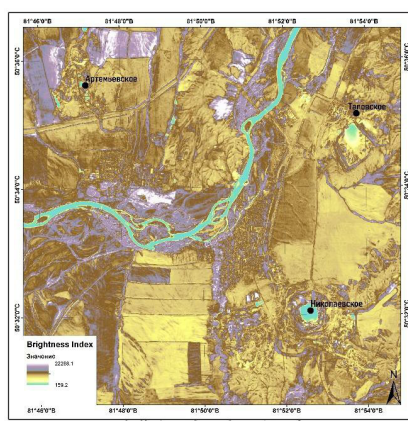


Figure 6. Brightness Index map.  
Сурет 6. Brightness индексінің картасы.  
Рис. 6. Карта индекса Brightness.

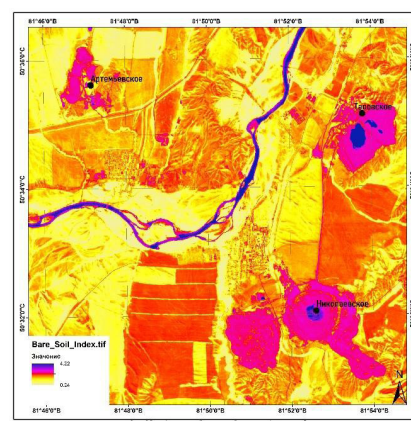


Figure 7. BSI (Bare Soil Index) map.  
Сурет 7. Жалаң топырақ индексі (BSI) картасы.  
Рис. 7. Карта индекса голый почвы (BSI).

tailings, as well as being localized within the quarry walls that expose «iron hat» zones formed by the weathering of sulfide ores. High clay index values are also typical of agrolandscapes and river valleys, where a thick cover of Cenozoic loose deposits of eluvial and alluvial origin is developed.

**Ferrous Index (Ferrous Mineral Index).** Index values range from 0.21 to 3.91 and spatially coincide with mine waste dumps and quarries, as well as the tailings of all three man-made sites. The highest values are recorded within the quarries, due to the presence of oxidation products of iron-containing sulfides (hematite, limonite) exposed during mining operations. The sublatitudinal strike of the linear anomalies correlates with the direction of tectonic and mineralised zones of the sulphide-polymetallic formation. It should be noted that the index is sensitive mainly to oxidation products, but not to sulphides themselves, which imposes restrictions on its application in poorly penetrated areas.

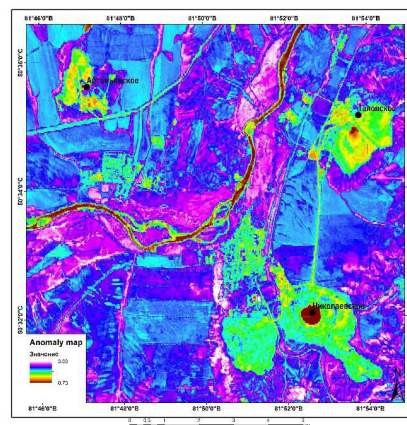
**Alunite Index (Alunite Index).** Alunite index values reach 4.12, with the highest intensity observed in agricultural landscapes. These values correspond to quartz-sericite-alunite mineralization, typical of high-sulfate eluvial systems formed by metasomatically altered volcanic rocks rich in potassium feldspars (such as rhyolites, dacites, and andesites) widely distributed around deposits. In the quarry of the Nikolaevsk deposit and within its waste dumps, the mines and waste dumps of the Artemyevsk deposit, and the tailings ponds of the Nikolaevsk processing plant, this index attains moderate values (~1.32), which may be related to the less intense development of alunite mineralization in the oxidation zones of pyrite-polymetallic deposits. High sensitivity of the index to the presence of secondary aluminosilicates is noted, but the reliability of the estimation depends on the degree of rock exposure.

**Brightness Index.** The Brightness Index shows a wide range of values (159.2 to 22,268.1), with extreme peaks within quarries, dumps and other anthropogenic sites. This magnitude is expected because the index was computed from scaled surface reflectance values ( $\times 10,000$ ), rather than from 0–1 reflectance. This index serves as a reliable marker of open disturbed surfaces, including oxidation zones associated with «iron hats». High correlation with anthropogenic load maps confirms the index's effectiveness in identifying areas disturbed by mining.

**BSI (Bare Soil Index).** The Bare Soil Index ranges from 0.73–3.03 and shows similar patterns to the Brightness Index. The main anomalies are concentrated within the quarries where there is no vegetation cover and rock is exposed. The combined use of BSI and Brightness Index can reliably highlight anthropogenic objects, however these indices are not specific to mineralisation.

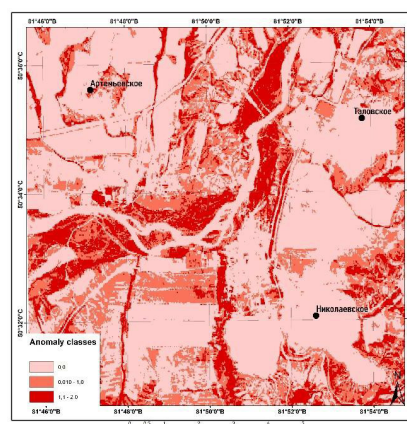
**Integral analysis and anomalous zones.** An integral spectral anomaly map (Figure 8) and the corresponding classified spectral anomaly map (Figure 9) were constructed from the normalised values of the six indices.

The integral spectral anomaly map (range of values: 0.73–3.04), constructed by summing the normalised values of the six spectral indices, showed high sensitivity to different types of alteration associated with natural mineralisation and anthropogenic sites.



**Figure 8. Integral spectral anomaly map.**  
**Сурет 8. Интегралдық спектралдық аномалиялар картасы.**

**Рис. 8. Карта интегральных спектральных аномалий.**



**Figure 9. Classified spectral anomaly map.**  
**Сурет 9. Классификацияланған спектралдық аномалиялар картасы.**

**Рис. 9. Карта классифицированных спектральных аномалий.**

Anomalies corresponding to known man-made features were identified:

1. Tailings ponds of the Nikolaevsk processing plant (**Cu-Pb-Zn-Au-Ag**) – pronounced Clay + Alunite + Iron triad, with a maximum integral value of 3.04;
2. Mine dumps and shafts of the Artemyevsk deposit (**Au-Cu-Pb-Zn**) – predominance of the Iron and Brightness indices (3.01), indicating exposed oxidized sulfide zones;
3. Mine dumps and quarry of the Nikolaevsk deposit (**Cu-Pb-Zn-Ag**) – moderate manifestation of the Iron + BSI anomaly (2.63), likely due to weak erosive collapse of the ore bodies.

Also, false signals have also been localised:

1. Anomalies of fluvial genesis (up to 2.8) are interpreted to be the result of redeposition of clay and *ferrous* fractions (*Clay*↑, *Ferrous*↑) leached from primary sources;
2. Technogenic objects (road network, settlements) are characterised by a combination of high *Brightness* and *BSI* values with no *Alunite* signal, which allows their effective screening.

3. Agricultural landscapes around pyrite-polymetallic deposits are distinguished by high values of the alunite index, which indicates the accumulation of alunite mineralization here.

Validation of the above-described methods for identifying pyrite-polymetallic deposits within Rudny Altai deserves special attention. For this purpose, the area near the Nikolaevsk and Artemyevsk deposits was surveyed using Sentinel-2 multispectral imagery. This revealed an area with iron values of 3.5 and alunite values of 1.6, along with lower BSI values of  $< 0.3$ , indicating a potentially promising target. This area coincides with the Kamyshensk pyrite-polymetallic deposit, whose mineralization is confined to the vent of a Middle and Late Devonian paleovolcano composed of rhyolites and basalts. The ores of this deposit are complex, including copper, lead, and zinc. The deposit is characterized by vertical zoning: from top to bottom, barite-galena-sphalerite ores give way to pyrite-chalcopyrite-sphalerite ores, and then pyrite-chalcopyrite (copper) ores. The ores also contain gold, silver, bismuth, and rare minerals. The deposit was mined underground and is currently considered depleted. The extracted ore was sent for processing to the Nikolaevsk processing plant. Therefore, there are no quarries or significant waste dumps nearby.

It is important to emphasise that the results demonstrate predominantly the ability of the method to capture already manifested and erosionally cut features of mineralisation. Nevertheless, the technique can be effectively adapted for screening analysis of areas with limited accessibility, especially when combined with geophysical or geochemical data.

Thus, the method of integral analysis of normalised spectral indices has confirmed its applicability for remote screening of polymetallic prospectivity in the Ore Altai area. The optimal diagnostic combination, allowing to identify ore objects even with limited erosional stripping (for example, in the area of Kamyshensk deposit), was the triad: *Ferrous*  $> 3.7$ , *Alunite*  $> 1.4$ , *Clay*  $> 1.5$ .

It should be noted that the main limitation of the method remains the dependence of the anomalous signal expression on the degree of erosion opening of mineral bodies. Also an important element in improving the accuracy of interpretation is the application of filtering of anthropogenic interferences by using thresholds on *BSI* and *Brightness* indices.

*Assessment of classification accuracy.* To quantify the effectiveness of the integral anomaly map, validation was performed by spatial intersection of known field points with the classification results. (Table 1) Three categories were analysed – «background» (0), «weak anomaly» (1) and «strong anomaly» (2).

Table 1

*Results of validation of the integrated anomaly map for known ore points*

Кесте 1

*Белгілі кен нүктелері бойынша интегралдық аномалиялар картасын валидациялау нәтижелері*

Таблица 1

*Результаты валидации интегральной карты аномалий по известным рудным точкам*

Class / Actual	Ore Point (True)	Non-ore point (False)
Strong anomaly (2)	7	2
Weak anomaly (1)	2	3
Background (0)	1	12

Calculation of metrics showed: Precision = 0.78, Recall (completeness) = 0.70, F1-measure = 0.74. The high precision values confirm the good correspondence of the «strong» anomalies to the actual ore bodies, with the moderate completeness value explained by the fact that some of the mineralised areas only show up in the «weak anomaly» class due to partial overlap with vegetation cover or spectral response features.

### Conclusion

Integrated analysis of Sentinel-2 spectral indices proved effective for mapping hydrothermal alteration and oxidation zones within the Shemonaikha ore zone. The method identified ore anomalies consistent with known mineralization types and distinguished them from anthropogenic and fluvial features. Validation confirmed a good correspondence between «strong» anomalies and ore bodies (F1 = 0.74). Notably, the verification feature showed diagnostic features of iron-alunite consistent with hydrothermal alteration. These results demonstrate that Sentinel-2 multispectral data, which enables the use of integrated spectral indices, can serve as a practical tool for prospecting for ore features in Rudny Altai.

### Acknowledgments

*This research is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant № IRN BR27100483 “Development of prognostic and prospecting technologies for identification of ore-prospective territories based on data analysis of the unified platform of subsoil users «Minerals.gov.kz» with the use of artificial intelligence and remote sensing methods”).*

### REFERENCES

1. *Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review / Van der Meer F. [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2012. V. 14. 112–128 pp. (in English)*
2. *Recent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat-8 and Sentinel-2 applications / Adiri Z. [et al.] // Ore Geology Reviews. 2020. V. 117. 1–34 pp. (in English)*
3. *Monitoring sedimentary areas from mine waste products with Sentinel-2 satellite images: A case study in the SE of Spain / Pereira I. [et al.] // European J Soil Science. 2023. V. 74. No. 1. 1–21 pp. (in English)*
4. *A Novel Spectral Index for Identifying Ferronickel (Fe–Ni) Laterites from Sentinel 2 Satellite Data / Anifadi A. [et al.] // Nat Resour Res. 2022. V. 31. No. 3. 1203–1224 pp. (in English)*
5. *Assessment of the Capability of Sentinel-2 Imagery for Iron-Bearing Minerals Mapping: A Case Study in the Cuprite Area, Nevada / Ge W. [et al.] // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. No 18. 1–16 pp. (in English)*

6. Targeting rare earth element bearing mine tailings on Bangka Island, Indonesia, with Sentinel-2 MSI / Purwadi I. [et al.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. V. 88. 1–8 pp. (in English)
7. Advanced exploration of rare metal mineralization through integrated remote sensing and geophysical analysis of structurally-controlled hydrothermal alterations / Abdelkader M.A. [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. 2024. V. 267. 1–32 pp. (in English)
8. A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration / Shirmard H. [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 268. 1–16 pp. (in English)
9. Ozhigin S.G. Tsifrovizatsiya gornodobyvayushchikh aktivov [Digitization of mining assets], *Gornyi zhurnal Kazakhstana* [Mining journal of Kazakhstan]. 2022. No. 7. 41–46 pp. (in Russian)
10. Hydrothermally altered mineral mapping using synthetic application of Sentinel-2A MSI, ASTER and Hyperion data in the Duolong area, Tibetan Plateau, China / Hu B. [et al.] // *Ore Geology Reviews*. 2018. V. 101. 384–397 pp. (in English)

## ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Көнарналы және гиперспектралды геологиялық қашықтан зондтау: шолу / Van der Meer F. [және т. б.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012. Т. 14. Б. 112–128 (ағылшын тілінде)
2. Қоғамдық қолжетімді спутниктік суреттерді пайдалы қазбаларды іздеуде пайдалану бойынша соңғы жетістіктер: Landsat-8 және Sentinel-2 қолданылуларына шолу / Adiri Z. [және т. б.] // *Ore Geology Reviews*. 2020. Т. 117. Б. 1–34 (ағылшын тілінде)
3. Тау-кен қалдықтарының шөгінді аймақтарын Sentinel-2 спутниктік суреттері арқылы мониторингтеу: Испанияның оңтүстік-шығысындағы жағдай / Pereira I. [және т. б.] // *European J Soil Science*. 2023. Т. 74. № 1. Б. 1–21 (ағылшын тілінде)
4. Ферроникельді (Fe–Ni) латериттерді Sentinel-2 деректері бойынша анықтауға арналған жаңа спектралдық индекс / Anifadi A. [және т. б.] // *Nat Resour Res*. 2022. Т. 31. № 3. Б. 1203–1224 (ағылшын тілінде)
5. Sentinel-2 бейнелерін темір құрамды минералдарды картографиялау мүмкіндіктерін бағалау: Купрайт ауданы (Невада) мысалында / Ge W. [және т. б.] // *Remote Sensing*. 2020. Т. 12. № 18. Б. 1–16 (ағылшын тілінде)
6. Банка аралындағы (Индонезия) сирек жер элементтері бар кен қалдықтарын Sentinel-2 MSI арқылы нысаналы анықтау / Purwadi I. [және т. б.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. Т. 88. Б. 1–8 (ағылшын тілінде)
7. Құрылымдық-бақыланатын гидротермалдық өзгерістерді интеграцияланған қашықтықтан зондтау және геофизикалық талдау арқылы сирек металдардың минералдануын барлаудың озық әдістері / Abdelkader M.A. [және т. б.] // *Journal of Geochemical Exploration*. 2024. Т. 267. Б. 1–32 (ағылшын тілінде)
8. Пайдалы қазбаларды іздеуде қашықтықтан зондтау деректерін өңдеуде машиналық оқытуға шолу / Shirmard H. [және т. б.] // *Remote Sensing of Environment*. 2022. Т. 268. Б. 1–16 (ағылшын тілінде)
9. Ожигин С.Г. Тау-кен өндіру активтерін цифрландыру // *Қазақстанның кен журналы*. 2022. № 7. Б. 41–46 (орыс тілінде)
10. Дуолун ауданында (Тибет таулы қыраты, Қытай) гидротермалдық өзгерген минералдарды Sentinel-2A MSI, ASTER және Hyperion деректерін біріктіріп картаға түсіру / Hu B. [және т. б.] // *Ore Geology Reviews*. 2018. Т. 101. Б. 384–397 (ағылшын тілінде)

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мульти- и гиперспектральное геологическое дистанционное зондирование: обзор / Van der Meer F. [и др.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012. Т. 14. С. 112–128 (на английском языке)
2. Недавние достижения в использовании общедоступных спутниковых изображений для поисков полезных ископаемых: обзор применений Landsat-8 и Sentinel-2 / Adiri Z. [и др.] // *Ore Geology Reviews*. 2020. № 117. С. 1–34 (на английском языке)
3. Мониторинг осадочных зон отходов горных работ с использованием спутниковых изображений Sentinel-2: пример на юго-востоке Испании / Pereira I. [и др.] // *European J Soil Science*. 2023. Т. 74. № 1. С. 1–21 (на английском языке)
4. Новый спектральный индекс для идентификации ферроникелевых (Fe–Ni) латеритов по данным Sentinel-2 / Anifadi A. [и др.] // *Nat Resour Res*. 2022. Т. 31. № 3. С. 1203–1224 (на английском языке)
5. Оценка возможностей изображений Sentinel-2 для картирования железосодержащих минералов: пример района Купрайт (Невада) / Ge W. [и др.] // *Remote Sensing*. 2020. Т. 12. № 18. С. 1–16 (на английском языке)
6. Целевое выделение хвостохранилищ, содержащих редкоземельные элементы, на острове Банка (Индонезия) с использованием Sentinel-2 MSI / Purwadi I. [и др.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. № 88. С. 1–8 (на английском языке)
7. Передовые методы поиска редкометалльной минерализации с помощью интеграции дистанционного зондирования и геофизического анализа структурно-контролируемых гидротермальных изменений

/ Abdelkader M.A. [и др.] // *Journal of Geochemical Exploration*. 2024. № 267. С. 1–32 (на английском языке)

8. Обзор машинного обучения в обработке данных дистанционного зондирования для поисков полезных ископаемых / Shirmard H. [и др.] // *Remote Sensing of Environment*. 2022. № 268. С. 1–16 (на английском языке)
9. Ожигин С.Г. Цифровизация горнодобывающих активов // *Горный журнал Казахстана*. 2022. № 7. С. 41–46 (на русском языке)
10. Картирование гидротермально измененных минералов с использованием комбинированных данных Sentinel-2A MSI, ASTER и Hyperion в районе Дуолун (Тибетское нагорье, Китай) / Hu B. [и др.] // *Ore Geology Reviews*. 2018. № 101. С. 384–397 (на английском языке)

#### Information about the authors:

**Gavrilenko O.D.**, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan), [ogavrilenko8@gmail.com](mailto:ogavrilenko8@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-4227-1098>

**Bagasharova Zh. T.**, Candidate of Technical Sciences, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), [zh.t\\_bagasharova@mail.ru](mailto:zh.t_bagasharova@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8996-8656>

**Berkinbayev G.D.**, Candidate of Biological Sciences, Advisor to the Director of ECOSERVICE-S LLP (Almaty, Kazakhstan), [berkinbayev.g@ecoservice.kz](mailto:berkinbayev.g@ecoservice.kz); <https://orcid.org/0000-0003-0039-6909>

**Nazyrova D.R.**, GIS specialist of ECOSERVICE-S LLP (Almaty, Kazakhstan), [nazyrova.d@ecoservice.kz](mailto:nazyrova.d@ecoservice.kz); <https://orcid.org/0000-0002-1148-4480>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Гауриленко О.Д.**, геология-минералогия ғылымдарының кандидаты, Қазақстан Республикасының Ұлттық инженерлік академиясы (Алматы қ., Қазақстан)

**Бағашарова Ж.Т.**, техника ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы қ., Қазақстан)

**Беркинбаев Г.Д.**, биология ғылымдарының кандидаты, ECOSERVICE-S ЖШС директорының кеңесшісі (Алматы қ., Қазақстан)

**Назырова Д.Р.**, ECOSERVICE-S ЖШС, ГАЖ маманы (Алматы қ., Қазақстан)

#### Сведения об авторах:

**Гауриленко О.Д.**, канд. геол.-минер. наук, Национальная инженерная академия Республики Казахстан (г. Алматы, Казахстан)

**Бағашарова Ж.Т.**, канд. техн. наук, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан)

**Беркинбаев Г.Д.**, канд. биол. наук, советник директора ТОО «ECOSERVICE-S» (г. Алматы, Казахстан)

**Назырова Д.Р.**, ГИС-специалист ТОО «ECOSERVICE-S» (г. Алматы, Казахстан)

Организатор:

окрыжий выставочный центр  
\* ЮГОРСКИЕ КОНТРАКТЫ \*

Техническая поддержка:

**EXPOTECH**

MEMBER  
OF THE RUSSIAN  
UNION OF EXHIBITIONS  
AND FAIRS



ЧЛЕН  
РОССИЙСКОГО  
СОЮЗА ВЫСТАВОК  
И ЯРМАРОК



31 МЕЖДУНАРОДНАЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВЫСТАВКА

**СУРГУТ.  
НЕФТЬ И ГАЗ  
2026**



31<sup>th</sup> INTERNATIONAL  
SPECIALIZED  
TECHNOLOGICAL EXHIBITION

**SURGUT.  
OIL & GAS  
2026**

**23.09 - 25.09**

+7 (3462) 94-34-54  
[sales@yugcont.ru](mailto:sales@yugcont.ru)  
[sngexpo.ru](http://sngexpo.ru)



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

Код МРНТИ 52.45.29

\*А.М. Шаханов, М.Б. Барменшинова  
Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

## АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОПРОБОВАНИЯ И ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ПРОДУКТОВ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНЫХ РУД

**Аннотация.** В статье выполнен литературный обзор современных методов опробования и экспресс-анализа продуктов флотационного обогащения медных руд. Цель работы – систематизация подходов к отбору проб в пульповых потоках и методов оперативного контроля химического состава в условиях горно-обогатительного производства. Рассмотрены принципы представительности проб, особенности флотационных продуктов, применение автоматизированных пробоотборных систем и экспресс-методов анализа, включая рентгенофлуоресцентный, лазерно-индуцированный спектральный и ближнюю инфракрасную спектроскопию. Отдельное внимание уделено интеграции аналитических систем с SCADA/MES/LIMS, метрологическому обеспечению и экологическим аспектам. Показана значимость экспресс-анализа для повышения оперативности управления процессами и снижения затрат на контроль качества в медной промышленности Казахстана.

