

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

Издается с января 2003 г.

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

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

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

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

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

Представители журнала:

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

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

Периодичность 12 номеров в год

Тираж 1500 экземпляров

ISSN 2227-4766

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

Подписано в печать 30.06.2026 г.

Отпечатано:

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

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



INTERRIN

Главный редактор

М.Ж. БИТИМБАЕВ, mbitimbaev@mail.ru

Заместитель гл. редактора

Л.А. КРУПНИК, leonkr38@mail.ru

Заместитель гл. редактора

Х.А. ЮСУПОВ, yusupov_kh@mail.ru

Ответственный редактор

Т.С. ДОЛИНА, Tatyana.Dolina@interrin.kz

Редакционная коллегия:

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

Бекботаева А.А., PhD, ассоц. профессор

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

Vach K., доктор Ph.D (Чехия)

Демин В.Ф., д-р техн. наук, профессор

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

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

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

Mishra B.M., профессор (США)

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

Nikoloski A.N., профессор (Австралия)

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

Ратов Б.Т., д-р техн. наук, профессор

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

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

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

Тамбиев П.Г., канд. техн. наук

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

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

Yeneneh A.M., ассоц. профессор (Оман)

® – статья на правах рекламы

① – информационное сообщение

 – статья публикуется в авторской редакции

3	Колонка главного редактора
	Геотехнология
4	<i>*А. У. Қожантов, Д. К. Ахметканов, Е. Х. Абен, С. С. Мырзахметов</i> Қарағанды көмір бассейніндегі қазбалардың кернеуі-деформацияланған жай-күйін ескеріп анкерлік бекітудің мүмкіндігін қарастыру
	Геоинформатика
11	<i>А. А. Бояндинова, *Ж. А. Адилханова</i> Совершенствование информационно-аналитического обеспечения управления воспроизводством мощностей горно-транспортных комплексов карьеров
	Геология
18	<i>*Е. С. Ли, В. Г. Степанец, В. Л. Левин, С. Б. Иманбаева</i> Минералогический и петрографический анализ барийсодержащей слюды
26	<i>O. D. Gavrilenko, Zh. T. Bagasharova, I. P. Poezhaev, *D. R. Nazyrova</i> Criteria of rare-metal ore potential and their application in predicting prospective areas (a case study of the Kalba-Narym belt)
	Геодезия
33	<i>М. Б. Нұрпейісова, Д. М. Қыргызбаева, *А. М. Абенов, Н. А. Милетенко</i> Тау-кен кәсіпорындарын заманауи геодезиялық қамтамасыз ету
	Металлургические машины
39	<i>Б. С. Бейсенов, *Н. К. Танатаров, И. Б. Бертолеев, Йонас Матейошюс</i> Модернизация системы обрушения сводов зависшего материала в бункерах с электрогидравлическим ударным приводом на базе генератора импульсных токов
	Металлургия
45	<i>*Ye. U. Zhmagaliyev, N. A. Ulmagambetov, B. T. Uakhitova, D. T. Ospanov</i> Enhancing the service life of ferrochrome casting ladles using protective refractory coatings
	Бурение скважин
52	<i>С. М. Ерменов, В. П. Бондаренко, В. Г. Голубев, *А. С. Садырбаева</i> Ұңғымаларды бұрғылауға арналған металлургиялық өндірістердің қалдықтары негізінде ауырлатылған бұрғылау ерітінділері
	Нефтегазовое дело
59	<i>А. А. Мельдешов, *А. К. Абишева, М. Р. Жумабаев, Ж. А. Амир</i> Получение высокооктановых компонентов бензинов из легких алканов
	Геоэкология
67	<i>*G. Toychibekova, E. Akkereeve, J. Sharafieva, K. Sarbaeva</i> Soil carbon dynamics and geoeological transformation of arid landscapes
77	<i>*К. У. Айтекова, Д. К. Сунакбаева, Д. Х. Юлдашбек, К. Т. Сарбаева</i> Фенольные соединения растений как биоиндикаторы экологического состояния горнопромышленных регионов Казахстана в условиях загрязнения тяжелыми металлами
84	Требования к оформлению и условия предоставления статей

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



**Марат
Жакупович
Битимбаев**
главный редактор

Уважаемые коллеги!

Дорогие читатели!

Июнь как первый месяц лета даже если не особенно баловал нас хорошей длительной погодой, зато предоставил и продолжает выкладывать нам много официальных дат и перечень событий, представляющих не просто интерес дежурной чередой встреч и протоколов.