**Ключевые слова:** медные руды, флотация, опробование, экспресс-анализ, автоматизация, цифровизация.

**Мыс кендерін флотациялық байыту өнімдерінің оопробалау әдістері мен экспресс-анықтамаларының заманауи жағдайын талдау**

**Аңдатпа.** Мақалада мыс кендерін флотациялық байыту өнімдерін оопробалау және экспресс-талдаудың заманауи тәсілдеріне әдеби шолу жасалған. Зерттеудің мақсаты – пульпа ағындарында сынама алу әдістерін және құрамды жедел бақылау құралдарын жүйелеу, сондай-ақ технологиялық бақылауды цифрландыру үрдістерін көрсету. Пробалардың өкілділігі қағидаттары, флотациялық өнімдердің ерекшеліктері, автоматтандырылған пробоотбор жүйелерін және экспресс-талдау әдістерін (XRF, LIBS, NIRS, PGNAА) қолдану, олардың артықшылықтары мен шектеулері қарастырылған. SCADA/MES/LIMS жүйелерін интеграциялау, метрологиялық қамтамасыз ету және экологиялық аспектілерге ерекше назар аударылған. Қазақстандық және шетелдік тәжірибелер салыстырылып, экспресс-талдауды енгізудің өндірістік процестерді жедел басқарудағы және сапаны бақылау шығындарын төмендетудегі практикалық әрі экономикалық маңызы көрсетілген.

**Түйінді сөздер:** мыс кені, флотация, оопробалау, экспресс-талдау, автоматтандыру, цифрландыру.

### Analysis of modern methods of sampling and express analysis of copper ore flotation products

**Abstract.** The article provides a literature review of modern methods for sampling and express analysis of copper ore flotation products. The aim of the study is to systematize sampling approaches in pulp streams and rapid analytical techniques used for operational process control in mineral processing. The principles of sample representativeness, specific features of flotation products, and the use of automated sampling systems are considered. Express analytical methods, including X-ray fluorescence, laser-induced breakdown spectroscopy, near-infrared spectroscopy, and neutron-based techniques, are discussed in terms of their advantages and limitations. The practical significance of express analysis for improving process control efficiency and reducing quality control costs in the copper industry of Kazakhstan is demonstrated.

**Key words:** copper ores, flotation, sampling, express analysis, automation.

### Введение

Современная горно-металлургическая промышленность развивается в условиях растущей конкуренции, жестких экологических требований и необходимости повышения эффективности использования минерально-сырьевых ресурсов. Одной из ключевых задач является обеспечение достоверности данных о составе и качестве рудных потоков на всех стадиях переработки.

Опробование и экспресс-анализ являются важнейшими элементами системы технологического контроля. От их точности и оперативности зависит качество управления процессами обогащения и конечная эффективность производства. Особое значение эти методы приобретают при флотационном обогащении медных руд, где изменчивость минералогического состава и дисперсности частиц требует высокой чувствительности и воспроизводимости аналитических методов [1].

Целью настоящей статьи является систематизация современных подходов к опробованию и экспресс-анализу флотационных продуктов медных руд, а также выявление тенденций их развития в Казахстане и за рубежом.

### Теоретические основы опробования

Теория опробования базируется на принципах представительности и воспроизводимости. Согласно ГОСТ и ISO, для получения корректной информации необходимо учитывать гетерогенность минерального сырья, крупность частиц и динамику технологических пото-

ков. Важную роль играют статистические методы, позволяющие обосновывать количество и частоту проб [2, 3, 4].

На практике основной проблемой является обеспечение равномерного отбора из пульповых потоков флотации, где высокое содержание твердой фазы и турбулентный режим движения создают риск смещения проб.

### Особенности флотационных продуктов

Флотационные продукты характеризуются высокой изменчивостью гранулометрического и минералогического состава. Концентрат содержит тонкодисперсные частицы меди и сопутствующие элементы (*Fe, S, As* и др.), хвосты отличаются сложным распределением частиц различной плотности.

Для таких систем простые ручные методы опробования неэффективны. Поэтому все шире применяются автоматизированные пробоотборники, обеспечивающие непрерывный и равномерный отбор материала.

### Методы экспресс-анализа

Современные технологии позволяют анализировать состав рудных потоков в реальном времени, причем зачастую без отбора проб. Наибольшее распространение получили: рентгенофлуоресцентный анализ (XRF) [5, 6], лазерно-искровая спектроскопия (LIBS) [7], ближняя ИК-спектроскопия (NIRS) [8] и пром-гамма-нейтронная активация (PGNAА) [6, 9].

**Таблица 1**  
**Сравнительная характеристика современных методов экспресс-анализа флотационных продуктов медных руд**

**Мыс кендерін флотациялық байыту өнімдерін экспресс-талдаудың заманауи әдістерінің салыстырмалы сипаттамасы**

**Table 1**

**Comparative characteristics of modern express analysis methods for copper ore flotation products**

Метод	Что определяет	Преимущества	Ограничения
XRF	<i>Cu, Fe, As</i>	Оперативность, без пробоподготовки	Влияние влаги
LIBS	микрообъемы	Высокая чувствительность	Требуется калибровка
NIRS	Влажность, минералогия	Не разрушает	Нужны модели
PGNAA	Анализ «в потоке»	Идеален для конвейеров	Дороговизна

Каждый из методов имеет преимущества и ограничения, однако их интеграция обеспечивает комплексный контроль качества.

### Автоматизация и цифровизация

Современные предприятия переходят к «умным фабрикам», где контроль качества встроен в цифровую систему управления. Автоматизированные пробоотборники объединяются с системами SCADA, MES, LIMS, что обеспечивает прозрачность процессов, оперативную корректировку параметров и снижение человеческого фактора [10, 11].

В Казахстане уже внедрены автоматизированные анализаторы (например, Voxrau Compact/24 (Швеция), однако зарубежные фабрики продвигаются дальше и активно используют системы с элементами машинного обучения и искусственного интеллекта.

### Метрологическое обеспечение и стандарты

Ключевым условием достоверности экспресс-анализа является метрологическое обеспечение: калибровка оборудования, применение эталонных материалов, стандартизация методик. Международные стандарты ISO и национальные ГОСТы регламентируют требования к точности и воспроизводимости результатов [1, 11].

### Экологические и нормативные аспекты

Экологическая безопасность становится важным фактором выбора методов анализа. Современные системы должны минимизировать отходы пробоподготовки, снижать воздействие на окружающую среду и соответствовать национальным экологическим нормам.

### Зарубежный и казахстанский опыт

В Казахстане внедрение экспресс-методов и автоматизированных систем находится на стадии активного раз-

вития. Основное направление – адаптация технологий к местным условиям и снижение затрат [10, 11].

За рубежом (Австралия, Канада, Китай) применяются комплексные цифровые решения, где данные экспресс-анализа интегрируются в общие системы управления предприятием. Особое внимание уделяется прогнозной аналитике и оптимизации процессов на основе искусственного интеллекта (AI) [1, 6–8].

### Практическая апробация автоматизированных систем на предприятиях Казахстана

В ТОО «Корпорация Казахмыс» на всех обогатительных фабриках для анализа исходной руды в потоке на конвейерном транспорте внедрены отечественные рудоконтролирующие станции на базе рентгенофлуоресцентных лабораторных приборов РЛП-21 (ТОО «АспапГЕО», г. Алматы).

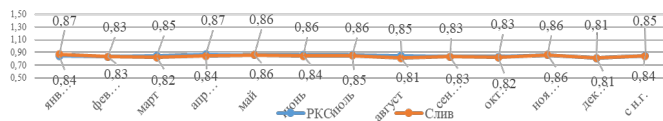


**Рис. 1. Рудоконтролирующая станция: общий вид и установка на Жезказганской обогатительной фабрике № 2.**

**Сурет 1. Кен бақылау станциясы: жалпы көрінісі және Жезқазған байыту фабрикасы № 2-де орнатылуы.**

**Figure 1. Ore control station: general view and installation at Zhezkazgan processing plant No. 2.**

Для оценки достоверности показаний рудоконтролирующих станций систематически выполняется сравнение с результатами химического анализа сливного опробования. Ниже в таблице 2 представлены сравнительные данные за 2024 год по Жезказганским обогатительным фабрикам №№ 1, 2 [12].



**Рис. 2. График сходимости результатов по меди по данным РКС и сливного опробования по балансу в поступающем сырье.**

**Сурет 2. Мыс бойынша РКС деректері мен сливтен сынама алу нәтижелерінің үйлесімділік графигі.**

**Figure 2. Convergence graph of copper assay results based on RCS data and overflow sampling.**

Таблица 2

Результаты сравнительного анализа данных РКС и сливного опробования

Кесте 2

РКС деректері мен сливтен сынама алу нәтижелерінің салыстырмалы талдауы

Table 2

Results of comparative analysis of ore control station data and overflow sampling

Наименование	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь		
	РКС	Слив	разница	РКС	Слив	разница	РКС	Слив	разница	РКС	Слив	разниц	РКС	Слив	разни-ца	РКС	Слив	разни-ца
ВЖР	0,73	0,73	0	0,70	0,69	0,01	0,69	0,64	0,05	0,69	0,63	0,06	0,71	0,67	0,04	0,71	0,69	0,02
ЮЖР	0,72	0,72	0	0,69	0,69	0	0,70	0,68	0,02	0,70	0,65	0,05	0,70	0,69	0,01	0,67	0,66	0,01
Западный	0,66	0,67	-0,01	0,65	0,64	0,01	0,72	0,68	0,04	0,68	0,63	0,05	0,70	0,67	0,03	0,69	0,67	0,02
Жиландинский	0,97	0,95	0,02	0,96	0,92	0,04	0,90	0,82	0,08	0,99	0,89	0,10	0,94	0,88	0,06	0,93	0,87	0,06
Жомарт	1,28	1,33	-0,05	1,30	1,31	-0,01	1,36	1,32	0,04	1,38	1,25	0,13	1,37	1,43	-0,06	1,36	1,36	0
Всего сырья:	0,84	0,85	-0,01	0,83	0,82	0,01	0,85	0,81	0,04	0,87	0,79	0,08	0,86	0,85	0,01	0,86	0,84	0,02

Наименование	Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Итого за 2023 г.		
	РКС	Слив	разница	РКС	Слив	разница	РКС	Слив	разница	РКС	Слив	разниц	РКС	Слив	разница	РКС	Слив	разница	РКС	Слив	разница
ВЖР	0,73	0,69	0,04	0,66	0,62	0,04	0,66	0,67	-0,01	0,66	0,63	0,03	0,71	0,65	0,06	0,69	0,66	0,03	0,70	0,66	0,04
ЮЖР	0,70	0,68	0,02	0,71	0,68	0,03	0,69	0,64	0,05	0,62	0,62	0	0,71	0,68	0,03	0,64	0,64	0	0,68	0,67	0,01
Западный	0,67	0,63	0,04	0,71	0,67	0,04	0,68	0,70	-0,02	0,67	0,66	0,01	0,68	0,66	0,02	0,64	0,62	0,02	0,68	0,66	0,02
Жиландинский	0,98	0,90	0,08	0,90	0,75	0,15	0,87	0,75	0,12	1,02	0,84	0,18	1,09	0,96	0,13	1,02	0,95	0,07	0,96	0,87	0,09
Жомарт	1,37	1,35	0,02	1,39	1,34	0,05	1,37	1,47	-0,10	1,26	1,36	-0,10	1,22	1,34	-0,12	1,23	1,33	-0,10	1,32	1,35	-0,03
Всего сырья:	0,86	0,82	0,04	0,85	0,80	0,05	0,83	0,84	-0,01	0,83	0,81	0,02	0,86	0,84	0,02	0,81	0,81	0	0,85	0,82	0,03

Как видно из сравнения экспресс-анализ руды в потоке с помощью рудоконтролирующих станций показывает удовлетворительную сходимость и укладывается в пределы межлабораторного допуска с химическим анализом сливного опробования. В связи с чем, данные рудоконтролирующих станций на Жезказганских и Балхашской обогатительных фабриках применяют для распределения сливного металла между шахтами и рудниками, т. к. в слив гидроциклонов руда попадает уже в смеси. Кроме того, рассматривается вопрос о применении данных рудоконтролирующих станций в товарном балансе металлов. В таком случае, объем работ по опробованию и химическому анализу на сливе гидроциклонов максимально сократится, и останется лишь для периодического контроля показаний приборов и их калибровки по мере необходимости. Это позволит обеспечить оперативность получения данных о качестве перерабатываемого сырья и значительно сократить расходы на процессы контроля качества.

Положительные результаты внедрения экспресс-анализов руды на обогатительных фабриках в ТОО «Корпорация Казахмыс» позволили перейти к следующему этапу автоматизации – экспресс-анализу товарного концентрата в потоке при поступлении на медеплавильные заводы. В апреле 2024 г. на Жезказганском медепла-

вильном заводе в цехе подготовки шихты на конвейере, транспортирующем товарный концентрат, установлена рудоконтролирующая станция. Сравнительный анализ с действующим методом опробования и анализа также показывает хорошую сходимость (до 2% относительных). После набора достаточных статистических данных будет приниматься решение о применении данных экспресс-анализа в оперативном учете и оптимизации процессов контроля качества.

### Обсуждение

Сравнение отечественного и зарубежного опыта показывает, что Казахстан находится на пути к цифровизации процессов пробоотбора и анализа, однако требуется ускорение внедрения интеллектуальных систем и совершенствование нормативной базы. Практические данные ТОО «Корпорация Казахмыс» подтверждают, что автоматизированные рудоконтролирующие станции обеспечивают высокую сходимость с лабораторными результатами, что позволяет использовать их для оперативного управления технологическим процессом.

Зарубежные исследования подтверждают эффективность применения on-line и in-stream аналитических систем для повышения точности и оперативности технологического контроля на обогатительных фабриках [6–8].

**Заключение**

Современные методы опробования и экспресс-анализа позволяют существенно повысить точность и оперативность контроля флотационных процессов. Наиболее перспективными направлениями являются:

- развитие роботизированных пробоотборников;
- интеграция XRF, LIBS, NIRS и PGNAА в единые комплексы;

- использование цифровых платформ и AI для прогнозной аналитики;

- усиление метрологического обеспечения и соблюдение стандартов ISO/ГОСТ;

- внедрение экологически безопасных методов анализа;

- расширение применения автоматизированных систем для повышения достоверности производственного контроля.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Уилс Б.А., Финч Ж. *Технология переработки минерального сырья (Wills' Mineral Processing Technology)*. 8-е изд.: Elsevier, 2016. 512 с. (на английском языке)
2. Гончаров А.Ф., Беклемишев А.Д. *Основы пробоотбора и пробоподготовки в обогащении руд*: Алматы: КазНТУ, 2017. 312 с. (на русском языке)
3. ГОСТ 14180-80: *Руды цветные. Методы отбора и подготовки проб*. М.: Издательство стандартов, 2005 (на русском языке)
4. ISO 3082:2017. *Железные руды – Методы отбора и подготовки проб*. Женева: ISO, 2017 (на английском языке)
5. Назарова И.В. *Рентгенофлуоресцентный анализ рудных материалов*: М.: МИСис, 2015. 218 с. (на русском языке)
6. Газдер У., Петерсон М., Эванс К. *Онлайн-элементный анализ потоков минерального сырья с использованием технологий XRF и PGNAА // Minerals Engineering*. 2018. Т. 122. С. 169–178 (на английском языке)
7. Хармон Р.С., Сэннеси Ж.С. *Лазерно-индуцированная пробойная спектроскопия (LIBS) для разведки и переработки минерального сырья // Applied Geochemistry*. 2017. Т. 77. С. 52–68 (на английском языке)
8. Лессар Ж., де Баккер Ж., Макки Д. *Поточный (on-stream) анализ в переработке минерального сырья // Minerals Engineering*. 2014. Т. 65. С. 1–10 (на английском языке)
9. Жумадилов А.Ж., Кусаинов К.Т. *Применение нейтронных методов анализа на ГОКах Казахстана // Горное оборудование и электрификация*. 2022. № 6. С. 55–60 (на русском языке)
10. Рахимжанов А.Е., Сапаров Б.К. *Автоматизация контроля качества минерального сырья // Вестник КазНТУ*. 2020. № 3. С. 65–71 (на русском языке)
11. Тасбулатов К.М., Ахметов А.С. *Современные подходы к цифровизации процессов обогащения полезных ископаемых // Горный вестник Казахстана*. 2021. № 2. С. 42–48 (на русском языке)
12. Дирекция по управлению качеством ТОО «Корпорация Казахмыс». *Отчеты о внедрении рудоконтролирующих станций на ЖОФ-1 и БОФ, Жезказган – Балхаш, Казахмыс, 2024*, 45 с. (на русском языке)

**ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ**

1. Уилс Б.А., Финч Ж. *Минералды өңдеу технологиясы*. 8-басылым: Elsevier, 2016. 512 б. (ағылшын тілінде)
2. Гончаров А.Ф., Беклемишев А.Д. *Рудаларды сынама алу және сынамаларды дайындау негіздері*: Алматы: ҚазҰТЗУ, 2017. 312 б. (орыс тілінде)
3. ГОСТ 14180-80: *Түсті рудалар. Сынама алу және дайындау әдістері*. М.: Стандарттар баспасы, 2005 (орыс тілінде)
4. ISO 3082:2017. *Темір рудалары – сынама алу және сынамаларды дайындау рәсімдері*. Женева: ISO, 2017 (ағылшын тілінде)
5. Назарова И.В. *Рудалық материалдардың рентгенофлуоресценттік талдауы*: М.: МИСис, 2015. 218 б. (орыс тілінде)
6. Газдер У., Петерсон М., Эванс К. *XRF және PGNAА технологияларын қолдана отырып минералдық өңдеу ағындарын онлайн-элементтік талдау // Minerals Engineering*. 2018. Т. 122. Б. 169–178 (ағылшын тілінде)
7. Хармон Р.С., Сэннеси Ж.С. *Минералдық шикізатты барлау мен өңдеуде лазерлік индукцияланған плазмалық спектроскопияны (LIBS) қолдану // Applied Geochemistry*. 2017. Т. 77. Б. 52–68 (ағылшын тілінде)
8. Лессар Ж., де Баккер Ж., Макки Д. *Минералдық шикізатты өңдеудегі ағындық (on-stream) талдау // Minerals Engineering*. 2014. Т. 65. Б. 1–10 (ағылшын тілінде)
9. Жұмадилов А.Ж., Құсайынов К.Т. *Қазақстандағы ГОК-тарда нейтрондық талдау әдістерін қолдану // Тау-кен жабдықтары және электрлендіру*. 2022. № 6. Б. 55–60 (орыс тілінде)

10. Рахимжанов А.Е., Сапаров Б.К. Минералдық шикізаттың сапасын бақылауды автоматтандыру // ҚазҰТЗУ хабаршысы. 2020. № 3. Б. 65–71 (орыс тілінде)
11. Тасбулатов К.М., Ахметов А.С. Пайдалы қазбаларды байыту процестерін цифрландырудың заманауи тәсілдері // Қазақстанның тау-кен хабаршысы. 2021. № 2. Б. 42–48 (орыс тілінде)
12. «Қазақмыс Корпорациясы» ЖШС Сапаны басқару дирекциясы. ЖОФ-1 және БОФ кен бақылау станцияларын енгізу туралы есептер, Жезқазған – Балқаш, Қазақмыс, 2024, 45 б. (орыс тілінде)

## REFERENCES

1. Wills B.A., Finch J. *Wills' Mineral Processing Technology*. 8th ed.: Elsevier, 2016. 512 p. (in English)
2. Goncharov A.F., Beklemishev A.D. *Osnovy probootbora i probopodgotovki v obogashchenii rud* [Fundamentals of sampling and sample preparation in ore beneficiation]. Almaty: KazNTU, 2017. 312 p. (in Russian)
3. GOST 14180-80: *Rudy tsvetnye. Metody otbora i podgotovki prob* [GOST 14180-80: Non-ferrous ores. Methods of sampling and sample preparation]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2005 (in Russian)
4. ISO 3082:2017. *Iron ores – Sampling and sample preparation procedures*. Geneva: ISO, 2017 (in English)
5. Nazarova I.V. *Rentgenofluorestsentnyi analiz rudnykh materialov* [X-ray fluorescence analysis of ore materials]. Moscow: MISiS, 2015. 218 p. (in Russian)
6. Gazder U., Peterson M., Evans C. *On-line elemental analysis of mineral processing streams using XRF and PGNA technologies* // *Minerals Engineering*. 2018. V. 122. 169–178 pp. (in English)
7. Harmon R.S., Senesi G.S. *Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for mineral exploration and processing* // *Applied Geochemistry*. 2017. V. 77. 52–68 pp. (in English)
8. Lessard J., de Bakker J., McKee D. *On-stream analysis in mineral processing* // *Minerals Engineering*. 2014. Vol. 65. P. 1–10 (in English)
9. Zhumadilov A.Zh., Kusainov K.T. *Primenenie neitronnykh metodov analiza na GOKakh Kazakhstana* [Application of neutron methods of analysis at Kazakhstan mining plants], *Gornoe oborudovanie i elektrifikatsiya* [Mining Equipment and Electrification]. 2022. No. 6. 55–60 pp. (in Russian)
10. Rakhimzhanov A.E., Saparov B.K. *Avtomatizatsiya kontrolya kachestva mineral'nogo syr'ya* [Automation of mineral raw material quality control], *Vestnik KazNITU* [Bulletin of KazNTU]. 2020. No. 3. 65–71 pp. (in Russian)
11. Tasbulatov K.M., Akhmetov A.S. *Sovremennye podkhody k tsifrovizatsii protsessov obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Modern approaches to digitalization of mineral processing], *Gornyi vestnik Kazakhstana* [Mining Bulletin of Kazakhstan]. 2021. No. 2. 42–48 pp. (in Russian)
12. *Direktsiya po upravleniyu kachestvom TOO «Korporatsiya Kazakhmys». Otchety o vnedrenii rudokontroliruyushchikh stantsii na ZhOF-1 i BOF, Zhezkazgan – Balkhash, Kazakhmys* [Directorate for Quality Management, Kazakhmys Corporation LLP. Reports on the implementation of ore control stations at Zhezkazgan and Balkhash processing plants (ЖОФ-1 and БОФ), Zhezkazgan – Balkhash, Kazakhmys], 2024, 45 p. (in Russian)

## Информация об авторах:

**Шаханов А.М.**, докторант кафедры «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.**, канд. техн. наук, ассоциированный профессор, заведующая 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>

## Авторлар туралы мәліметтер:

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

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

## Information about the authors:

**Shakhanov A.M.**, doctoral student of the 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)

Код МРНТИ 87.51.14

N. Abdimutalip, \*G. Toychibekova, K. Baeshova, A. Adilbay

Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan)

## INFLUENCE OF GEOLOGICAL CONDITIONS ON FORMATION OF CARBONATE-HYDROCARBONATE WATERS OF THE KOSKORGAN RESERVOIR

**Abstract.** The carbonate-hydrocarbonate composition of the surface waters of the Koskorgan reservoir is formed in conditions of an arid climate and the carbonate geological structure of the catchment, which determines its hydrochemical specificity. The work analyzed the seasonal dynamics of  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{CO}_3^{2-}$  ions according to field observations of 2023–2025. The concentrations of hydrocarbonates ranged from 142.3 to 197.6 mg/dm<sup>3</sup>, the average values for the seasons were 168–185 mg/dm<sup>3</sup> with a standard deviation of 14–26 mg/dm<sup>3</sup> and a coefficient of variation of 8–15%, which indicates the relative stability of the hydrocarbonate system. It has been established that a seasonal increase in carbonate content can reduce the irrigation suitability of water due to the risk of alkalization of soils, which must be taken into account when using the Koskorgan reservoir for water management.

**Key words:** Koskorgan reservoir; water carbonate content, hydrocarbonate ions, seasonal variability, hydrochemical mode, coefficient of variation, irrigation suitability of water.

### Геологиялық жағдайлардың қосқорған су қоймасының карбонатты-гидрокарбонатты суларының түзілуіне әсері

**Аннотация.** Қосқорған су қоймасының жер үсті суларының карбонатты-гидрокарбонатты құрамы су жинаудың аридті климаты мен карбонатты геологиялық құрылымы жағдайында қалыптасады, бұл оның гидрохимиялық ерекшелігі. Жұмыста  $\text{HCO}_3^-$  және  $\text{CO}_3^{2-}$  иондарының маусымдық динамикасына талдау жасалды. 2023–2025 жылдардағы заттай бақылаулардың деректері бойынша гидрокарбонаттардың шоғырлануы 142,3-тен 197,6 мг/дм<sup>3</sup> дейін өзгерді, маусымдар бойынша орташа мәндер 168–185 мг/дм<sup>3</sup> құрады стандартты ауытқу кезінде 14–26 мг/дм<sup>3</sup> және вариация коэффициенті 8–15%, бұл гидрокарбонат жүйесінің салыстырмалы тұрақтылығын көрсетеді. Карбонаттылықтың маусымдық күшеюі топырақты сілтілеу қаупі есебінен судың ирригациялық жарамдылығын төмендетуі мүмкін екені анықталды, оны Қосқорған су қоймасын су шаруашылығында пайдалану кезінде ескеру қажет.

**Түйінді сөздер:** Қосқорған су қоймасы, судың карбонаттылығы, гидрокарбонатты иондар, маусымдық өзгермелілік, гидрохимиялық режим, вариация коэффициенті, судың ирригациялық жарамдылығы.

### Влияние геологических условий на образование карбонатно-гидрокарбонатных вод водохранилища Коскорган

**Аннотация.** Карбонатно-гидрокарбонатный состав поверхностных вод Коскорганского водохранилища формируется в условиях аридного климата и карбонатного геологического строения водосбора, что определяет его гидрохимическую специфику. В работе выполнен анализ сезонной динамики ионов  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  по данным натурных наблюдений 2023–2025 гг. Концентрации гидрокарбонатов варьировали от 142,3 до 197,6 мг/дм<sup>3</sup>, средние значения по сезонам составили 168–185 мг/дм<sup>3</sup> при стандартном отклонении 14–26 мг/дм<sup>3</sup> и коэффициенте вариации 8–15%, что указывает на относительную устойчивость гидрокарбонатной системы. Установлено, что сезонное усиление карбонатности может снижать ирригационную пригодность воды за счет риска ощелачивания почв, что необходимо учитывать при водохозяйственном использовании Коскорганского водохранилища.

**Ключевые слова:** Коскорганское водохранилище, карбонатность воды, гидрокарбонатные ионы, сезонная изменчивость, гидрохимический режим, коэффициент вариации, ирригационная пригодность воды.

### Introduction

Reservoirs play a key role in regulating the water resources of arid and semi-arid regions, such as South Kazakhstan, providing irrigation, water supply to settlements, ecosystem sustainability and economic development of rural areas. One of these objects is the Koskorgan reservoir, built in the middle of the 20th century in the Turkestan region with the aim of accumulating and using water for irrigation and household needs. Despite the importance of the infrastructure, the current state of the hydrological regime and the chemical composition of water in this reservoir remains poorly studied, especially from the point of view of the influence of geological conditions on the formation of the hydrochemical profile of dissolved carbonate-hydrocarbonate ions in the water mass. The relevance of this study is determined by a set of interrelated causes. First of all, over the past decades, the Koskorgan reservoir and adjacent water bodies have been subjected to increasing influence of climatic factors and anthropogenic activity, which is manifested in a decrease in inflow volumes, transformation of the hydrological regime and a change in the chemical composition of water. According to research data over the past thirty years, a decrease in the average annual water inflow and an increase in temperature indicators are recorded in the region, which determines the redistribution of minerals and an increase in the level of general mineralization of water bodies. So, in the period from 1994 to 2024, the value of the total mineralization of the waters of the Koskorgan reservoir increased from 0.8–1.0 g/l to 1.5–1.7 g/l, while the concentrations of individ-

ual anions, including nitrates and sulfates, exceeded regional sanitary standards by 15–20%.

Secondly, the chemical composition of water, including concentrations of carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) and hydrocarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) anions, is largely determined by the geological and mineralogical features of the catchment basin. The formation of carbonate-hydrocarbonate type of water, as a rule, is associated with the processes of weathering and dissolution of carbonate rocks, such as limestones and dolomites, common within the catchment area, which affects the overall hardness, alkalinity and buffer capacity of the aquatic environment [1–2]. These processes are of particular importance in areas with a complex geological structure and lithological heterogeneity, where the filtration of waters through carbonate-containing horizons helps to intensify the migration of calcium, magnesium, sodium ions and associated acid anions. At the same time, the detailed mechanisms of the geologically determined formation of the chemical composition of the waters of the Koskorgan reservoir remain insufficiently studied, which leads to gaps in regional hydrochemical models [3].

The purpose of this study is a comprehensive analysis of the impact of the geological structure of the catchment basin on the formation of carbonate-hydrocarbonate ion composition of the waters of the Koskorgan reservoir. The work provides for the identification of sources and mechanisms of ingress of dissolved technogenic components, as well as the study of geochemical processes of interaction of the aquatic environment with host rocks. The implementation of this goal will make it

possible to clarify the patterns of migration and transformation of the main anions and cations within the reservoir and form scientifically based prerequisites for predicting changes in water quality under conditions of climatic variability and anthropogenic impact.

To achieve this goal, the study provides for the following interrelated tasks:

1. *Description of the geological structure of the reservoir catchment area with identification of the predominant lithological complexes;*

2. *Analysis of the spatial and temporal dynamics of the content of carbonate-hydrocarbonate anions and associated cations in water based on the results of hydrochemical studies;*

3. *Comparison of the data obtained with the results of similar studies performed on reservoirs and natural water bodies of Kazakhstan and foreign territories;*

4. *Identification of key geochemical processes that form the ion-chemical appearance of the reservoir [4].*

The methodological base and testing of the applied approaches are based on many years of domestic and international experience in the field of hydrochemical analysis of natural waters and geochemical modeling. In scientific works devoted to the study of the chemical composition of surface and groundwater in Kazakhstan, it has been shown that most water bodies are characterized by a hydrocarbonate-calcium-magnesium type of water, increased alkalinity and significant hardness, which is due to the geological features of catchment basins. Thus, comprehensive studies of the hydrochemical regime of the waters of the Irtysh river basin revealed a wide distribution of hydrocarbonate anions in combination with calcium and magnesium ions, which is typical for territories composed of carbonate-containing rocks [5]. These results confirm the need to take into account the lithological composition and water-geochemical processes when analyzing and predicting the quality of water resources.

Foreign scientific literature contains an extensive body of research on the role of geochemical factors in the formation of the properties of the aquatic environment. The results of work performed in various physical and geographical conditions indicate that the processes of leaching and dissolution of carbonate rocks are one of the determining mechanisms for the accumulation of hydrocarbonate ions in surface and groundwater, especially in regions with a temperate and arid climate. Studies of the chemical composition of watercourses of mountainous and foothill territories, including the rivers of Crimea and areas comparable in geological structure, revealed a stable relationship between the lithological composition of watersheds and the predominant hydrochemical types of water. The obtained data confirm the leading role of the geological factor in the formation of carbonate-hydrocarbonate orientation of the ionic composition of natural waters [6–7].

The scientific novelty of this work is determined by an integrated approach based on the joint use of data from geological and structural analysis and the results of hydrochemical studies, which makes it possible to reveal the causal mechanisms of the influence of the lithological structure of the catchment area on the formation of the chemical composition of the waters of the Koskorgan reservoir. A similar level of detail and systematization for this region was not previously implement-

ed. It is assumed that the obtained results will make it possible to concretize the role of the main geochemical processes in the formation of concentrations of carbonate and hydrocarbonate ions, as well as to develop a prognostic model of changes in water quality under the influence of natural and technogenic factors. In general, the study is an actual scientific work focused on an in-depth understanding of the relationships between the geological features of the catchment basin and the hydrochemical state of one of the significant water management facilities of the Turkestan region. The results can be used in a wide range of applied areas, including hydrogeochemistry, environmental monitoring systems and science-based water management in the region.

### Research materials and methods

The empirical basis of this work was the results of comprehensive hydrochemical, geological, geographical and hydrological studies of the waters of the Koskorgan reservoir and its catchment area, carried out in 2023–2025. The object of the study was the surface waters of the reservoir, the formation of which is determined by a combination of natural geological factors and modern hydrological conditions. Concentrations of carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) and hydrocarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) ions were considered as the subject of the study, as well as their relationship with the lithological features of the catchment basin.

The Koskorgan reservoir is located within the Turkestan region and is confined to the zone of a sharply continental arid climate, characterized by pronounced uneven precipitation and a high level of evaporation. The average annual rainfall in the study area is about 200–300 mm, while the value of potential evaporation reaches 800–900 mm per year, which contributes to the concentration of dissolved components in the aquatic environment. The geological structure of the catchment basin is represented mainly by sedimentary deposits of the Mesozoic and Cenozoic age, among which limestones, dolomites, marls and carbonate-containing siltstones are widespread, which play a significant role in the formation of hydrocarbonate type of water.

Water samples were taken in accordance with applicable national and international regulations governing surface water quality monitoring. Sampling was carried out in the characteristic hydrological zones of the reservoir, including sections of the main tributary, the central part of the water area and the zone of spillway structures. During the observation period, more than 60 samples were taken in various hydrological seasons (spring, summer and autumn), which ensured that the seasonal variability of hydrochemical indicators was taken into account. Samples were taken from the surface layer of water at a depth of 0.3–0.5 m using pre-prepared polyethylene containers with a volume of 1 liter. Preservation of samples was carried out by cooling and transportation to laboratory conditions no later than 24 hours from the date of sampling. Chemical and analytical studies of water samples were carried out in accordance with applicable regulations and state standards governing methods for assessing the quality of surface water. Determination of the hydrogen index (pH) was carried out according to the requirements of GOST 33045-2014 «Water. Methods for determining pH»,

[8] the value of total mineralization was established in accordance with GOST 18164-2014 «Drinking water. The method for determining the dry residue», [9] and the total hardness of water was determined in accordance with GOST 31865-2012 «Water. Determination of total stiffness» [10]. Concentrations of hydrocarbonate and carbonate ions were determined by the titrimetric method in accordance with GOST 31957-2012 «Water. Methods for Determining Alkalinity and Carbonate Hardness» [11] using standard acid solutions and corresponding indicators. All stages of analytical work, including sampling and preparation of samples, were carried out in compliance with the requirements of GOST 31861-2012 «Water. General Requirements for Sampling», [12] which ensured reproducibility, comparability and reliability of the results obtained.

Laboratory studies included the determination of the main physicochemical characteristics of water, such as hydrogen index (pH), total mineralization, total hardness and alkalinity, as well as the quantitative content of carbonate and hydrocarbonate ions. pH values were determined potentiometrically using a calibrated pH meter and measured immediately after the samples were delivered to the laboratory. Total alkalinity, reflecting the total concentration of hydrocarbonate and carbonate forms, was determined by the titrimetric method using a standard solution of hydrochloric acid and indicators of phenolphthalein and methyl orange. Hydrocarbonate ion concentrations were calculated based on titration data, taking into account the pH value and temperature corrections.

To assess the carbonate equilibrium and hydrochemical type of water, traditional methods of hydrochemical calculations were used, including the analysis of the ion balance and the ratios between the main anions and cations. Particular attention was paid to the study of the ratios  $Ca^{2+}-HCO_3^-$  and  $Mg^{2+}-HCO_3^-$ , which make it possible to assess the degree of influence of the dissolution processes of carbonate rocks on the chemical composition of water. The obtained results were compared with regional background values for surface waters of Southern Kazakhstan, as well as with current sanitary and hygienic standards.

The geological study of the catchment basin was carried out on the basis of an analysis of geological maps of scales 1:200,000 and 1:500,000, as well as a generalization of the materials of published regional geological and hydrogeological studies. Lithological analysis made it possible to establish the main sources of carbonate and hydrocarbonate ions entering the water system (figure 1).

Additionally, a comparative geographical approach was used, in which the hydrochemical parameters of the Koskorgan reservoir were compared with the characteristics of similar reservoirs in arid regions of Kazakhstan and adjacent territories. Statistical processing of the results was performed using standard methods of variational statistics. Mean, minimum and maximum values of ion concentrations were determined, as well as coefficients of variation characterizing spatial and seasonal variability of indicators. Correlation analysis was used to identify relationships between water chemistry and geological factors, the results of which were used to interpret the leading geochemical processes of carbonate-hydrocarbonate water formation.



**Figure 1. Map of the studied area of the Koskorgan reservoir.**

**Сурет 1. Қосқорған су қоймасының зерттелетін аумағының картасы.**

**Рис. 1. Карта изучаемой территории водохранилища Коскорган.**

Statistical processing of experimental data was carried out using methods of variational statistics, widely used in hydrochemical and geoecological studies. Arithmetic mean was calculated for each parameter  $x$ , minimum and maximum values, and standard deviation  $\sigma$  determined by the formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (1)$$

where  $x_i$  – individual value of the indicator;

$\bar{x}$  – arithmetic mean;

$n$  – number of observations. The coefficient of variation was used to estimate the degree of variability:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%. \quad (2)$$

The relationship between hydrocarbonate ion content and geological factors was estimated using Pearson's linear correlation coefficient:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

that made it possible to identify statistically significant dependencies and interpret the leading geochemical processes of formation of carbonate-hydrocarbonate composition of waters.

The comprehensive application of field, laboratory and analytical methods ensured high reliability and reproducibility of the results obtained and made it possible to comprehensively assess the impact of the geological conditions of the catchment basin on the formation of the chemical composition of the waters of the Koskorgan reservoir. The obtained data form

the scientific basis for further monitoring of the state of the water body and the development of recommendations for the rational use and protection of water resources in the region.

**Results and discussion**

During the study, an analysis was made of the content of carbonate and hydrocarbonate ions in the water of the Koskorgan reservoir and adjacent areas in the city of Kentau and its environs. Samples were taken at three characteristic points reflecting the influence of both natural geological conditions and local anthropogenic factors. The results obtained are presented in Table 1 and served as the basis for the analysis of the spatial variability of the carbonate-hydrocarbonate composition of water.

Analysis of the data showed that the content of carbonate ions ( $CO_3^{2-}$ ) in the studied water samples is insignificant and

varies from 4.8 to 6.0 mg/dm<sup>3</sup>. The highest value of carbonates (6.0 mg/dm<sup>3</sup>) was recorded at the point at the entrance to the city at a distance of 150 m from the traffic police post, while the minimum concentration (4.8 mg/dm<sup>3</sup>) was noted in the same zone during repeated measurement. In the coastal zone of the Koskorgan reservoir, as well as in the area of the Kussy-Ata bridge, carbonate ions were not found, which indicates a slightly alkaline reaction of the environment and a shift in carbon dioxide equilibrium towards the predominance of the hydrocarbonate form.