Милые и дорогие нашему сердцу, отчасти ставшие семейными праздниками День защиты детей, День медицинского работника, День старых друзей – знаковые события, позволяющие нам думать о хорошем и находить радость в общении с окружающими, начиная со своей семьи.

У школьников старших классов экзаменационная лихорадка, которая закончится ближе к осени поступлением в вузы и колледжи, трудоустройством на открытие стажа специалиста (пусть рабочего, но нужного тебе и окружающим). У младших с родителями будни, связанные с отдыхом.

В общем, обстановка поменялась. Даже «пробок» на транспортных магистралях стало гораздо меньше. Даже невозможно представить, что это случилось благодаря простому факту – студенты и некоторые старшеклассники перестали ездить на занятия и обратно на собственных автомобилях, на дорогах отсутствуют школьные автобусы!

Но, конечно, самое важное – это превращение нашей столицы Астаны во временный геополитический центр Евразии, начиная с государственного визита президента РФ В. В. Путина и насыщенного Евразийского экономического саммита, которые прошли в конце мая, но их результаты больше стали понятны и вызывают добрый и восторженный резонанс сейчас, в июне.

Совместное заявление «О семи основах дружбы и добрососедства народов Казахстана и России» отражает дух наших взаимоотношений и закрепляет их на долгосрочную основу.

Президент нашей страны добавил, что «несмотря на непростую обстановку в мире, двустороннее сотрудничество, особенно в экономической сфере, успешно развивается», особо подчеркнув, что «Казахстан дорожит узами вечной дружбы и стратегического партнерства с Россией».

Дальнейшее развитие получило наше сотрудничество в ответственном развитии ИИ. По оценкам экспертов, как об этом заявил Президент РК, в ближайшие 20 лет будет выделен целый ряд значимых технологических тенденций, включая биотехнологии, автономные системы, космическую экономику, хранение энергии, квантовые вычисления. И нашим странам, конечно же, нельзя оставаться в стороне от мировых тенденций – заключил Касым-Жомарт Кемелевич.

Нам стоит при этом помнить и продумать участие горно-металлургического комплекса страны во всех планируемых и уже занимающих свои законные места технологических этапах развития экономики новых составляющих нашего экономического суверенитета.

Код МРНТИ 52.35.29:52.13.23

*А. У. Кожантов, Д. К. Ахметканов, Е. Х. Абен, С. С. Мырзахметов
«Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КЕАҚ
(Алматы қ., Қазақстан)

ҚАРАҒАНДЫ КӨМІР БАССЕЙНІНДЕГІ ҚАЗБАЛАРДЫҢ КЕРНЕУІ- ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН ЖАЙ-КҮЙІН ЕСКЕРІП АНКЕРЛІК БЕКІТУДІҢ МҮМКІНДІГІН ҚАРАСТЫРУ

Аннотация. Соңғы уақытта тау-кен жұмыстары тереңдігінің өсуіне және жату жағдайлары қолайлы қабаттарды бастапқы өндеуге байланысты қазудың тау-кен-геологиялық жағдайларының күрделенуіне орай өндірудің өзіндік құны артуда, дайындық кенжарларындағы өнімділік төмен деңгейде, тау-кен қазбаларын жүргізу, ұстау және жөндеу кезінде еңбек сыйымдылығы өсуде. Тау-кен қазбаларын бекіту және қолдану көмірді жерасты өндірудің тиімділігін анықтайтын құрамдас бөліктердің бірі ретінде қабылданды. Шахталарда дайындық қазбаларын жүргізу кезіндегі тиімді және қауіпсіз жұмыс шарттарының бірі бекіту материалдарының шығынының азаюы, олардың орнықтылығын қамтамасыз ету. Мақалада тау-кен жұмыстарын жүргізу қауіпсіздігін қамтамасыз ету мақсатында шахталардағы қазбаларды анкерлік бекітпені пайдалану параметрлері қарастырылған.

Түйінді сөздер: талдамалық модельдеу, кернеулі-деформацияланған жай-күй, контур жанындағы алап, тау жыныстары, тау-кен қазбаларын бекіту, анкерлік бекітпе.