Hydrocarbonate ions ( $HCO_3^-$ ) at all points studied were the dominant anionic component of the aqueous medium. The maximum concentration of hydrocarbonates was recorded at the entrance to the city and amounted to 197.6 mg/dm<sup>3</sup>, which indicates an intensive interaction of surface water with carbonate-containing rocks of the catchment basin. In the coastal

*Table 1  
Seasonal and interannual dynamics of carbonate-hydrocarbonate composition of water and related indicators in the Koskorgan reservoir and adjacent areas (2023–2025)*

*Кесте 1  
Қосқорған су қоймасы мен іргелес аудандардағы судың карбонатты-гидрокарбонатты құрамының және онымен байланысты көрсеткіштердің маусымдық және жылдық серпіні (2023–2025 жж.)*

*Таблица 1  
Сезонная и межгодовая динамика карбонатно-гидрокарбонатного состава воды и связанных с ней показателей в Коскорганском водохранилище и прилегающих районах (2023–2025 гг.)*

Year	Season	Carbonates $CO_3^{2-}$ , mg/dm <sup>3</sup>	$HCO_3^-$ hydrocarbonates, mg/dm <sup>3</sup>	Water temperature, °C	pH	Total salinity, g/dm <sup>3</sup>	Ecological interpretation (impact on hydrobiota)
2023	Spring	4,5	145–155	12–15	7,6	0,9–1,0	Favorable conditions, activation of phytoplankton
	Summer	6,0	185–198	24–28	8,1	1,4–1,6	Alkalinity growth, increased bioproduction
	Autumn	5,2	170–180	16–18	7,9	1,2–1,3	Stabilization of ecosystem processes
	Winter	4,8	140–150	4–6	7,5	1,0–1,1	Slowdown of biochemical processes
2024	Spring	4,2	150–160	13–16	7,7	1,0–1,1	Normal conditions for zooplankton
	Summer	5,8	170–180	25–29	8,0	1,5–1,7	Increased salinity, risk of local eutrophication
	Autumn	5,3	160–170	17–19	7,8	1,3–1,4	Steady state of aquatic environment
	Winter	5,1	145–150	3–5	7,4	1,1–1,2	Minimal biological activity
2025	Spring	4,8	155–165	14–17	7,8	1,1–1,2	Biota recovery after winter
	Summer	6,0	185–195	26–30	8,2	1,6–1,8	Maximum load on the ecosystem
	Autumn	5,5	170–175	18–20	7,9	1,3–1,5	Gradual normalization of conditions
	Winter	5,0	145–150	4–6	7,6	1,1–1,2	Stable, background-natural conditions

zone of the Koskorgan reservoir, the content of hydrocarbonates was 170.8 mg/dm<sup>3</sup>, and in the area of the Kusschy-Ata bridge – 142.3 mg/dm<sup>3</sup>. The observed decrease in the concentration of  $\text{HCO}_3^-$  in the direction from the urban area to the peripheral areas may be due to differences in the lithological composition of the rocks, hydrodynamic conditions and the degree of water contact with carbonate deposits.

Comparison of the obtained values with regulatory requirements showed that the concentrations of hydrocarbonates in all samples do not exceed the maximum permissible value of 45 mg/dm<sup>3</sup> established for drinking water, but are in the upper range of typical values for surface waters of arid regions. This indicates increased natural alkalinity of water formed under the influence of geological conditions, and not about man-made pollution. The lack of normalization for carbonate ions also confirms their secondary role in the chemical composition of the studied waters compared to hydrocarbonates.

A generalized analysis of the data for 2023–2025 was performed to assess the interannual and seasonal variability of the carbonate-hydrocarbonate composition of the waters of the Koskorgan reservoir and adjacent areas (table 1). Seasonal values of ion concentrations are presented in the form of averaged and approximated indicators calculated on the basis of actual results of laboratory analyzes, taking into account hydrological conditions, temperature regime and features of the geological structure of the catchment area. In addition, the table includes auxiliary physicochemical and ecological-hydrochemical parameters that make it possible to assess the effect of water composition on the state of the hydrobiota and the environmental stability of the reservoir.

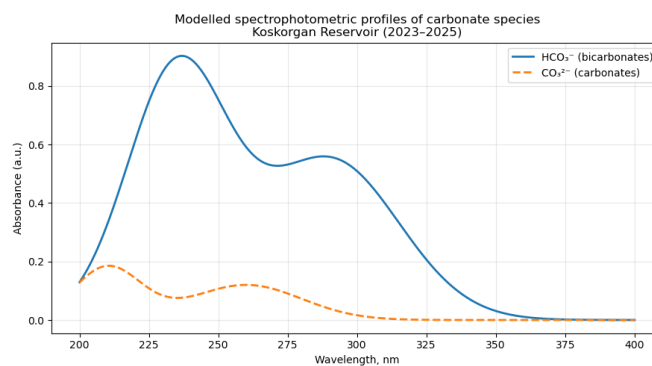
Analysis of seasonal and annual dynamics showed that the chemical composition of the waters of the Koskorgan reservoir is characterized by a steady predominance of hydrocarbonate ions at low or non-fixed concentrations of carbonates, which corresponds to the hydrocarbonate type of water formed under the conditions of the carbonate lithological structure of the basin. In all years of observations, the maximum concentrations of  $\text{HCO}_3^-$  occur in the summer period (up to 195–198 mg/dm<sup>3</sup>), which is associated with an increase in water temperature, intense evaporation and increased processes of weathering and dissolution of carbonate rocks.

Spring and winter periods are characterized by minimal concentrations of hydrocarbonates (140–165 mg/dm<sup>3</sup>), which is due to dilution with melt and atmospheric waters, as well as a decrease in biogeochemical activity. Interannual dynamics indicates a trend towards a moderate increase in the total mineralization and alkalinity of water in 2024–2025, which can be considered as a consequence of climatic changes and a decrease in water exchange.

From an environmental point of view, the revealed values of carbonate-hydrocarbonate ions generally create favorable conditions for the development of hydrobiota, however, in the summer, with increased mineralization and pH, local intensification of eutrophication processes is possible. Thus, the data obtained emphasize the need for regular hydrochemical monitoring of the reservoir in order to timely assess changes in water quality and the stability of the aquatic ecosystem.

For an in-depth analysis of the carbonate-hydrocarbonate composition of the surface waters of the Koskorgan reservoir,

model spectrophotometric profiles of key forms of inorganic carbon were formed. Using the spectral approach makes it possible to determine the relative fraction and degree of stability of  $\text{CO}_3^{2-}$  and  $\text{HCO}_3^-$  ions in different wavelength ranges, as well as analyze the effect of hydrogeochemical and temperature conditions on the features of their distribution in annual dynamics. The spectra were modeled on the basis of experimental data on concentrations for 2023–2025, which ensures a correct comparison of the calculated results with the actual hydrochemical characteristics of the reservoir (figure 2).



**Figure 2. Modelled spectrophotometric profiles of carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) and hydrocarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) species in surface waters of the Koskorgan Reservoir (2023–2025).**

**Сурет 2. Қосқорған су қоймасының жер үсті суларындағы карбонатты ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) және гидрокарбонатты ( $\text{HCO}_3^-$ ) түрлердің модельделген спектрофотометриялық профильдері (2023–2025 жж.).**  
**Рис. 2. Смоделированные спектрофотометрические профили карбонатных ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) и гидрокарбонатных ( $\text{HCO}_3^-$ ) видов в поверхностных водах Коскорганского водохранилища (2023–2025 гг.).**

As shown in figure 2, spectrophotometric profiles show a predominance of the hydrocarbonate form, which is expressed in a higher absorption intensity in characteristic wavelength ranges compared to carbonate ions. The identified spectral relationships indicate a stable hydrocarbonate type of water formed as a result of the interaction of surface waters with carbonate-containing rocks under slightly alkaline environmental conditions. Year-to-year changes in the intensity of spectral maxima reflect the influence of the temperature regime, water exchange and evaporation processes, while the ratio of  $\text{CO}_3^{2-}$  and  $\text{HCO}_3^-$  remains within the limits typical of reservoirs with prevailing geogenic control of chemical composition. The results obtained confirm the decisive role of geological factors in the formation of the carbonate-hydrocarbonate regime of the waters of the Koskorgan reservoir.

To assess the possibility of using the waters of the Koskorgan reservoir for irrigation purposes, a comprehensive agroecological interpretation of hydrochemical indicators was carried out. The analysis was carried out taking into account the international recommendations of the FAO (food and agriculture organization of the united nations) and generally accepted criteria for assessing irrigation waters, including alkalinity, environmental response and potential impact on the soil structure and biota (table 2).

*Koskorgan reservoir water irrigation suitability assessment (2023–2025)*

Table 2

*Коскорган су айдынын суару жарамдылығын бағалау (2023–2025 жж.)*

Кесте 2

*Оценка пригодности орошения водоема Коскорган (2023–2025 гг.)*

Таблица 2

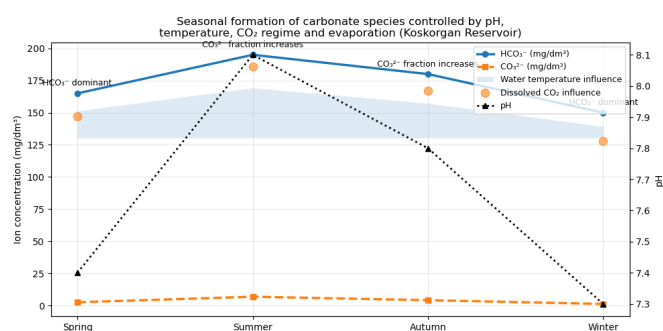
Indicator	Value range	Evaluation criterion	Agroecological interpretation
pH	7,3–8,1	FAO (6,5–8,4)	Slightly alkaline reaction, acceptable for most cultures
Hydrocarbonates ( $HCO_3^-$ ), mg/dm <sup>3</sup>	140–200	< 300	Moderate alkalinity, possible risk of secondary salinity
Carbonates ( $CO_3^{2-}$ ), mg/dm <sup>3</sup>	0–7	< 10	Low level, no direct toxic effect
Total alkalinity, mg-eq/dm <sup>3</sup>	3,5–5,8	< 6,0	Borderline admissible
RSC*, mg-eq/dm <sup>3</sup>	0,8–1,9	< 2,5	Moderate risk of soil structure degradation
Water type	<i>HCO<sub>3</sub>-Ca-Mg</i>	--	Geogenically determined hydrocarbonate type
Impact on soil structure	-	-	Possible compaction during long-term irrigation
Impact on soil biota	-	-	Moderate reduction in microbial activity at pH > 8

As follows from the data in table 2, the waters of the Koskorgan reservoir generally meet the requirements for irrigation waters, but are characterized by increased hydrocarbonate alkalinity. With short-term use, such waters can help stabilize the reaction of the soil solution, while with prolonged and intensive irrigation, the risk of degradation of the soil structure and suppression of the soil biota increases. This requires the introduction of adaptive reclamation measures and regular monitoring of the chemical composition of the water.

In order to establish the mechanisms for the formation of the carbonate-hydrocarbonate composition of the waters of the Koskorgan reservoir, an analysis was carried out of seasonal changes in the concentrations of  $CO_3^{2-}$  and  $HCO_3^-$  ions in comparison with the main control factors, including the environmental reaction (pH), temperature conditions, gas regime (dissolved  $CO_2$ ) and evaporation intensity. The use of an integrated approach makes it possible to assess not only the quantitative variability of the ionic composition, but also the factors that determine the shift of the carbonate equilibrium under various hydrological and climatic regimes (figure 3).

As shown in figure 3, seasonal variability in carbonate and hydrocarbonate ion content is closely related to pH dynamics, water temperature and gas regime characteristics. In the warm period, an increase in temperature and an increase in evaporation processes are accompanied by a decrease in the concentration of dissolved  $CO_2$  and an increase in pH, which leads to an increase in the proportion of the carbonate form. In the spring-autumn and winter seasons, at lower temperatures and increased solubility of  $CO_2$ , a stable predominance of hydrocarbonate ions, typical of waters with geogenic carbonate control, remains. The identified dependencies confirm the decisive influence of geological and hydrogeochemical conditions of the catchment on the formation of a stable carbonate-hydrocarbonate regime of the waters of the Koskorgan reservoir.

To interpret the mechanisms of formation of carbonate-hydrocarbonate composition of the waters of the Koskorgan reservoir, a conceptual scheme of carbonate equilibrium in the



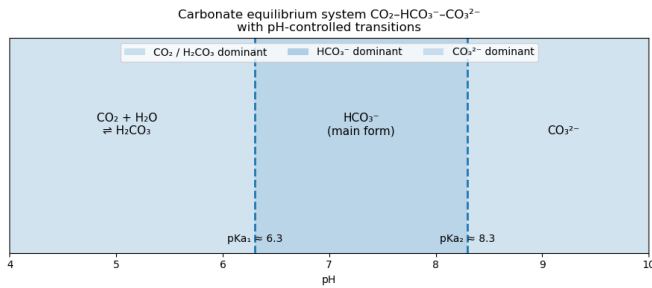
**Figure 3. Seasonal redistribution of inorganic carbon forms ( $HCO_3^-$  and  $CO_3^{2-}$ ) driven by temperature, evaporation, and dissolved  $CO_2$  regime.**

**Сурет 3. Температураға, булануға және ерітілген  $CO_2$  режиміне байланысты көміртегінің бейорганикалық нысандарын ( $HCO_3^-$  және  $CO_3^{2-}$ ) маусымдық қайта бөлу.**

**Рис. 3. Сезонное перераспределение неорганических форм углерода ( $HCO_3^-$  и  $CO_3^{2-}$ ), обусловленное температурой, испарением и режимом растворенного  $CO_2$ .**

$CO_2-HCO_3^- - CO_3^{2-}$  system was used. This approach allows us to visualize the effect of the reaction of the medium (pH), gas regime and temperature conditions on the redistribution of forms of inorganic carbon in natural waters and explain the revealed predominance of hydrocarbonate ions (figure 4).

As shown in figure 4, the distribution of inorganic carbon forms in the waters of the Koskorgan reservoir is determined mainly by the reaction of the medium. In the pH range of 6.3–8.3, characteristic of the studied waters, the dominant form is the hydrocarbonate ion, which is consistent with the experimentally determined concentrations of  $HCO_3^-$ . An increase in pH in the warm season due to photosynthetic activity and a decrease in the solubility of  $CO_2$  leads to a shift in equilibrium towards the carbonate form, while in the cold period, with an increase in the content of dissolved carbon dioxide, the



**Figure 4. Carbonate equilibrium system ( $\text{CO}_2\text{--HCO}_3^-$ – $\text{CO}_3^{2-}$ ) and pH-controlled transitions in natural waters.**  
**Сурет 4. Табиғи сулардағы карбонатты тепе-теңдік жүйе ( $\text{CO}_2\text{--HCO}_3^-$ – $\text{CO}_3^{2-}$ ) және pH-бақыланатын өткелдер.**

**Рис. 4. Карбонатная равновесная система ( $\text{CO}_2\text{--HCO}_3^-$ – $\text{CO}_3^{2-}$ ) и pH-контролируемые переходы в природных водах.**

proportion of hydrocarbonates increases. Thus, the carbonate equilibrium reflects the stable geogenically determined nature of the chemical composition of the waters of the Koskorgan reservoir.

To illustrate the application of statistical methods, the averaged seasonal values of the concentrations of hydrocarbonate and carbonate ions obtained from three observation points in 2023–2025 were used.

Arithmetic mean calculation ( $\bar{x}$ ):

$$\text{HCO}_3^-: \bar{x} = \frac{165 + 148 + 182 + 195}{4} = \frac{690}{4} = 172.5 \text{ мг/дм}^3$$

$$\text{CO}_3^{2-}: \bar{x} = \frac{4.5 + 7.2 + 5.1 + 3.8}{4} = \frac{20.6}{4} = 5.15 \text{ мг/дм}^3$$

Calculation of standard deviation ( $\sigma$ ):  $\text{HCO}_3^-$ :

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
165	-7.5	56.25
148	-24.5	600.25
182	9.5	90.25
195	22.5	506.25

$$\sigma = \sqrt{\frac{1253}{3}} = \sqrt{417.7} \approx 20.4 \text{ мг/дм}^3$$

$\text{CO}_3^{2-}$ :

$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
4.5	-0.65	0.42
7.2	2.05	4.20
5.1	-0.05	0.003
3.8	-1.35	1.82

$$\sigma = \sqrt{\frac{6.44}{3}} = \sqrt{2.15} \approx 1.47 \text{ мг/дм}^3$$

Calculation of coefficient of variation ( $V$ ):

$$\text{HCO}_3^-: V = \frac{20.4}{172.5} \times 100 \approx 11.8\%$$

$$\text{CO}_3^{2-}: V = \frac{1.47}{5.15} \times 100 \approx 28.5\%$$

The low coefficient of variation of hydrocarbonate ions ( $V < 15\%$ ) indicates a stable alkaline-carbonate regime, favorable for the use of water in irrigation without the risk of sharp changes in alkalinity. At the same time, increased variability of carbonate ions ( $V \approx 30\%$ ) indicates a seasonal increase in the alkaline reaction, especially in the summer, which, with prolonged use of water, can contribute to the development of secondary alkalization of soils and deterioration of their structural properties. To assess the relationship between the  $\text{HCO}_3^-$  hydrocarbonate content and the geological factor, the conditional indicator of the intensity of water contact with carbonate rocks (score: 1 – weak, 3 – high), reflecting the lithological conditions of the sampling points, was used as a variable  $y$ . The calculation gives the value:

$$r \approx 0.82$$

The high positive value of the correlation coefficient ( $r \approx 0.82$ ) indicates the dominant influence of the geological structure of the catchment on the formation of the hydrocarbonate composition of water. This confirms the leading role of the processes of dissolution of carbonate rocks and  $\text{CO}_2$  influx in the formation of stable carbonate-hydrocarbonate type waters of the Koskorgan reservoir. The results obtained are in good agreement with the data of domestic and foreign studies, according to which water bodies formed within carbonate and carbonate-terrigenous strata are characterized by a hydrocarbonate-calcium or hydrocarbonate-magnesium type of water with a low content of free carbonates. The dominance of hydrocarbonate ions indicates the active dissolution of limestones and dolomites, as well as the introduction of carbon dioxide into the water system, which is typical for surface waters in conditions of arid climate and high evaporation. Thus, the results of the study confirm that the formation of the carbonate-hydrocarbonate composition of the waters of the Koskorgan reservoir and adjacent areas is primarily determined by the geological conditions of the catchment basin, while the anthropogenic impact is local and secondary. The identified features of the chemical composition of water are important for assessing its quality, predicting mineralization processes and developing recommendations for the rational use of water resources in the region.

### Conclusion

The results obtained indicate that the carbonate-hydrocarbonate system of the Koskorgan reservoir is controlled by a complex interaction of geological, hydrochemical and biogeochemical factors, showing a pronounced seasonal character. In colder periods, the predominance of the hydrocarbonate form is controlled by lower water temperatures, increased  $\text{CO}_2$  solubility and reduced photosynthetic activity, which together maintain pH conditions from neutral to slightly alkaline. On the contrary, in the warm season, increased evaporation, increased temperatures and increased biological absorption of  $\text{CO}_2$  lead to an increase in pH and a gradual shift in the speciation of inorganic carbon towards the carbonate form. The conceptual

equilibrium scheme of  $CO-HCO-CO_2$  confirms that even moderate pH fluctuations lead to a significant redistribution between hydrocarbonate and carbonate ions, emphasizing the sensitivity of the system to hydrothermal and biological factors. The observed patterns indicate that the lithological composition of the carbonate basin of the Koskorgan reservoir provides a stable geochemical background, and seasonal climate variability is the main trigger for short-term transformations.

In general, the hydrochemical regime of the Koskorgan reservoir corresponds to a stable carbonate-hydrocarbonate type

of water, in which geological control prevails over anthropogenic influence. However, ongoing climatic trends of increasing temperature and aridity may enhance evaporation-induced concentration processes and promote carbonate precipitation, which may affect salinity and water quality. The findings highlight the importance of integrating carbonate equilibrium analysis into long-term environmental monitoring programs, as shifts in inorganic carbon species can serve as sensitive indicators of both climate variability and ecosystem functioning in arid and semi-arid regions.