Considering the stress-strain state in the Karaganda coal basin for the possibility of using the anchorage of the workings

Abstract. Recently, due to the increasing complexity of mining and geological conditions caused by the growing depth of mining operations and the initial development of seams with favorable conditions, the cost of production has been increasing, productivity in preparatory workings remains low, and the labor intensity of mining, maintenance, and repair of mine workings is increasing. The reinforcement and support of mine workings is one of the factors determining the efficiency of underground coal mining. One of the conditions for effective and safe work during preparatory mining in mines is to ensure their stability with minimal consumption of reinforcement materials. The article defines the parameters for the use of anchor support in mines to secure rods in workings in order to ensure the safety of mining operations.

Key words: analytical modeling, stress-strain state, near-surface array, rock formations, mine support, anchor support.

Возможности использования анкерного крепления выработок в Карагандинском угольном бассейне с учетом напряженно-деформированного состояния

Аннотация. В последнее время в связи с усложнением горно-геологических условий разработки, обусловленное ростом глубины горных работ и первоначальной отработкой пластов с благоприятными условиями залегания, повышается себестоимость добычи, снижается производительность и растет трудоемкость при проведении, поддержании и ремонте подготовительных выработок. Крепление и поддержание горных выработок является одной из составляющих, определяющих эффективность подземной добычи угля. Одним из условий эффективной и безопасной работы при проведении подготовительных выработок на шахтах является обеспечение их устойчивости при минимальном расходе крепящих материалов. В статье определены параметры эксплуатации анкерной крепи на шахтах в целях обеспечения безопасности ведения горных работ.

Ключевые слова: аналитическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, приконтурный массив, горные породы, крепление горных выработок, анкерная крепь.

Кіріспе

Көмір қабаттарын қазудың тиімділігі мен қауіпсіздігі тау-кен қазбаларын бекіту технологиясын жетілдіру есебінен едәуір дәрежеде арттырылуы мүмкін [1]. Анкерлік бекітпе бекітудің ресурс үнемдеу тәсілдерін қолдану көлемін ұлғайтады, өнімділігі жоғары бұрғылау жабдығын пайдалану кезінде қазбаларды үңгілеу процесін жеделдетуге, оларды жүргізу құнын төмендетуге және анкерлік бекітпені қолдану саласын кеңейтуге мүмкіндік береді.

Орнатылатын анкерлік темір торлар тізбесі бекітілетін ұңғымалар мен бүйір жағынан бұрғыланған қазбаларды ұстап тұруға мүмкіндік береді. Орнатылғаннан кейін бірден қазбалар төбесінің тау-кен алабында және тау-кен жыныстарының жылжуы мен опырылуына қарсы төтеп беріп, бүйірмен қосылу аймағын орнықтылығы үшін орнатылады.

Анкерлік бекітпенің басқа артықшылығы бекітпені толық механикаландыру мүмкіндігі болып табылады, нәтижесінде үңгілеу жұмыстарының еңбек сыйымдылығы едәуір төмендейді және қазбаларды жүргізу жылдамдығы артады [2].

Шетелдік практикада көмір шахталарында анкерлік бекітпені пайдалану көлемінің ұдайы ұлғаюы жүріп жатыр, оның үлесі бүгінде Австралияда – 87, Қытайда – 83, АҚШ-та – 52, Ресейде – 60%-ды құрайды.

Бұл металл прокатының, сондай-ақ бетонның, ағаш материалдарының шығынын 2–3 есе төмендетуге әкеледі және бұл қазбаларды бекіту кезінде тау-кен жұмыстары-

ның өнімділігін 1,5–2,0 есе арттырады, содан кейін оларды жүргізу қарқынын 2–3 есе арттырады. Бекіту кезінде тұрақты күйде ұстап тұру шығындарын екі есе арттырады [3]. Қазіргі уақытта Қарағанды бассейнінің шахталарында анкерлік бекітпені қолдану 35 км-ден аспайды (немесе жүргізілетін қазбалардың жылдық көлемінің 54%-н құрайды), бұл тау-кен геологиялық және тау-кен техникалық жағдайлардың 600 м астам тереңдікке ауысуына байланысты (тазалу жұмыстарының әсер ету аймақтарында). Жылжымалы және пайдаланылған лава жыныстары құлау аймақтарында орналасқан кезде одан жоғары (бұрын жоғарғы қабаттарда қалдырылған кентіректерден) тау жыныстарының қысымы 20–30%-ға өскенде оның пайда болу қарқындылығы 1,2–1,3 есе өседі. Әсіресе өндірілген кеңістік шекарасындағы қазбалардағы жарықшақтардың өсу деңгейі қарқынды жүреді [4, 5].