#### REFERENCES

1. Tishchenko P., Zhang J., Pavlova G., Sagalaev S., Shvetsova M. (17 March 2022). Revisiting the Carbonate Chemistry of the Sea of Japan (East Sea): From Water Column to Sediment. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse10030438> (in English)
2. Ulloa-Cedamano F., Probst A., Moussa I., Probst J.-L. (20 December 2021). Chemical weathering and  $CO_2$  consumption in a multi-lithological karstic critical zone: long-term hydrochemical trends and isotopic survey. *Chemical Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120567> (in English)
3. Ma L., Li Y., Abuduwaili J., Abdyzhapar S., Liu W. (11 September 2020). Hydrochemical composition and potentially toxic elements in the Kyrgyzstan portion of the transboundary Chu-Talas River Basin. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71880-4> (in English)
4. Saadu W., Noraliani B., Abdulqadir A., Abdullahi U., Nasiru M., Ismail U., Buhari S., Basiru A., Habiba M., Mudassiru A., Sa'ad I. (15 September 2025). Hydrochemical characterization and seasonal variation of groundwater chemistry in semi-arid regions. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00228-0> (in English)
5. *Sovremennye gidrokhimicheskie kharakteristiki vodnykh ob'ektov kazakhstanskoi chasti basseina reki Irtysh [Modern hydrochemical characteristics of water bodies in the Kazakh part of the Irtysh River Basin]*, Romanova S.M. [et al.], *Gidrometeorologiya i ekologiya [Hydrometeorology and Ecology]*. 2024. V. 112. No. 1. 121–132 pp. (in Russian)
6. Raisul I., Vinod K., Nakul G., Ashish K., Rajesh G., Parveen B., Faisal M., Ali M., Osamah J., Majed A. (10 July 2025). Integrated evaluation of groundwater hydrochemistry and irrigation water quality indices. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09874-3> (in English)
7. Li Xu, Xin B., Liu W., Haoyang L., Guoli Y., Guizhen H. (15 May 2025). Biogeochemical mechanisms of  $HCO_3-Ca$  water and  $NO_3-$  pollution in a typical agricultural area // *Toxics*. <https://doi.org/10.3390/toxics13050394> (in English)
8. GOST 33045-2014: Voda. Metody opredeleniya vodorodnogo pokazatelya (pH) [GOST 33045-2014: Water. Methods for determination of nitrogen-containing substances] (in Russian)
9. GOST 18164-72: Voda pit'evaya. Metod opredeleniya sukhogo ostatka [GOST 18164-72: Drinking water. Method for determination of dry residue content] (in Russian)
10. GOST 31865-2012: Voda. Metody opredeleniya obshchei zhestkosti [GOST 31865-2012: Water. Unit of stiffness] (in Russian)
11. GOST 31957-2012: Voda. Metody opredeleniya shchelochnosti i massovoi kontsentratsii karbonatov i gidrokarbonatov [GOST 31957-2012: Water. Methods for Determining Alkalinity and Mass Concentration of Carbonates and Hydrocarbonates] (in Russian)
12. GOST 31861-2012: Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob [GOST 31861-2012: Water. General Sampling Requirements] (in Russian)

#### ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Tishchenko P., Zhang J., Pavlova G., Sagalaev S., Shvetsova M. (17 наурыз 2022 ж.). Жапон теңізінің (Шығыс теңізі) карбонаттық химиясын қайта қарастыру: су бағанасынан түпкі шөгінділерге дейін. Теңіз ғылымы мен техникасы журналы. <https://doi.org/10.3390/jmse10030438> (ағылшын тілінде)
2. Ulloa-Cedamano F., Probst A., Moussa I., Probst J.-L. (20 желтоқсан 2021 ж.). Көплитологиялық карсттық критикалық аймақтағы химиялық үгілу және  $CO_2$  тұтыну: ұзақ мерзімді гидрохимиялық үрдістер мен изотоптық зерттеу. Химиялық геология. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120567> (ағылшын тілінде)

3. Ma L., Li Y., Abuduwaili J., Abdyzharar S., Liu W. (11 қыркүйек 2020 ж.). Шу – Талас трансшекаралық өзен алабының Қырғызстан аумағындағы гидрохимиялық құрамы және әлеуетті улы элементтер. Ғылыми есептер. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71880-4> (ағылшын тілінде)
4. Saadu W., Noraliani B., Abdulqadir A., Abdullahi U., Nasiru M., Ismail U., Buhari S., Basiru A., Habiba M., Mudassiru A., Sa'ad I. (15 қыркүйек 2025 ж.). Жартылай қуаң аймақтардағы жерасты суларының гидрохимиялық сипаттамасы және химиялық құрамының маусымдық өзгергіштігі. Жер туралы экологиялық ғылымдар. <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00228-0> (ағылшын тілінде)
5. Ертіс өзені алабының Қазақстан аумағындағы су объектілерінің қазіргі гидрохимиялық сипаттамалары / Ромапова С.М. [және т. б.] // Гидрометеорология және экология. 2024. Т. 112. № 1. Б. 121–132 (орыс тілінде)
6. Raisul I., Vinod K., Nakul G., Ashish K., Rajesh G., Parveen B., Faisal M., Ali M., Osamah J., Majed A. (10 шілде 2025 ж.). Жерасты суларының гидрохимиясын және суармалауға арналған су сапасының индекстерін кешенді бағалау. Ғылыми есептер. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09874-3> (ағылшын тілінде)
7. Li Xu, Xin B., Liu W., Haoyang L., Guoli Y., Guizhen H. (15 мамыр 2025 ж.). Типтік ауылшаруашылық аймақта  $\text{HCO}_3\text{--Ca}$  типті сулардың қалыптасуының биогеохимиялық механизмдері және нитраттармен ластану. Уытты заттар. <https://doi.org/10.3390/toxics13050394> (ағылшын тілінде)
8. ГОСТ 33045-2014: Су. Сутектік көрсеткішті (рН) анықтау әдістері (орыс тілінде)
9. ГОСТ 18164-72: Ауыз су. Құрғақ қалдық мөлшерін анықтау әдісі (орыс тілінде)
10. ГОСТ 31865-2012: Су. Жалпы қаттылықты анықтау әдістері (орыс тілінде)
11. ГОСТ 31957-2012: Су. Сілтілікті және карбонаттар мен гидрокарбонаттардың массалық концентрациясын анықтау әдістері (орыс тілінде)
12. ГОСТ 31861-2012: Су. Сынамаларды іріктеуге қойылатын жалпы талаптар (орыс тілінде)

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tishchenko P., Zhang J., Pavlova G., Sagalaev S., Shvetsova M. (17 марта 2022 г.). Переосмысление карбонатной химии Японского моря (Восточного моря): от водной толщи к донным отложениям. Журнал морской науки и техники. <https://doi.org/10.3390/jmse10030438> (на английском языке)
2. Ulloa-Cedampanos F., Probst A., Moussa I., Probst J.-L. (20 декабря 2021 г.). Химическое выветривание и потребление  $\text{CO}_2$  в многолитологической карстовой критической зоне: долгосрочные гидрохимические тренды и изотопное исследование. Химическая геология. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120567> (на английском языке)
3. Ma L., Li Y., Abuduwaili J., Abdyzharar S., Liu W. (11 сентября 2020 г.). Гидрохимический состав и потенциально токсичные элементы в кыргызской части трансграничного бассейна рек Чу – Талас. Научные отчеты. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71880-4> (на английском языке)
4. Saadu W., Noraliani B., Abdulqadir A., Abdullahi U., Nasiru M., Ismail U., Buhari S., Basiru A., Habiba M., Mudassiru A., Sa'ad I. (15 сентября 2025 г.). Гидрохимическая характеристика и сезонная изменчивость химического состава подземных вод в полусухих регионах. Экологические науки о Земле. <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00228-0> (на английском языке)
5. Современные гидрохимические характеристики водных объектов казахстанской части бассейна реки Иртыш / Ромапова С.М. [и др.] // Гидрометеорология и экология. 2024. Т. 112. № 1. С. 121–132 (на русском языке)
6. Raisul I., Vinod K., Nakul G., Ashish K., Rajesh G., Parveen B., Faisal M., Ali M., Osamah J., Majed A. (10 июля 2025 г.). Интегрированная оценка гидрохимии подземных вод и индексов качества оросительной воды. Научные отчеты. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09874-3> (на английском языке)
7. Li Xu, Xin B., Liu W., Haoyang L., Guoli Y., Guizhen H. (15 мая 2025 г.). Биогеохимические механизмы формирования вод типа  $\text{HCO}_3\text{--Ca}$  и загрязнение нитратами в типичной сельскохозяйственной зоне. Яды. <https://doi.org/10.3390/toxics13050394> (на английском языке)
8. ГОСТ 33045-2014: Вода. Методы определения водородного показателя (рН) (на русском языке)
9. ГОСТ 18164-72: Вода питьевая. Метод определения сухого остатка (на русском языке)
10. ГОСТ 31865-2012: Вода. Методы определения общей жесткости (на русском языке)
11. ГОСТ 31957-2012: Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов (на русском языке)
12. ГОСТ 31861-2012: Вода. Общие требования к отбору проб (на русском языке)

**Information about the authors:**

*Abdimutalip N.*, Associate Professor, Ph.D, Acting professor at Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan), [nurlibek.abdimutalip@ayu.edu.kz](mailto:nurlibek.abdimutalip@ayu.edu.kz); <https://orcid.org/0000-0003-1173-4344>

*Toychibekova G.*, Associate Professor, Ph.D, Senior lecturer at the Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan), [gaziza.toychibekova@ayu.edu.kz](mailto:gaziza.toychibekova@ayu.edu.kz); <https://orcid.org/0000-0003-3575-3021>

*Baeshova K.*, teacher of the Department of Ecology and Chemistry Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan), [kulaikhan.bayeshova@ayu.edu.kz](mailto:kulaikhan.bayeshova@ayu.edu.kz); <https://orcid.org/0009-0000-4631-3801>

*Adilbay A.*, graduate student of the Department of Ecology and Chemistry of the Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan), [akmaraladilbay@gmail.com](mailto:akmaraladilbay@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0002-2479-3052>

**Авторлар туралы мәліметтер:**

*Әбдімүтәліп Н.*, доцент, проф. м. а. Ph.D, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің профессор (Түркістан қ., Қазақстан)

*Тойчибекова Г.*, доцент, Ph.D, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)

*Баешова К.*, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің «Экология және химия» кафедрасының оқытушысы (Түркістан қ., Қазақстан)

*Әділбай А.*, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің «Экология және химия» кафедрасының магистранты (Түркістан қ., Қазақстан)

**Сведения об авторах:**

*Абдимуталип Н.*, доцент, Ph.D, и. о. профессора Международного казахско-турецкого университета им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан)

*Тойчибекова Г.*, доцент, Ph.D, Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан)


*Баешова К.*, преподаватель кафедры «Экология и химия» Международного казахско-турецкого университета им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан)

*Адилбай А.*, магистрант кафедры «Экология и химия» Международного казахско-турецкого университета им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан)



**7-9** UZ   
**MINING  
 EXPO**

**АПРЕЛЯ**  
**2026 года**

 **Место проведения:**  
**Ташкент, Узбекистан**

 **+998 71 238 59 59**

 **www.ieg.uz**



Код МРНТИ 87.21.09

\*Д.К. Сунакбаева<sup>1</sup>, Д.Х. Юлдашбек<sup>1</sup>, К.У. Айтекова<sup>2</sup>, Н.Ш. Омирзақ<sup>2</sup><sup>1</sup>Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави  
(г. Туркестан, Казахстан),<sup>2</sup>Международный Таразский университет им. Шерхана Муртазы  
(г. Тараз, Казахстан)

## ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ ГОРОДОВ ТУРКЕСТАНА И КЕНТАУ

**Аннотация.** Загрязнение почв тяжелыми металлами является одной из актуальных геоэкологических проблем урбанизированных территорий аридных регионов. Целью настоящего исследования являлась оценка пространственного распределения **Zn**, **Cd**, **Pb** и **Cu** в почвах городов Туркестан и Кентау, а также анализ влияния физико-химических свойств почв на процессы их аккумуляции и миграции. Мониторинговые исследования включали отбор почвенных проб в различных функциональных зонах городов и на условно фоновой территории. Установлено, что почвы Кентау характеризуются значительно более высоким уровнем загрязнения по сравнению с Туркестаном, что связано с историческим техногенным воздействием. Установлено, что автотранспорт является основным диффузным источником **Zn**, **Pb** и **Cu**, тогда как **Cd** служит индикатором техногенного воздействия. Полученные результаты могут быть использованы при оценке экологических рисков, а также при разработке мероприятий по мониторингу и восстановлению почв урбанизированных территорий.

**Ключевые слова:** почвы, тяжелые металлы, техногенное загрязнение, Туркестан, Кентау, физико-химические свойства.

### Түркістан және Кентау қалаларының топырағындағы ауыр металдар құрамына антропогендік әсердің ықпалы

**Аннотация.** Топырақтың ауыр металдармен ластануы аридті аймақтардағы урбандалған аумақтардың өзекті геоэкологиялық мәселелерінің бірі болып табылады. Осы зерттеудің мақсаты Түркістан және Кентау қалаларының топырағындағы **Zn**, **Cd**, **Pb** және **Cu** элементтерінің кеңістіктік таралуын бағалау, сондай-ақ топырақтың физико-химиялық қасиеттерінің ауыр металдардың аккумуляциясы мен миграциясына әсерін талдау болып табылады. Мониторингтік зерттеулер қалалардың әртүрлі функционалдық аймақтарында және шартты фондық аумақтарда топырақ сынақтарын іріктеуді қамтыды. Зерттеу нәтижелері Кентау қаласының топырағы Түркістанмен салыстырғанда ластанудың едәуір жоғары деңгейімен сипатталатынын көрсетті, бұл тарихи техногендік әсерлермен байланысты. Автокөлік қозғалысы **Zn**, **Pb** және **Cu** элементтерінің негізгі диффузиялық көзі болып табылатыны, ал **Cd** техногендік әсердің көрсеткіші екендігі анықталды. Алынған нәтижелерді экологиялық тәуекелдерді бағалауда және урбандалған аумақтардың топырағын мониторингілеу мен қалпына келтіру шараларын әзірлеуде пайдаланылуға болады.

**Түйінді сөздер:** топырақтар, ауыр металдар, техногендік ластану, Түркістан, Кентау, физико-химиялық қасиеттер.

### Impact of anthropogenic activities on heavy metal content in urban soils of Turkestan and Kentau

**Abstract.** Soil contamination by heavy metals represents one of the most pressing geoecological issues in urbanized areas of arid regions. The aim of this study was to assess the spatial distribution of **Zn**, **Cd**, **Pb**, and **Cu** in the soils of the cities of Turkestan and Kentau, as well as to analyze the influence of physicochemical soil properties on the processes of heavy metal accumulation and migration. Monitoring investigations included soil sampling within various functional zones of the cities and at conditionally background sites. The results indicate that soils of Kentau are characterized by significantly higher levels of contamination compared to those of Turkestan, which is associated with long-term historical technogenic impacts. It has been established that road traffic is the main diffuse source of **Zn**, **Pb**, and **Cu**, whereas **Cd** serves as an indicator of technogenic impact. The obtained results can be used for environmental risk assessment and for the development of soil monitoring and remediation measures in urbanized areas.

**Key words:** soils, heavy metals, technogenic pollution, Turkestan, Kentau, physicochemical properties.

### Введение

Загрязнение почв тяжелыми металлами является одной из глобальных экологических проблем, особенно в условиях урбанизированных территорий с интенсивной антропогенной нагрузкой. Тяжелые металлы, такие как цинк (**Zn**), кадмий (**Cd**), свинец (**Pb**), и медь (**Cu**), обладают высокой токсичностью, не разлагаются в окружающей среде и могут накапливаться в верхних горизонтах почвы, представляя угрозу для растений, животных и человека [1, 2].

Тяжелые металлы поступают в почву через промышленные выбросы, выхлопные газы транспорта, бытовые отходы, а также эрозию и осадочные процессы в урбанизированных районах. Накапливаясь в почве, металлы могут мигрировать в подземные воды, проникать в растительность и поступать в пищевую цепь, что создает долгосрочные экологические и санитарные риски [3, 4].

Города южного Казахстана, такие как Туркестан и Кентау, расположены в аридной зоне с резко континентальным климатом, что сопровождается низкой влажностью воздуха и ограниченным выпадением осадков. Эти природно-климатические условия определяют характер почв, преобладание карбонатных щелочных типов (серозем и легкие каштановые почвы), низкое содержание органического вещества и высокую буферную способность [5, 6].

Особенности физико-химических свойств почв, такие как pH, содержание органического вещества, карбонатов и растворимых солей, играют ключевую роль в миграции, аккумуляции и биодоступности тяжелых металлов. Щелочные карбонатные почвы способствуют формированию устойчивых геохимических барьеров, ограничивающих подвижность металлов, однако локальные зоны техногенного воздействия могут создавать очаги повышенной концентрации [7, 8].

Туркестан – город с развивающейся инфраструктурой, значительной транспортной нагрузкой и активным строительством, где интенсивное движение транспорта и бытовая деятельность являются основными источниками загрязнения почв [2, 9]. В то же время Кентау имеет исторический профиль горнодобывающего и металлургического города, где остаточные загрязнения прошлых промышленных объектов влияют на современные уровни тяжелых металлов в почвах [6, 10].

Несмотря на актуальность проблемы, систематические данные о распределении тяжелых металлов в почвах этих городов отсутствуют, а влияние физико-химических параметров почв на их аккумуляцию изучено недостаточно. Получение таких данных является необходимым условием для оценки экологического состояния террито-

рий и разработки мер по снижению антропогенной нагрузки [3, 5, 7].

Цель настоящего исследования состоит в оценке пространственного распределения *Zn*, *Cd*, *Pb* и *Cu* в почвах городов Туркестан и Кентау, а также в изучении влияния физических и химических свойств почв на миграцию и аккумуляцию металлов. Для достижения цели были решены следующие задачи: отбор проб почвы в различных функциональных зонах, определение содержания металлов методом инверсионно-вольтамперометрического анализа, исследование физико-химических характеристик почв и статистическая обработка данных для выявления закономерностей загрязнения [1, 4, 8].

**Материалы и методы**

Объектом исследования являлись почвы урбанизированных территорий городов Туркестан и Кентау, расположенных в южной части Казахстана и характеризующихся аридными климатическими условиями и высокой антропогенной нагрузкой. Предметом исследования было содержание и пространственное распределение тяжелых металлов (*Zn*, *Cd*, *Pb* и *Cu*), а также физико-химические свойства почв, влияющие на их миграцию и аккумуляцию.

Мониторинговые исследования проводились в пределах функционально различных зон городов. Всего было заложено 14 точек отбора проб: 7 точек в городе Туркестан и 7 точек в городе Кентау, охватывающих жилые, придорожные, транспортные, коммунально-бытовые, промышленные зоны и территории техногенного воздействия. Для оценки естественного геохимического фона дополнительно были отобраны почвенные пробы на условно фоновой территории, удаленной от промышленных объектов и интенсивных транспортных потоков.

Отбор почвенных проб осуществлялся из верхнего горизонта (0–20 см) методом «конверта» в соответствии с общепринятыми требованиями экологического и геохимического мониторинга. Каждая интегральная проба формировалась путем смешивания не менее пяти точечных подпроб. Отобранные образцы высушивались при комнатной температуре, очищались от растительных остатков и механических примесей, после чего просеивались через сито с размером ячеек 1 мм.

Определение концентраций *Zn*, *Cd*, *Pb* и *Cu* проводилось методом инверсионно-вольтамперометрического анализа. Метод основан на предварительном электрохимическом накоплении определяемых элементов на рабочем электроде с последующей анодной разверткой потенциала.

Измерения выполнялись с использованием стандартной трехэлектродной системы, включающей рабочий электрод, вспомогательный электрод и электрод сравнения.

Физико-химические свойства почв, включая содержание органического вещества, углерода, подвижных форм фосфора и калия, pH водной вытяжки, общую минерализацию и ионный состав почвенного раствора ( $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ), определялись по стандартным методикам, принятым в почвенно-геохимических исследованиях.

Пространственный анализ распределения тяжелых металлов осуществлялся путем сопоставления concentra-

ций элементов между функциональными зонами городов и с фоновыми значениями.

**Результаты**

*Пространственное распределение тяжелых металлов в почвах городов Туркестан и Кентау*

Мониторинговые исследования охватывали 14 точек отбора проб: 7 – в пределах города Туркестан и 7 – в городе Кентау. Дополнительно были отобраны фоновые пробы на условно чистой территории за пределами городской застройки для оценки естественного уровня содержания тяжелых металлов.

*Содержание тяжелых металлов в почвах города Туркестан*

Результаты определения концентраций *Zn*, *Cd*, *Pb* и *Cu* в почвах различных функциональных зон города Туркестан представлены в таблице 1. Анализ данных показывает выраженную пространственную неоднородность распределения тяжелых металлов, обусловленную характером антропогенной нагрузки.

**Таблица 1**  
**Содержание тяжелых металлов в почвах города Туркестан**

**Кесте 1**  
**Түркістан қаласы топырағындағы ауыр металдар құрамы**

**Table 1**  
**Heavy metal content in soils of the city of Turkestan**

Характеристика точки	<i>Zn</i> (мг/кг)	<i>Cd</i> (мг/кг)	<i>Pb</i> (мг/кг)	<i>Cu</i> (мг/кг)
Жилая зона (малоэтажная застройка)	178	0,014	26	31.4
Придорожная территория (магистраль)	190	0.057	35	30.9
Жилая зона с рекреационной нагрузкой	206	0.028	33	43.9
Район интенсивного автотранспорта	235	0.089	48	58.1
Коммунально-бытовая зона	229	0.046	52	52.7
Территория вблизи промышленных объектов	254	0.219	69	63.3
Смешанная жилая и транспортная зона	243	0.182	57	60.9

Минимальные концентрации большинства исследованных элементов зафиксированы в жилой зоне с малоэтажной застройкой, где содержание *Zn* составляет 178 мг/кг, *Cd* – 0,014 мг/кг, *Pb* – 26 мг/кг, *Cu* – 31,4 мг/кг. Повышение концентраций отмечается в придорожных и транспортно-нагруженных зонах, что указывает на существенную роль

автомобильного транспорта как источника поступления **Pb**, **Cu** и **Zn** в почвы.

Наиболее высокие значения содержания всех металлов зарегистрированы на территории вблизи промышленных объектов: **Zn** – 254 мг/кг, **Cd** – 0,219 мг/кг, **Pb** – 69 мг/кг, **Cu** – 63,3 мг/кг. Коммунально-бытовая зона и районы интенсивного автотранспорта также характеризуются повышенными концентрациями **Pb** и **Cu**, что свидетельствует о комплексном воздействии техногенных факторов.

*Содержание тяжелых металлов в почвах города Кентау*

Данные по содержанию тяжелых металлов в почвах города Кентау приведены в таблице 2. В целом для исследуемой территории характерны более высокие концентрации **Zn**, **Cd**, **Pb** и **Cu** по сравнению с городом Туркестан, что связано с исторически сложившейся промышленной специализацией города.

**Таблица 2**  
**Содержание тяжелых металлов в почвах города Кентау**

**Кесте 2**  
**Кентау қаласы топырағындағы ауыр металдар құрамы**

**Table 2**  
**Heavy metal content in soils of the city of Kentau**

Характеристика точки	<b>Zn</b> (мг/кг)	<b>Cd</b> (мг/кг)	<b>Pb</b> (мг/кг)	<b>Cu</b> (мг/кг)
Жилая зона	212	0,155	47	51,1
Придорожная зона	259	0,241	85	58,7
Центральная часть города	228	0,298	63	49,5
Жилая зона	216	0,173	54	53,2
Промышленная зона (бывшие предприятия)	301	0,644	170	88,2
Территория техногенного воздействия	315	0,589	203	96,3
Промышленно-транспортный узел	296	0,537	191	74,9

Наименьшие значения зафиксированы в жилых зонах, однако даже здесь содержание **Cd** (0,155–0,173 мг/кг) и **Pb** (47–54 мг/кг) остается повышенным. Существенный рост концентраций всех металлов наблюдается в придорожной зоне и центральной части города, что отражает влияние транспортных потоков и плотной застройки.

Максимальные значения установлены в промышленной зоне бывших предприятий и на территории техногенного воздействия. В этих районах содержание **Zn** достигает 301–315 мг/кг, **Cd** – 0,589–0,644 мг/кг, **Pb** – 170–203 мг/кг, **Cu** – 88,2–96,3 мг/кг. Промышленно-транспортный узел также характеризуется высоким уровнем загрязнения, что указывает на устойчивый техногенный характер накопления металлов в почвенном покрове.

*Содержание тяжелых металлов в фоновых почвенных пробах*

Результаты определения содержания **Zn**, **Cd**, **Pb** и **Cu** в условно фоновых почвенных пробах представлены в таблице 3. Отбор проб осуществлялся в зонах, удаленных от прямого воздействия промышленных и транспортных источников загрязнения, что позволяет рассматривать полученные данные как региональный фон.

**Таблица 3**  
**Содержание тяжелых металлов в фоновых почвенных пробах**

**Кесте 3**  
**Фондық топырақ үлгілеріндегі ауыр металдар құрамы**

**Table 3**  
**Heavy metal content in background soil sample**

№	Характеристика точки	<b>Zn</b> (мг/кг)	<b>Cd</b> (мг/кг)	<b>Pb</b> (мг/кг)	<b>Cu</b> (мг/кг)
1	Условно фоновая зона	85	–	28.1	24.2
2	Условно фоновая зона	106	–	25.9	29.3
Среднее значение	–	95.5	–	27.0	26.7

Содержание цинка в фоновых почвах варьирует от 85 до 106 мг/кг, при среднем значении 95,5 мг/кг. Для свинца установлены значения 25,9–28,1 мг/кг, при среднем уровне 27,0 мг/кг, что соответствует естественному геохимическому фону исследуемой территории. Концентрации меди находятся в диапазоне 24,2–29,3 мг/кг, со средним значением 26,7 мг/кг.

Кадмий в анализируемых пробах не был зафиксирован аналитическим методом, что указывает на его содержание ниже предела обнаружения и подтверждает отсутствие значимого природного накопления данного элемента в фоновых почвах региона.

*Физико-химические и геохимические характеристики почв*

Физико-химические свойства почв городов Туркестан и Кентау, представленные в таблицах 4 и 5, отражают особенности почвенного покрова урбанизированных территорий аридной зоны.

Почвы города Туркестан характеризуются содержанием углерода 1,43% и органического вещества 2,8%, что указывает на умеренный уровень гумусированности. Реакция почвенного раствора слабощелочная – pH 8,0, что типично для карбонатных почв региона. Содержание доступного фосфора составляет 163,1 мг/кг, тогда как концентрация калия относительно низкая (3,08 мг/кг). Общая минерализация почвенного раствора незначительна и составляет 0,066%. Среди ионного состава преобладают бикарбонаты (0,019%), при низком содержании хлоридов (0,0016%) и сульфатов (< 0,072%). Концентрации кальция и магния составляют 0,046% и 0,059% соответственно.

**Таблица 4**  
**Физико-химические характеристики почв**  
**города Туркестан**

**Кесте 4**  
**Түркістан қаласы топырағының физика-химиялық**  
**сипаттамалары**

**Table 4**  
**Physicochemical characteristics of soils in the city**  
**of Turkestan**

Параметр	Значение
Углерод (C)	1,43 %
Органическое вещество	2,8%
Фосфор ( $P_2O_5$ ), доступный	163,1 мг/кг
Калий ( $K_2O$ ), доступный	3,08 мг/кг
pH (водный экстракт)	8,0
Общие растворенные вещества	0,066%
Аммонийный азот ( $NH_4^+$ )	0,012 мг/кг
Бикарбонаты	0,019%
Хлориды	0,0016%
Сульфаты	< 0,072%
Кальций	0,046%
Магний	0.059%

**Таблица 5**  
**Физико-химические характеристики почв**  
**города Кентау**

**Кесте 5**  
**Кентау қаласы топырағының физика-химиялық**  
**сипаттамалары**

**Table 5**  
**Physicochemical characteristics of soils in the city**  
**of Kentau**

Параметр	Значение
Углерод (C)	1,18%
Органическое вещество	2,1%
Фосфор ( $P_2O_5$ ), доступный	140,9 мг/кг
Калий ( $K_2O$ ), доступный	2,62 мг/кг
pH (водный экстракт)	8,5
Общие растворенные вещества	0,089%
Аммонийный азот ( $NH_4^+$ )	0,024 мг/кг
Бикарбонаты	0,029%
Хлориды	0,0040%
Сульфаты	< 0,093%
Кальций	0,079%
Магний	0,042%

Почвы города Кентау отличаются более выраженной щелочной реакцией среды (pH 8,5) и несколько пониженным содержанием углерода (1,18%) и органического вещества (2,1%) по сравнению с Туркестаном. Содержание доступного фосфора составляет 140,9 мг/кг, калия – 2,62 мг/кг. Общие растворенные вещества достигают

0,089%, что указывает на более высокую минерализацию почвенного раствора. Ионный состав характеризуется повышенным содержанием бикарбонатов (0,029%) и хлоридов (0,0040%), при относительно высоких концентрациях кальция (0,079%) и магния (0,042%).

**Обсуждение**

*Пространственное распределение и факторы аккумуляции тяжелых металлов в почвах урбанизированных территорий*

Анализ фоновых значений тяжелых металлов, представленных в таблице 4, позволяет охарактеризовать естественный геохимический фон исследуемой территории и использовать его в качестве базового уровня для оценки степени техногенного загрязнения урбанизированных почв городов Туркестан и Кентау. Полученные фоновые концентрации **Zn**, **Pb** и **Cu** соответствуют типичным значениям для почв аридных и полуаридных регионов Южного Казахстана, сформированных на карбонатных и лесовидных породах. Отсутствие кадмия в фоновых пробах свидетельствует о его преимущественно техногенном происхождении и подтверждает, что выявленные ранее повышенные концентрации **Cd** в городских почвах не обусловлены природными геохимическими факторами.

Сопоставление фоновых показателей с данными по городским территориям (таблицы 1 и 2) демонстрирует многократное превышение естественного уровня содержания тяжелых металлов, особенно **Zn**, **Pb** и **Cd** в промышленных и транспортных зонах. Так, среднее фоновое содержание **Zn** (95,5 мг/кг) существенно ниже концентраций, зафиксированных в почвах Кентау и Туркестана, что указывает на интенсивную аккумуляцию данного элемента в условиях урбанизации. Аналогичная тенденция характерна для **Pb** и **Cu**, содержание которых в городских почвах превышает фоновые значения в 2–6 раз в зависимости от функциональной зоны.

Сравнительный анализ пространственного распределения металлов показывает, что для города Туркестан характерен умеренный уровень загрязнения, при котором максимальные концентрации **Zn**, **Pb** и **Cu** приурочены к зонам интенсивного автотранспортного движения и локального промышленного воздействия. Это указывает на преимущественно современный характер поступления загрязняющих веществ, связанный с выбросами автотранспорта, износом шин и тормозных механизмов, а также деятельностью отдельных промышленных объектов. Относительно низкие концентрации **Cd** в большинстве функциональных зон Туркестана свидетельствуют об отсутствии мощных источников данного элемента и о вторичном, эпизодическом характере его поступления.

В отличие от Туркестана, почвы города Кентау характеризуются значительно более высокими концентрациями всех исследованных металлов, особенно **Cd** и **Pb**. Это отражает влияние длительного техногенного воздействия, связанного с исторической деятельностью горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. Высокие значения **Cd** и **Pb** в промышленной зоне и на территориях техногенного воздействия указывают на их устойчивую аккумуляцию в верхнем горизонте почв и ограниченную

способность почвенных экосистем к естественной самоочистке.

Наряду с источниками загрязнения важную роль в формировании пространственного распределения и форм нахождения тяжелых металлов играют физико-химические свойства почв (таблицы 5 и 6). Слабощелочная и щелочная реакция среды (рН 8,0–8,5), характерная для почв обоих городов, является ключевым фактором, определяющим поведение металлов. В таких условиях подвижность **Cd**, **Pb** и **Cu**, как правило, снижается за счет образования труднорастворимых карбонатных и гидроксидных форм, а также их сорбции на поверхности минеральных частиц. Однако при высоких уровнях загрязнения, особенно в Кентау, данный буферный эффект оказывается недостаточным для предотвращения накопления металлов в верхнем почвенном горизонте.

Содержание органического вещества в почвах Туркестана и Кентау (2,1–2,8%) способствует связыванию **Cu** и **Pb** в устойчивые органо-минеральные комплексы, снижая их миграционную способность. В то же время относительно более низкое содержание органического вещества в почвах Кентау может способствовать повышенной биодоступности и аккумуляции **Cd**, особенно в промышленных зонах города.

Повышенная минерализация почвенного раствора и более высокие концентрации бикарбонатов, кальция и хлоридов в почвах Кентау указывают на усиленное техногенное и литогенное влияние. С одной стороны, наличие значительных количеств кальция способствует коагуляции коллоидов и снижению миграции ряда металлов, с другой – повышенное содержание хлоридов может увеличивать подвижность **Cd** и **Zn** за счет образования растворимых комплексных соединений.

Общей закономерностью для обоих городов является увеличение содержания **Zn**, **Pb** и **Cu** в придорожных и транспортных зонах, что подтверждает ведущую роль автотранспорта как диффузного источника загрязнения в условиях урбанизированных территорий. При этом **Cd** демонстрирует более выраженную связь с промышленными зонами, особенно в Кентау, что позволяет рассматривать его как индикатор накопленного техногенного воздействия и экологического наследия прошлых промышленных периодов.

Таким образом, использование фоновых концентраций тяжелых металлов в сочетании с анализом физико-химических свойств почв подтверждает техногенную природу загрязнения почв городов Туркестан и Кентау. Полученные результаты создают основу для обоснованного расчета коэффициентов концентрации, индексов загрязнения и оценки экологических рисков, а также подчеркивают

необходимость дифференцированного подхода к мониторингу и восстановлению почвенных экосистем: для Туркестана – за счет снижения транспортной нагрузки и контроля локальных источников загрязнения, для Кентау – посредством приоритетной ремедиации территорий бывших промышленных объектов и зон накопленного экологического ущерба.

### Заключение

В результате проведенных мониторинговых исследований установлены закономерности пространственного распределения и аккумуляции тяжелых металлов (**Zn**, **Cd**, **Pb** и **Cu**) в почвах городов Туркестан и Кентау. Показано, что уровень загрязнения и характер распределения металлов существенно различаются в зависимости от функционального зонирования и истории техногенного воздействия.

Для города Туркестан характерен умеренный уровень загрязнения почв, при котором максимальные концентрации **Zn**, **Pb** и **Cu** приурочены к зонам интенсивного автотранспортного движения и локального промышленного влияния. Низкие концентрации **Cd** в большинстве функциональных зон указывают на отсутствие значимых источников данного элемента и преимущественно вторичный характер его поступления.

Почвы города Кентау характеризуются значительно более высокими концентрациями всех исследованных металлов, особенно **Cd** и **Pb**, что отражает влияние длительного техногенного воздействия, связанного с деятельностью горнодобывающих и перерабатывающих предприятий в прошлом. Высокие уровни загрязнения в промышленных зонах и на территориях техногенного воздействия свидетельствуют о накопленном экологическом ущербе и ограниченной способности почв к естественной самоочистке.

Установлено, что слабощелочная и щелочная реакция среды, содержание органического вещества и ионный состав почвенного раствора оказывают существенное влияние на миграцию и формы нахождения тяжелых металлов. При этом в условиях высокой минерализации и повышенного содержания хлоридов, характерных для почв Кентау, возрастает потенциальная подвижность **Cd** и **Zn**.

Полученные результаты подтверждают техногенную природу загрязнения почв исследуемых городов и подчеркивают необходимость дифференцированного подхода к экологическому мониторингу и управлению качеством почв: для Туркестана – с акцентом на снижение транспортной нагрузки, для Кентау – на приоритетную ремедиацию территорий бывших промышленных объектов и зон накопленного экологического ущерба.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гончаров Г., Соктоев Б., Фархутдинов И., Матвеев И. (15 сентября 2024 г.). Тяжелые металлы в городской почве: уровни загрязнения, пространственное распределение и оценка риска для здоровья человека (на примере города Уфа, Россия). *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119216> (на английском языке)
2. Фиторемедиация загрязненных городских почв, насыпанных тяжелыми металлами / Еликбаев Б. [и др.] // *Eurasian Journal of Soil Science*. 2024. № 13 (4). С. 348–357 (на английском языке)
3. Шуя Тан, Чуньхуэй Ван, Цзин Сонг, Стэнли Чуквемека Ихенету, Ганг Ли. (Январь 2024 г.). Достижения в изучении тяжелых металлов в городской почве: библиометрический анализ. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16020860> (на английском языке)

4. Чайыр Г., Рухани А., Аль Соуки К.С., Блажалек Л., Ньютон Р.А., Шюкюр Ф.З., Пидлиснюк В. (24 ноября 2025 г.). Загрязнение городской почвы в Турции: обзор потенциально токсичных элементов, полициклических ароматических углеводородов и микропластика в крупных городах. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14834-5> (на английском языке)
5. Систематический обзор и характеристика основных угроз для городской почвы в Европейском Союзе / Биннер Х. [и др.] // *Water Air Soil Pollution*. 2024. Т. 235. № 494. С. 1–16 (на английском языке)
6. Оценка загрязнения почв Западно-Казахстанской области тяжелыми металлами в результате промышленной деятельности / Какымжанов Ю.К. [и др.] // *Новости Национальной Академии Наук Республики Казахстан. Серия Геологические и Технические Науки*. 2025. Т. 1. № 469. С. 72–90 (на английском языке)
7. Елич И., Топалович Д., Райкович М., Йовашевич Д., Павичевич К., Янкович М., Шливич-Иванович М. (9 октября 2025 г.). Оценка концентраций тяжелых металлов в городской почве Нови-Сада: корреляционный анализ и потенциал вымывания. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app151910842> (на английском языке)
8. Влияние расширения города на загрязнение почв тяжелыми металлами: сравнение новых и старых городских кварталов / Хонглин Лю [и др.] // *Ecological Frontiers*. 2025. Т. 45. № 5. С. 1407–1418 (на английском языке)
9. Мхонза Н.П., Зондо С., Вилакази С. Распределение токсичных тяжелых металлов в городских почвах Африки: систематический обзор // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2026. Т. 198. № 205. С. 1–29 (на английском языке)
10. Потенциальное влияние урбанизации на аккумуляцию тяжелых металлов в поверхностных почвах быстро развивающихся городов / Зандыбай А. [и др.] // *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2025. № 11 (4). С. 1547–1566 (на английском языке)

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Гончаров Г., Соктоев Б., Фархутдинов И., Матвеев И. (2024 жылғы 15 қыркүйек). Қалалық топырақтағы ауыр металдар: ластану деңгейлері, кеңістіктік таралуы және адам денсаулығына қауіп бағалау (Ресей, Уфа қаласы мысалында). *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119216> (ағылшын тілінде)
2. Ауыр металдармен ластанған қалалық топырақтарды фиторемедиациялау / Елікбаев Б. [және т. б.] // *Eurasian Journal of Soil Science*. 2024. № 13 (4). Б. 348–357 (ағылшын тілінде)
3. Шуя Тан, Чуньхуэй Ван, Цзин Сонг, Стэнли Чуквумека Ихенету, Ганг Ли. (Қаңтар 2024). Қалалық топырақтағы ауыр металдарды зерттеудегі жетістіктер: библиометриялық талдау. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16020860> (ағылшын тілінде)
4. Чайыр Г., Рухани А., Аль Соуки К.С., Блажалек Л., Ньютон Р.А., Шюкюр Ф.З., Пидлиснюк В. (24 қараша, 2025). Түркиядағы қалалық топырақтың ластануы: негізгі токсикалық элементтер, полицикликалық ароматикалық көмірсутектер және микропластиктер жөніндегі шолу. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14834-5> (ағылшын тілінде)
5. Еуропалық Одақтағы қалалық топыраққа ең үлкен қауіп төндіретін факторларды жүйелі шолу және сипаттау / Биннер Х. [және т. б.] // *Water Air Soil Pollution*. 2024. Т. 235. № 494. Б. 1–16 (ағылшын тілінде)
6. Батыс Қазақстан облысының топырақтарының өнеркәсіптік қызмет нәтижесінде ауыр металдармен ластануын бағалау / Қакимжанов Ю.К. [және т. б.] // *Қазақстан Республикасы Ұлттық Ғылым Академиясының Хабарлары. Геологиялық-Техникалық Ғылымдар сериясы*. 2025. Т. 1. № 469. Б. 72–90 (ағылшын тілінде)
7. Елич И., Топалович Д., Райкович М., Йовашевич Д., Павичевич К., Янкович М., Шливич-Иванович М. (9 қазан 2025). Нови-Сад қаласындағы қалалық топырақтағы ауыр металдардың концентрациясын бағалау: корреляциялық талдау және жуылу әлеуеті. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app151910842> (ағылшын тілінде)
8. Қалалық кеңеюдің топырақтағы ауыр металдармен ластануға әсері: жаңа және ескі қалалық блоктарды салыстыру / Хонглин Лю [және т. б.] // *Ecological Frontiers*. 2025. Т. 45. № 5. Б. 1407–1418 (ағылшын тілінде)
9. Мхонза Н.П., Зондо С., Вилакази С. Африканың қалалық топырақтарындағы токсикалық ауыр металдардың таралуы: жүйелі шолу // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2026. Т. 198. № 205. Б. 1–29 (ағылшын тілінде)
10. Қалалардың жылдам урбанизациясы жағдайында жер бетіндегі топырақтардағы ауыр металдардың жиналуына қалалық құрылыс ықтимал әсері / Зандыбай А. [және т. б.] // *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2025. № 11(4). Б. 1547–1566 (ағылшын тілінде)