Анкерлік бекітуді қолдану саласын кеңейту үшін проблемалардың бірі төменгі көкжиектердегі қазбалардың айналасындағы жыныстарда геомеханикалық процестердің дамуының жеткіліксіз зерттелуі болып табылады.

Зерттеу әдістері

Анкерлік бекітпемен қазбаларды қамтитын жыныстардың жалаңаштану уақытын ескере отырып, жыныс массивінің деформация заңдылықтарын зерттеу бекітудің ұтымды параметрлерін айқындау үшін негіз болып табылады.

Анкерлік бекітпесі бар тау-кен қазбаларын қамтитын массивтің деформациясы мынадай реттілікпен жүргізіледі. Қазбаны жүргізу кезеңінде анкерлерді орнату сәтіне дейін дереу қирау аймақтары қалыптасады және массивтің кернеулі деформациясына қайта зерттеу жүргізіледі, бұл қазба контурынан массивке тереңдікке қарай опырылу шебінің өсуіне әкеп соғады. Осыдан кейін контурға жақын жыныстардың опырылуы тоқтатылады, ал анкерлі-темір тор жыныстардың копсытылуынан түсетін жүктемені өзіне қабылдайды және қирау шебінің массивке тереңдеуі жыныстардың қазба контурына қарай ығысуын тежейді.

Қарағанды көмір бассейні шахталарындағы тау жыныстарының деформациясының негізгі түрлері: көмірдің құлауы, үгілуі, сығылуы және тау жыныстарының шоғырлануы болып табылады [6, 7]. Контур жанындағы массивтің жай-күйіне әсер ететін қолайсыз факторлардың жиынтығы (қазбаның орналасу тереңдігі, жоғары тау-кен қысымы аймағында қазба жүргізу) қазбаны ұстап тұру жағдайларының нашарлауына және тау-кен жұмыстарын жүргізу мүмкіндігінің қолайсыздығына алып келеді – 1-сурет.

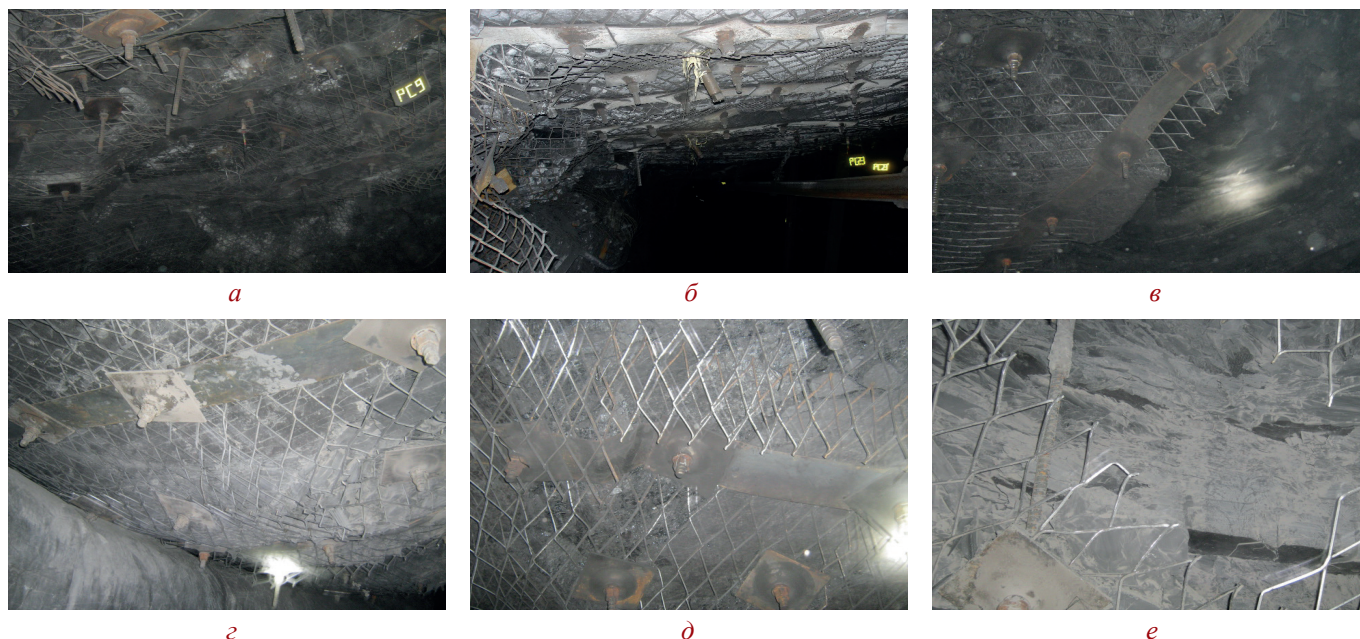
Қарағанды көмір бассейнінің шахталарында дайындық қазбаларының жай-күйінің нашарлауының негізгі себебі, тау-кен жұмыстары тереңдігінің өсуімен жыныстардың геостатикалық қысымға беріктігі қатынасының төмендеуі болып табылады. Қосымша әсер ету факторы қазбалардың үстінде орналасқан көмір қабаттарының кентіректері