## REFERENCES

1. Goncharov G., Soktoev B., Farkhutdinov I., Matveenko I. (September 15, 2024). Heavy metals in urban soil: Contamination levels, spatial distribution and human health risk assessment (the case of Ufa city, Russia). *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119216> (in English)
2. Phytoremediation of contaminated urban soils spiked with heavy metals / Yelikbayev B. [et al.] // *Eurasian J. Soil Sci.* 2024. No. 13 (4). 348–357 pp. (in English)
3. Shuya Tang, Chunhui Wang, Jing Song, Stanley Chukwumeka Ihenetu, Gang Li. (January 2024). *Advances in Studies on Heavy Metals in Urban Soil: A Bibliometric Analysis*. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16020860> (in English)
4. Chaiyr G., Rouhani A., Al Souki K.S., Blazhalek L., Newton R.A., Shyukur N.F., Pidlisnyuk Z.V. (November 24, 2025). Urban soil pollution in Türkiye: a review of potentially toxic elements, polycyclic aromatic hydrocarbons, and microplastics in major cities. *Environ Monit Assess*. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14834-5> (in English)
5. A Systematic Review and Characterization of the Major and Most Studied Urban Soil Threats in the European Union Binner H. [et al.] // *Water Air Soil Pollut.* 2024. V. 235. No. 494. 1–16 (in English)
6. Assessment of Soil Contamination of the West Kazakhstan Region with Heavy Metals as a Result of Industrial Activity / Kakimzhanov Y.K. [et al.] // *News Natl. Acad. Sci. Repub. Kazakhstan Ser. Geol. Tech. Sci.* 2025. V. 1. No. 469. 72–90 pp. (in English)
7. Yelich I., Topalovich D., Raikovich M., Jovashevich D., Pavichevich K., Yankovich M. M. V. Lomonosov. (October 9, 2025). Assessment of Heavy Metal Concentrations in Urban Soil of Novi Sad: Correlation Analysis and Leaching Potential. *Appl. Sci*. <https://doi.org/10.3390/app151910842> (in English)
8. Impact of urban expansion on soil heavy metal pollution: A comparison of new and old urban blocks / Honglin Liu [et al.] // *Ecological Frontiers*. 2025. V. 45. No. 5. 1407–1418 pp. (in English)
9. Mkhonza N.P., Zondo S., Vilakazi S. Toxic heavy metals distribution in urban soils of Africa: a systematic review // *Environ Monit Assess*. 2026. V. 198. No. 205. 1–29 pp. (in English)
10. Potential impact of urbanization on heavy metals accumulation in surface soils of rapidly urbanizing cities / Zandybay A. [et al.] // *Global J. Environ. Sci. Manage.* 2025. No. 11 (4). 1547–1566 pp. (in English)

## Сведения об авторах:

**Сунакбаева Д.К.**, к.т.н., Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан), [dilara.sunakbayeva@ayu.edu.kz](mailto:dilara.sunakbayeva@ayu.edu.kz); <https://orcid.org/0009-0006-3727-4891>

**Юлдашбек Д.Х.**, магистр химии, ст. научный сотрудник НИИ «Экология», Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан), [davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz](mailto:davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz); <https://orcid.org/0000-0001-9342-7502>

**Айтекова К.У.**, к.т.н., ассистент профессора, Международный Таразский университет им. Шерхана Муртазы (г. Тараз, Казахстан), [Aytekova1972@mail.ru](mailto:Aytekova1972@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8439-944X>

**Омирзак Н.Ш.**, магистр сельскохозяйственных наук, ассистент, Международный Таразский университет им. Шерхана Муртазы (г. Тараз, Казахстан), [mr.n\\_01@mail.ru](mailto:mr.n_01@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0006-8419-7016>

## Авторлар туралы мәліметтер:

**Сунакбаева Д.К.**, т.ғ.к., Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)

**Юлдашбек Д.Х.**, химия магистрі, «Экология» ҒЗИ-ның аға ғылыми қызметкері, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)

**Айтекова К.У.**, т.ғ.к., профессордың ассистенті, Шерхан Мұртаза атындағы Халықаралық Тараз университеті (Тараз қ., Қазақстан)

**Өмірзақ Н.Ш.**, ауыл шаруашылығы ғылымдарының магистрі, ассистент, Шерхан Мұртаза атындағы Халықаралық Тараз университеті (Тараз қ., Қазақстан)

## Information about the authors:

**Sunakbaeva D.K.**, candidate of technical sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan)

**Yuldashbek D.Kh.**, Master of Chemistry, Senior Researcher of the Research Institute «Ecology», Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan)

**Aitekova K.U.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Sherkhan Murtaza International Taraz University (Taraz, Kazakhstan)

**Omirzak N.Sh.**, Master of Agricultural Sciences, Assistant, Sherkhan Murtaza International Taraz University (Taraz, Kazakhstan)

Код МРНТИ 38.01.09

А.Б. Байбатша, Б.Б. Амралинова, А. Нухулы, \*К.С. Тогизов  
*<sup>1</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет  
 им. К.И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)*

## НАСЛЕДИЕ АКАДЕМИКА К.И. САТПАЕВА – ЯРКИЙ ВКЛАД В НАУКУ КАЗАХСТАНА И ПРИМЕР ДЛЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

**Аннотация.** В 2024 году Казахстан широко отметил 125-летие академика Каныша Имантаевича Сатпаева, гениального ученого, крупного государственного деятеля и большого патриота своего народа. Его жизнь и деятельность – яркий пример для молодого поколения, работников науки и производства. Уже в студенческие годы раскрылась сила творческого воображения Каныша Сатпаева, которая получила развитие на производстве и полной мере проявилась в годы создания и руководства Академией наук Казахстана. Каныш Сатпаев оставил казахскому народу великое наследие: крупные месторождения полезных ископаемых, новые отрасли экономики, которые заложили основу современной промышленности Казахстана. Благодаря усилиям Сатпаева были воспитаны целые поколения ученых, инженеров и специалистов, внесших значительный вклад в экономику страны, освоение природных ресурсов и развитие инновационных технологий.

**Ключевые слова:** наследие Сатпаева, науки Казахстана, геология, полезные ископаемые, металлогения, инженерное образование.

### Академик Қ.И. Сәтбаевтың мұрасы – Қазақстан ғылымына қосқан жарқын үлес және жас ғалымдарға үлгі

**Аңдатпа.** 2024 жылы Қазақстан академик Қаныш Имантайұлы Сәтбаевтың 125 жылдық мерейтойын кеңінен атап өтті. Ол – өз халқының ұлы патриоты, аса көрнекті ғалым және ірі мемлекет қайраткері. Оның өмірі мен қызметі – жас ұрпаққа, ғылым мен өндіріс қызметкерлеріне үлгі боларлық жарқын мысал. Қаныш Сәтбаевтың шығармашылық қиялының қуаты студенттік жылдарында-ақ байқалып, кейін өндірісте дамып, әсіресе Қазақстан Ғылым академиясын құру және басқару кезеңінде толық көрініс тапты. Қаныш Сәтбаев қазақ халқына ұлы мұра қалдырды: пайдалы қазбалардың ірі кен орындары, жаңа экономикалық салалар – қазіргі Қазақстан өнеркәсібінің іргетасы. Сәтбаевтың қажырлы еңбегінің арқасында ел экономикасының дамуына, табиғи ресурстарды игеруге және инновациялық технологияларды дамытуға зор үлес қосқан тұтас ғалымдар, инженерлер мен мамандар буыны тәрбиеленді.

**Түйінді сөздер:** Сәтбаев мұрасы, Қазақстан ғылымы, геология, пайдалы қазбалар, металлогения, инженерлік білім.

### The legacy of academician K.I. Satpayev – a bright contribution to Kazakhstan’s science and an example for young researchers

**Abstract.** In 2024, Kazakhstan widely celebrated the 125th anniversary of academician Kanysh Imantaevich Satpayev – a brilliant scientist, prominent statesman, and true patriot of his people. His life and work serve as a vivid example for the younger generation, as well as for professionals in science and industry. The strength of Satpayev’s creative imagination was revealed during his student years, further developed in production, and fully manifested during the establishment and leadership of the Academy of Sciences of Kazakhstan. Kanysh Satpayev left a great legacy to the Kazakh people: major mineral deposits and new sectors of the economy that laid the foundation for modern Kazakhstan’s industry. Thanks to Satpayev’s efforts, entire generations of scientists, engineers, and specialists were educated – those who made a significant contribution to the country’s economy, the development of natural resources, and innovative technologies.

**Key words:** Satpayev’s legacy, science of Kazakhstan, geology, mineral resources, metallogeny, engineering education.

### Введение

На юбилейной сессии Национальной Академии наук Глава государства Касым-Жомарт Токаев призвал ученых ставить перед собой высокие цели, стремиться к новаторству и повышать эффективность работы. В XXI веке по словам Президента РК сила и мощь государства измеряются его научно-техническими достижениями, и в этой миссии значимая роль отведена университету, который с гордостью носит имя Каныша Сатпаева: «Это единственный национальный исследовательский технический университет, флагман технического образования Казахстана. Поэтому он должен стать научно-производственной базой для новых технических вузов. Необходимо утвердить программу развития главного технического университета страны и создать на его базе научно-исследовательский хаб новых технологий в инженерном образовании и науке», – сказал Глава государства на встрече с учеными.

В 2024 году Казахстан широко отметил 125-летие академика Каныша Имантаевича Сатпаева, гениального ученого, крупного государственного деятеля и большого патриота своего народа. Академик К.И. Сатпаев внес неоценимый вклад в развитие геологии, горно-металлургического сектора экономики, а также в другие направления науки и культуры Казахстана [1–11].

### Творческое и производственное наследие

Студент Каныш (1921–1926 гг.) не просто учился и жадно поглощал знания, которые давали его учителя в стенах Томского технологического института (ныне фе-

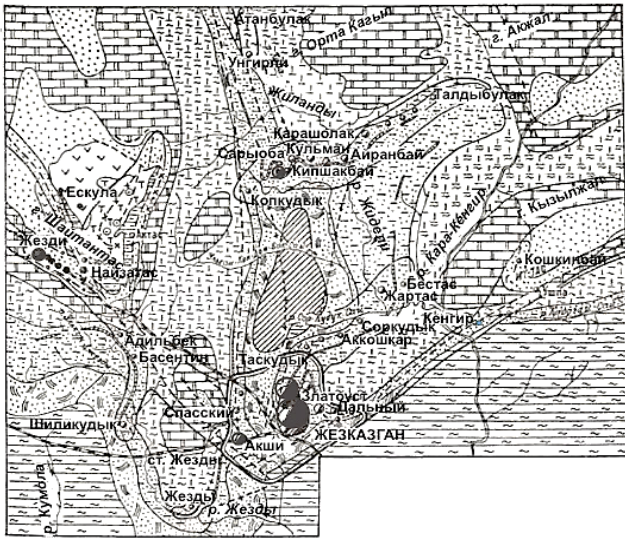
деральный Томский политехнический университет Российской Федерации – ТПУ), особенно лекции профессора М.А. Усова по курсу «Геология месторождений полезных ископаемых». Для парня, прибывшего из казахской степи, учеба на русском языке было не простым делом. Тем не менее, он быстро адаптировался к новой жизни, освоил русский язык и стал преуспевающим студентом. Каныш стремительно ворвался в бурлящую студенческую жизнь. Он занимался большой общественной работой, изучением исторических традиций народов Сибири, продвижением добрых традиций и культуры казахского народа, возглавляя общественные и культурные студенческие кружки. Уже на втором курсе учебы он продолжил работу над учебником по «Алгебре» на казахском языке, основную часть которого завершил в течение двух лет. Еще два года он перерабатывал этот учебник, приводил в соответствие к требованиям издательства.

Необходимо отметить, что на такой ответственный труд его наставил первый выпускник ТПУ горный инженер-геолог Алимхан Ермеков, который впоследствии стал первым профессором математики среди казахов, крупным государственным и общественным деятелем [1]. Именно он отстаивал территориальную целостность Казахстана в составе СССР в интересах казахского народа.

Учебник «Алгебра» является первым кондиционным пособием, написанным на казахском языке и имеющим большую ценность и в настоящее время [2].

Инженер-геолог Каныш Сатпаев (1927–1941 гг.) провел гигантскую геологическую работу в Жезказган-Улытау-

ском районе по геологической оценке известных месторождений и открытию новых источников минерального сырья. Как результат Жезказганское медное месторождение стало уникальным по запасам и минералогии руд, которое занимало первое место среди республик СССР и третье – в мире. Прогнозная карта Жезказганского рудного района, составленная К.И. Сатпаевым, имеет большое значение и в настоящее время для постановки геологоразведочных работ (рис. 1).



**Рис. 1. Обзорная прогнозная карта Жезказганского рудного района [2].**

**Сурет 1. Жезказган кенді ауданының шолулық болжам картасы [2].**

**Figure 1. Overview forecast map of the Zhezkazgan ore district [2].**

Жезказганское месторождение было известно издревле. Сведения о первой плавке меди из руд месторождения еще 3–4 тысячи лет назад установил известный археолог академик Алькей Маргулан. Слава о месторождении вышла далеко за казахскую степь и привлекала к себе внимание дальних стран. По такой причине одна ветвь Великого Шелкового пути проходила через Жезказганское месторождение и богатые медные руды, которые выходили на поверхность земли: обильные крупные куски самородной меди и серебра, прекрасные ювелирные минералы, как малахит и азурит, купцы охотно перевозили в страны Запада и Востока.

В литературе официальные сведения о Жезказгане отмечены в «Дневных записках» русского географа капитана Рычкова, прибывшего сюда по особому заданию в 1771 году. На основе этих сведений 10 ноября 1847 года Жезказган впервые заявлен предпринимателем Н.А. Ушаковым. Наследники Ушакова в 1906 году передали Жезказган в аренду английскому концессионеру «Обществу атбасарских медных руд», которое до 1915 года вело интенсивные геологоразведочные работы, начали разработку месторождения и плавил медь на Карсакапайском заводе. В 1919 году концессионеры убежали. На завод привозили богатую руду с содержанием меди более 10%. Такие бога-

тые руды залежали на поверхности, на небольшой глубине в зоне вторичного сульфидного обогащения. По данным английских геологов богатые руды исчерпывались уже на небольшой глубине, и на этом основании они сделали заключение об ограниченности общих запасов руд месторождения. Такую же оценку месторождения дали и русские геологи. Когда была установлена Советская власть, полагаясь на ошибочные сведения, Жезказганское месторождение отнесли к малоперспективным для освоения, тем более, что оно находилось в не обжитой и бездорожной степи Бетпақдала.

В геологической среде бытует простонародное выражение «обладать нюхом», т. е. природной интуицией, и она помогала геологам в открытии скрытых месторождений на глубине. К.И. Сатпаев обладал именно таким природным даром, что вкупе с хорошим знанием геологии помогало ему предвидеть залегание рудных тел на больших глубинах. Такой прогноз перспектив месторождения был сделан, когда геолог Каныш Сатпаев исследовал материалы, полученные при изучении геологического строения, и изучил глубинную структуру месторождения. Первые пробуренные разведочные скважины на глубину, примитивным даже для того времени станком, дали данные, подтверждающие прогнозы Каныша Сатпаева. Действительно, основные рудные богатства Жезказганского месторождения располагались на глубине от поверхности. После детального изучения геологического строения и особенностей оруденения Жезказганского месторождения, он выдвинул научную гипотезу о гидротермальном происхождении стратиформных месторождений типа медистых песчаников. Эта гипотеза вызвала оживленное обсуждение в научных кругах геологов, получив как критические, так и одобрительные отклики. В наши дни, благодаря изучению глубинных участков недр современными геофизическими методами, подтверждена гипотеза К.И. Сатпаева о формировании месторождения из гидротермальных растворов, выделившихся из расположенной на глубине гранитодной интрузии. Эта гипотеза помогала направленному ведению поисковых работ для открытия новых месторождений рудного района.

Производственным кредо К.И. Сатпаева была комплексность проводимых работ, что являлось весьма важным во всех направлениях изучения месторождения, вещественного состава руд и переделе минерального сырья. Так, при полевых геологических работах он разведывал не только меднорудные месторождения, что было его утвержденным геологическим заданием, но и внимательно изучал сопутствующие минералы и геологические особенности территории, выявляя потенциальные месторождения редкоземельных и благородных металлов. Комплексно изучая район, он выявил множество месторождений других металлов, например, среди них Жездинское марганцевое месторождение. Это месторождение сыграло судьбоносную роль в годы Второй мировой войны. В основу стратегии блицкрига фашистской Германии был положен быстрый захват марганцевых месторождений Никополя и Чиатури в европейской части СССР, и тем самым отрезать Уральские металлургические заводы от поставки марганцевого сырья и остановить выпуск бронетехники, без которой

невозможно вести войну. Быстрое освоение Жездинского месторождения и создание марганцевого рудника за рекордно короткий срок для поставки сырья на уральские заводы обеспечило бесперебойное производство необходимой военной техники. За это открытие и трудовые подвиги К.И. Сатпаев был отмечен высшей наградой – орденом Ленина (в то время звания Героя давали только за боевые подвиги). Комплексная оценка состава руд и комплексное извлечение из них всех полезных компонентов при переделе всегда были под контролем К.И. Сатпаева. Позже комплексное изучение недр стало основной статьей Инструкции – нормативного документа для проведения геологоразведочных работ на территории СССР.

Он доказал, что Жезказганское месторождение является уникальным по запасам медных руд. Однако невозможно было построить на его базе крупный перерабатывающий комбинат – требовалось создать соответствующую инфраструктуру и логистику. Для решения этой проблемы К.И. Сатпаев сделал точные расчеты и схему реализации проекта по строительству Жезказганского горно-металлургического комбината производительностью более 200 тыс. тонн меди в год и прокладке железной дороги для доставки стройматериалов на гигант-комбинат и вывоза продукции потребителям. Были предложены три варианта строительства железной дороги с расчетами, из которых был выбран маршрут Жезказган – Жарык, соединивший Жезказган с магистральной линией Караганда – Балхаш. Для обеспечения комбината с водой было построено водохранилище на р. Каракенгир.

Как мы видим из анализа производственной геологической деятельности инженера К.И. Сатпаева, длительная работа и опыт на производстве стали для него прекрасной школой, где он приобрел важные качества в решении важных экономических задач, что впоследствии определило направление научной деятельности первого академика Казахстана.

### Научное наследие

Академик Каныш Имантаевич Сатпаев (1941–1964 гг.) является общепризнанным ученым и государственным деятелем. Он в 1942 году издал монографию «Рудные месторождения Жезказганского района Казахской ССР», где были обобщены материалы, полученные в результате полевых геологоразведочных работ, которая была признана значительным вкладом в науку и удостоена Государственной премии СССР. Ведущие ученые и академики АН СССР дали этой работе высокую научную оценку, и в том же 1942 году, за выдающиеся достижения в исследованиях, организацию научной деятельности и значительный вклад в науку, ему была присуждена ученая степень доктора геолого-минералогических наук, без защиты диссертации.

В 1946 году К.И. Сатпаев был избран действительным членом Академии наук СССР, первым из ученых не только Казахстана, а также советских республик Центральной Азии.

Во время руководства Академией наук, он мобилизовал ученых для решения важнейших экономических задач по своим направлениям. Например, для обеспечения

населения крупных промышленных центров, таких как Жезказган и Караганда сельхозпродуктами быстро и на месте – нужна вода. В засушливом регионе Центрального Казахстана выходом из этого положения могло стать строительство канала Иртыш – Караганда с дальнейшим продлением его до Жезказгана. Сатпаев дал поручения ученым-геологам (для геологического обеспечения выбора маршрута прокладки канала), аграриям (для рационального использования воды и создания соответствующих хозяйств) и энергетикам (для обеспечения энергией). В итоге этот канал был построен и сейчас носит имя К.И. Сатпаева, автора идеи и проекта.

Глава государства Касым-Жомарт Токаев на встрече с недропользователями отметил, что «следует качественно восполнять запасы минерального сырья путем усиления геологоразведочных работ». Советское правительство рассматривало Казахстан в основном как источник сырья для промышленности. Поэтому на открытие новых природных источников минерального сырья и пополнение его запасов денег не жалели. Проводить наугад геологические работы на территории Казахстана, занимающей девятое место в мире, невозможно. Для этого предварительно нужно проводить большую работу по научно обоснованному прогнозированию перспективных площадей для постановки целенаправленных поисковых работ. Необходимы всесторонний и глубокий анализ накопленных геологических данных, организация ревизионных геологических маршрутов, высокоточные лабораторные исследования и графическое моделирование. С этой целью К.И. Сатпаев сформировал аналитическую группу ученых-геологов, привлек все геологические организации республики, которые развернули работу по металлогении. В основе металлогенических исследований лежали принципы и методы составления прогнозных металлогенических карт, четко сформулированные К.И. Сатпаевым. Разработанный им комплексный метод металлогенического анализа, использование положений по вопросам теории рудообразования и прогноза месторождений полезных ископаемых помогают геологам и сегодня проводить работу для исполнения поручения Главы государства.

В 1953 году удалось выполнить громадную работу по сбору и обработке материалов по Центральному Казахстану. В 1954 г. было завершено составление рабочих макетов и систематизированных прогнозных металлогенических карт. Результаты этих работ стали теоретическим обоснованием металлогении Казахстана, позволили выявить основные этапы рудообразования и закономерности размещения месторождений на изученной территории. В 1958 году за составление прогнозно-металлогенических карт Центрального Казахстана группа казахстанских ученых-геологов во главе с К.И. Сатпаевым, куда входили ученые Казахского горно-металлургического института (ныне КазНУ имени К.И. Сатпаева), была удостоена Ленинской премии. Академика К.И. Сатпаева по праву называют одним из создателей металлогенической науки и родоначальником этого направления геологии в Казахстане.

Академик Сатпаев уделял большое внимание развитию агропромышленного комплекса, селекции новых

сортов высокоурожайных культур и продуктивных пород скота для обеспечения населения овощами и другими продуктами питания. Вокруг Жезказгана были созданы хозяйства по обеспечению жителей местными овощами, и они успешно работали. Организовал питомники и ботанические сады для селекции местных засухоустойчивых видов растений. Например, такой ботанический сад и опытный питомник были созданы в Жезказгане, а чаеразведения в Бостандыке (сейчас этот район на территории Узбекистана).

Эффективное освоение сельхозугодий республики и повышение урожайности культур прежде всего зависят от обеспечения поливной водой и использования минеральных удобрений. Для водоснабжения был разработан уникальный проект, связанный со строительством канала Иртыш – Караганда, который после реализации обеспечил получение ожидаемых результатов. Как писал академик: «Казахстан располагает практически неисчерпаемыми сырьевыми источниками для производства фосфорных удобрений. Прежде всего, это богатейшие фосфориты Каратау, расположенные на юге республики. Каратауский бассейн по запасам и качеству сырья относится к крупнейшим фосфоритным месторождениям мира». Геологами были подсчитаны и утверждены громадные запасы фосфоритов месторождений Каратауского бассейна. Учеными Академии наук была разработана технология переработки этих фосфоритов, которые народ назвал «камнем плодородия» и стали ценнейшим химическим сырьем. Продукты из фосфоритов Каратау обеспечивали фосфорным удобрением не только сельское хозяйство Казахстана, а также другие республики и страны [2–11].

### Заключение

К.И. Сатпаев обсуждал и составлял научные проекты, опережающие время. Предвидя будущее, работал над использованием для развития энергосистемы с использованием нефти и природного газа, ветра и энергии солнца, урана для атомной энергии в мирных целях.

После организации Академии наук он практиковал выездные сессии в различных регионах Казахстана, что обе-

спечивало привлечение местных ученых, производственников и населения для обсуждения важных научных и экономических вопросов. Так, очередная выездная сессия Академии наук состоялась 25–30 января 1949 г. в г. Гурьеве (ныне Атырау) для обсуждения вопросов использования нефти и природного газа региона. В то время такой вопрос еще остро не стоял. Лишь через 10–15 лет после этой выездной сессии стала бурно развиваться нефтегазовая отрасль, началась подготовка кадров для этой отрасли, использования нефтепродуктов и природного газа. Сейчас эта отрасль в экономике Казахстана стала ведущей.

В Академии наук обсуждались вопросы использования энергии урана и развития этой отрасли. Позже, в 1970-ые годы были проведены масштабные геологоразведочные работы по открытию новых технологичных месторождений урана. Эти работы обеспечили развитие урановой промышленности. Сейчас Казахстан занимает первое место в мире по производству уранового сырья. В настоящее время использование ветра и солнечных лучей как возобновляемых источников энергии стало очевидным фактом. Работающие ветряки и солнечные панели стали давать все больше энергии. Правительством принято решение продолжить развитие «зеленой энергетики».

Наследие К.И. Сатпаева не ограничивается неизмеримыми производственными достижениями в экономике, гигантским вкладом в науку. Его труды по сохранению и продвижению культуры и языка своего народа можно оценить как высший патриотизм.

Яркая креативная жизнь студента Каныша, колоссальные производственные успехи инженера Каныша Сатпаева и выдающийся вклад в науку академика АН СССР, президента АН КазССР Каныша Имантаевича Сатпаева дают право называть его гением века.

### Благодарность

*Данная статья финансировалась Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме BR24992920 «Исследование научно-культурного наследия академика К.И. Сатпаева – путь к развитию научных школ Казахстана».*

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лозовский И.Т., Сипайлов Г.А. *Студенческие годы Каныша Сатпаева в Томске: биографический очерк. 2-е издание. Томск: ТПУ, 2019. 136 с. (на русском языке)*
2. Сатпаев К.И. *Алгебра: Алматы: КазННТУ, 2024. Т.10. 559 с. (на казахском языке)*
3. Сатпаев К.И. *Природные богатства Казахстана: Алматы: КазННТУ, 2024. Т. 1. 339 с. (на казахском языке)*
4. Сатпаев К.И. *Большой Жезказган: Алматы: КазННТУ, 2024. Т. 2. 509 с. (на русском языке)*
5. Сатпаев К.И. *Минеральные ресурсы Казахстана: черные металлы: Алматы: КазННТУ, 2024. Т. 3. 365 с. (на русском языке)*
6. Сатпаев К.И. *Минеральные ресурсы Казахстана: цветные металлы: Алматы: КазННТУ, 2024. Т. 4. 330 с. (на русском языке)*
7. Сатпаев К.И. *Геологическое изучение недр Казахстана: Металлогения: Алматы: КазННТУ, 2024. Т. 5. 463 с. (на русском языке)*
8. Сатпаев К.И. *Наука Казахстана: 1941–1951 гг.: Алматы: КазННТУ, 2024. Т. 6. 368 с. (на русском языке)*
9. Сатпаев К.И. *Наука Казахстана: 1955–1963 гг.: Алматы: КазННТУ, 2024. Т. 7. 509 б. (на русском языке)*
10. Сатпаев К.И. *Научно-популярные и общественно-политические статьи, выступления: Алматы: КазННТУ, 2024. Т. 8. 309 с. (на русском языке)*
11. Сатпаев К.И. *Публицистика. Материалы к библиографии: Алматы: КазННТУ, 2024. Т. 9. 378 с. (на русском языке)*

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Лозовский И.Т., Сипайлов Г.А. Қаныш Сәтбаевтың Томскідегі студенттік жылдары: биографиялық очерк. 2-басылым. Томск: ТПУ, 2019. 136 б. (орыс тілінде)
2. Сәтбаев Қ.И. Алгебра: Алматы: ҚазҰТЗУ, 2024. Т. 10. 559 б. (қазақ тілінде)
3. Сәтбаев Қ.И. Қазақстанның табиғи байлықтары: Алматы: ҚазҰТЗУ, 2024. Т. 1. 339 б. (қазақ тілінде)
4. Сәтбаев Қ.И. Үлкен Жезқазған: Алматы: ҚазННТУ, 2024. Т. 2. 509 б. (орыс тілінде)
5. Сәтбаев Қ.И. Қазақстанның минералдық ресурстары: қара металдар: Алматы: ҚазННТУ, 2024. Т. 3. 365 б. (орыс тілінде)
6. Сәтбаев Қ.И. Қазақстанның минералдық ресурстары: түсті металдар: Алматы: ҚазННТУ, 2024. Т. 4. 330 б. (орыс тілінде)
7. Сәтбаев Қ.И. Қазақстан жер қойнауын геологиялық зерттеу: металлогения: Алматы: ҚазННТУ, 2024. Т. 5. 463 б. (орыс тілінде)
8. Сәтбаев Қ.И. Қазақстан ғылымы: 1941–1951 жж.: Алматы: ҚазННТУ, 2024. Т. 6. 368 б. (орыс тілінде)
9. Сәтбаев Қ.И. Қазақстан ғылымы: 1955–1963 жж.: Алматы: ҚазННТУ, 2024. Т. 7. 509 б. (орыс тілінде)
10. Сәтбаев Қ.И. Ғылыми-танымдық және қоғамдық-саяси мақалалар, баяндамалар: Алматы: ҚазННТУ, 2024. Т. 8. 309 б. (орыс тілінде)
11. Сәтбаев Қ.И. Публицистика. Библиография материалдары: Алматы: ҚазННТУ, 2024. Т. 9. 378 б. (орыс тілінде)

## REFERENCES

1. Lozovskii I.T., Sipailov G.A. *Studencheskie gody Kanysha Satpaeva v Tomske: biograficheskii ocherk. 2-e izdanie. [Kanysh Satbayev's Student Years in Tomsk: A Biographical Essay. 2nd Edition]. Tomsk: TPU, 2019. 136 p. (In Russian)*
2. Satpaev K.I. *Algebra: Almaty: QazUTZU, 2024. V. 10. 559 p. (In Kazakh)*
3. Satpaev K.I. *Kazakhstan's Natural Resources: Almaty: KazUTZU, 2024. V. 1. 339 p. (In Kazakh)*
4. Satpaev K.I. *Bol'shoi Zhezkazgan [Great Zhezkazgan]. Almaty: KazNITU, 2024. V. 2. 509 p. (In Russian)*
5. Satpaev K.I. *Mineral'nye resursy Kazakhstana: chernye metally [Mineral Resources of Kazakhstan: Ferrous Metals]. Almaty: KazNITU, 2024. V. 3. 365 p. (In Russian)*
6. Satpaev K.I. *Mineral'nye resursy Kazakhstana: tsvetnye metally [Mineral Resources of Kazakhstan: Non-Ferrous Metals]. Almaty: KazNITU, 2024. V. 4. 330 p. (In Russian)*
7. Satpaev K.I. *Geologicheskoe izuchenie nedr Kazakhstana: Metallogeniya [Geological Study of Kazakhstan's Subsoil: Metallogeny]. Almaty: KazNITU, 2024. V. 5. 463 p. (In Russian)*
8. Satpaev K.I. *Nauka Kazakhstana: 1941–1951 gg. [Science of Kazakhstan: 1941–1951]. Almaty: KazNITU, 2024. V. 6. 368 p. (In Russian)*
9. Satpaev K.I. *Nauka Kazakhstana: 1955–1963 gg. [Science of Kazakhstan: 1955–1963]. Almaty: KazNITU, 2024. V. 7. 509 p. (In Russian)*
10. Satpaev K.I. *Nauchno-populyarnye i obshchestvenno-politicheskie stat'i i vystupleniya [Popular Science and Socio-Political Articles and Speeches]. Almaty: KazNITU, 2024. V. 8. 309 p. (In Russian)*
11. Satpaev K.I. *Publitsistika. Materialy k bibliografii [Journalism. Materials for a Bibliography]. Almaty: KazNITU, 2024. V. 9. 378 p. (In Russian)*

## Сведения об авторах:

**Байбатша А.Б.**, д-р геол.-минер. наук, профессор Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [a.baibatsha@satbayev.university](mailto:a.baibatsha@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0002-9521-7872>

**Амралинова Б.Б.**, доктор Ph.D, ассоциированный профессор, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [b.amralinova@satbayev.university](mailto:b.amralinova@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0003-0716-5265>

**Нухулы А.**, д-р хим. наук, профессор, Академик НАН РК, академик Международной академии инженерных наук (г. Алматы, Казахстан), [institut1962@mail.ru](mailto:institut1962@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5006-879X>

**Тогизов К.С.**, Ph.D, ассоциированный профессор, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [k.togizov@satbayev.university](mailto:k.togizov@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0002-4830-405X>

## Авторлар туралы мәліметтер:

**Байбатша А.Б.**, Сәтбаев университетінің Геология-минералогия ғылымдарының докторы, профессор (Алматы қ., Қазақстан)

**Амралинова Б.Б.**, Сәтбаев университетінің Ph.D докторы, қауымдастық профессоры (Алматы қ., Қазақстан)

**Нухулы А.**, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР Ұлттық ғылым академиясының академигі, Инженерлік ғылымдар халықаралық академиясының академигі (Алматы қ., Қазақстан)

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

## Information about authors:

**Baibatsha A.B.**, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Amralinova B.B.**, doctor Ph.D, associate professor, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Nukhuly A.**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Member of the International Academy of Engineering Sciences (Almaty, Kazakhstan)

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

## К 70-ЛЕТИЮ ИСАЕВОЙ ЛЮДМИЛЫ ДЖАНДУЙСЕНОВНЫ

29 января 2026 года исполнилось 70 лет доктору геолого-минералогических наук, профессору, известному ученому-геофизику Исаевой Людмиле Джандуйсеновне.

Исаева Людмила Джандуйсеновна родилась 29 января 1956 года в Туркестанской области. В 1979 году окончила физический факультет Казахского государственного университета имени С.М. Кирова (ныне Казахский национальный университет имени аль-Фараби). В 2000 году защитила кандидатскую диссертацию с присуждением ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, а в 2010 году – докторскую диссертацию с присуждением степени доктора геолого-минералогических наук.

С 1979 по 2003 годы научная деятельность Людмилы Джандуйсеновны была связана с Институтом геологических наук имени К.И. Сатпаева НАН РК, где она прошла путь от инженера до старшего научного сотрудника сектора редких металлов. В этот период ею были выполнены фундаментальные термобарогеохимические исследования включений в минералах редкометалльных месторождений Казахстана, а также разработаны методы количественного моделирования процессов рудообразования.

С сентября 2002 года Людмила Джандуйсеновна начала активную педагогическую деятельность, читая курс лекций по дисциплине «Теория поля» на русском и казахском языках на кафедре геофизики КазНТУ имени К.И. Сатпаева.

В 2004–2006 годах она являлась **заведующей кафедрой геологии, минералогии и петрографии**, осуществляя руководство учебно-методической и научной деятельностью кафедры. В этот период читала курсы лекций по дисциплинам «Геологические дисциплины», «Общая геология», «Теория поля», «Теория упругости».

В 2006–2009 годах обучалась в докторантуре КазНТУ имени К.И. Сатпаева и в 2010 году защитила докторскую диссертацию на тему «Динамическая модель формирования редкометалльных месторождений Центрального Казахстана», ставшую значимым вкладом в развитии теории эндогенного рудообразования.

С 2009 года работает на кафедре геофизики, где ведет занятия по дисциплинам «Теория поля», «Петрофизика» для бакалавров на русском и казахском языках, читает лекции магистрантам по дисциплинам «Дистанционное зондирование Земли», «Экологическая геофизика», а также докторантам – «Системный подход при прогнозе и типизации месторождений твердых полезных ископаемых», «Методы научных исследований».

Людмила Джандуйсеновна является ответственным исполнителем и научным руководителем ряда фундаментальных и прикладных научных проектов, финансиру-



емых МОН РК, ИГН им. К.И. Сатпаева и в рамках программно-целевого финансирования. Под ее руководством разрабатывались цифровые геоинформационные системы, термодинамические и 3D-модели эндогенных и экзогенных месторождений, выполнялись исследования в области геомеханики и геофизики рудных массивов.

Она является автором и соавтором около 100 научных публикаций, в том числе 19 статей в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus (h-index – 6), соавтором четырех монографий и первым автором фундаментальных трудов, опубликованных в Казахстане, Германии и Польше, посвященных проблемам формирования и цифрового моделирования редкометалльных и редкоземельных месторождений.

Под научным руководством Исаевой Л.Д. в 2017 году успешно защищена диссертация на соискание степени Ph.D. За годы работы ею подготовлено значительное количество учебно-методических материалов, включая учебное пособие «Теория поля».

Коллеги и ученики высоко ценят Людмилу Джандуйсеновну за высокий профессионализм, научную принципиальность, педагогическое мастерство и преданность геологической и геофизической науке.

*Редакция и коллеги сердечно поздравляют Исаеву Людмилу Джандуйсеновну с юбилеем, желают крепкого здоровья, благополучия, творческого долголетия и новых научных достижений!*

15 - 16 Апрелья 2026

# MINEX '26 KAZAKHSTAN

16-й горно-геологический форум

Тема: Минеральные ресурсы Казахстана: реформы  
и создание стоимости в многовекторных реалиях



[2026.minexkazakhstan.com](http://2026.minexkazakhstan.com)

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ И УСЛОВИЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ в редакцию периодического печатного издания «Горный журнал Казахстана»

1. «Горный журнал Казахстана» принимает к публикации оригинальные статьи научного и научно-технического содержания, отражающие результаты исследовательской и научной деятельности, имеющие рекомендации к практическому применению решаемых вопросов, а также статьи обзорного характера, отвечающие критериям первичной научной публикации (полный перечень рубрик указан на сайте *minmag.kz*).

### 2. Основные требования к статьям, представленным для публикации в журнале:

- набор статьи производится в текстовом редакторе Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем с полуторным интервалом;
- общий объем статьи, включая рисунки, таблицы, метаданные не должен превышать 8 печатных страниц;
- статьи (за исключением обзоров), должны содержать новые научные результаты;
- статья должна соответствовать тематике (см. п. 1), научному уровню журнала;
- статья должна быть оформлена в полном соответствии с требованиями, отраженными в п. 3;
- статья может быть представлена на казахском, русском или английском языке;
- в редакцию представляется окончательный, **тщательно выверенный вариант** статьи, исключающий необходимость постоянных доработок текста на этапах издательского процесса;
- перед отправкой статьи в редакцию журнала авторам необходимо проверить текст на предмет отсутствия плагиата.

### 3. Структура статьи должна содержать следующие разделы:

- код МРНТИ (ГРНТИ <http://grnti.ru/?p1=52>) – шестизначный;
- название статьи (сокращения не допускаются, не допускается использование аббревиатур и формул; максимальное количество слов 10-12) должно быть информативным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы, предоставляется на казахском, русском и английском языках;
  - инициалы и фамилии авторов; статья должна иметь не более 4 авторов; знаком «\*» указывается автор-корреспондент;
  - сведения о каждом авторе (ученая степень, ученое звание, должность, место основной работы, город, страна, контактные данные (адрес электронной почты), ORCID ID) предоставляются на казахском, русском и английском языках;
  - полное название организации (-й), где работают авторы (с указанием ведомственной принадлежности);
  - аннотация в соответствии с требованиями международных баз данных должна достаточно полно раскрывать содержание статьи, включая характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению материалами. Аннотация предоставляется на казахском, русском и английском языках объемом не менее 700 и не более 900 символов;
    - ключевые слова в количестве 6...10 устойчивых словосочетаний, по которым в дальнейшем будет выполняться поиск статьи (сокращения и аббревиатуры не допускаются): ключевые слова отражают специфику темы, объект и результаты исследования и предоставляются на казахском, русском и английском языках;
    - текст статьи, содержащий следующие разделы (введение, методы/исследования, результаты, обсуждение результатов, заключение/ выводы);
    - список использованных источников (10...12), в том числе не менее 3 зарубежных не ранее 2015 года, предоставляется на казахском, русском и английском языках.

**РИСУНКИ** должны иметь расширение графических редакторов CorelDraw, Photoshop, Illustrator и т. п.). Фотографии должны быть предельно четкими в графическом формате (TIFF, JPEG, CDR) с разрешением не менее 300 dpi. Все буквенные и цифровые обозначения на рисунках необходимо пояснить в основном или подрисовочном 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.