мен шеткі бөліктерінің болуы. Қарағанды көмір бассейнінде жоғары тау-кен қысымының (ШЖК) әсер ету аймағында жыл сайын қолданыстағы қазбалардың 20–30%-ы түзетіледі және олардың жай-күйі қанағаттанарлықтан өте нашар деп бағаланады.

Қазбаларды жүргізу барысында тау-кен жұмыстарын жүргізу үшін күрделі аймақтар жиі кездеседі: жоғары тау-кен қысымы, бұрын өткен қазбалардың астынан өту, ұңғымаларға тікелей жақын жерде, әртүрлі сипаттағы геологиялық бұзушылықтар аймақтарында, сыйымды жыныстардың орнықтылығын жоғалту кезінде жату параметрлерінің өзгеруі, қазбалардың бұзылуы мен судың кіруі.

Дайындық қазбаларында анкерлік бекітпені қолдану мүмкіндігіне әсер ететін факторлар: сыйымдылық жыныстарындағы анкерлердің бекітілу беріктігі, қазбалардың айналасындағы тау жыныстарының қауіпті деформациялары аумағының өлшемдері қазбаның ығысу шамасына және тау жыныстарының қауіпсіз ығысуының (түсуінің) шекті шамасы [6, 7, 8].

Қарағанды көмір бассейнінің шахталарында аралас бекітпе басым қолданылатын тікбұрышты дайындық (ені 5 м биіктігі бойынша 3,0–3,3 м) және көлденең қимасы (биіктігі мен ені 4,7 x 3,3 м) қазбаларда (конвейерлік штректер мен бремсбергтер) қатарлар арасы 0,5 қадаммен 12–14 дана болат полимерлік жабындылардан тұратын анкерлік бекітпелер қолданылады.



Сурет 1. Тау-кен қазбаларын анкерлік бекітуді пайдалану кезіндегі тау-кен қысымының көріністері:

а – қазба төбесінің тұрақсыз жай-күйі, б – қазба бұрыштарын нығайту панорамасы, в – қазба төбесінде пайда болған күмбез, г – қазба төбесінің отыруы, д – анкер өзегінің деформациясы, е – қазба төбесінің жарықшақтылығы.

Figure 1. Manifestations of rock pressure when using anchor support in underground workings: *a – unstable condition of the excavation roof, b – panorama of excavation corner reinforcement, c – dome formed in the excavation roof, d – subsidence of the excavation roof; e – deformation of the anchor rod; f – fracturing of the excavation roof.*

Рис. 1. Проявления горного давления при использовании анкерного крепления горных выработок:

а – неустойчивое состояние кровли выработки, б – панорама укрепления углов выработки, в – купол, образовавшийся в кровле выработки, г – оседание кровли выработки, д – деформация стержня анкера, е – трещиноватость кровли выработки.

Қатарлардағы 0,65 м және қалыңдығы 4–6 мм темірден жасалған бүйірлік анкерлер орналастырылады (швеллер № 10, 150 x 5 мм). Ұзындығы 2,4 м шпурларды, сондай-ұзындығы 1,6–1,8 м АМК-М4 типті химиялық ампулаларды толық толтыру үшін 1 x 1 м тормен орнатылатын пластмассаға 35–40° бұрышпен жабу анкерлері қолданылады [7–9].

Қазба төбесінің және бүйірлік (ұзындығы 1,8 м) анкерлердің санынан әр 0,5 м сайын анкерлік немесе торсыз металл аркалық бекітпеден тұратын құрамдастырылған бекітпе қолданылады. Әлсіреген аймақтарда немесе тұрақсыз бүйір тау жыныстары бар бейіндерінен 1 м сайын қазбаның бүйіріне анкерлермен бекітілетін бүйір тіреулер қосымша орнатылады.

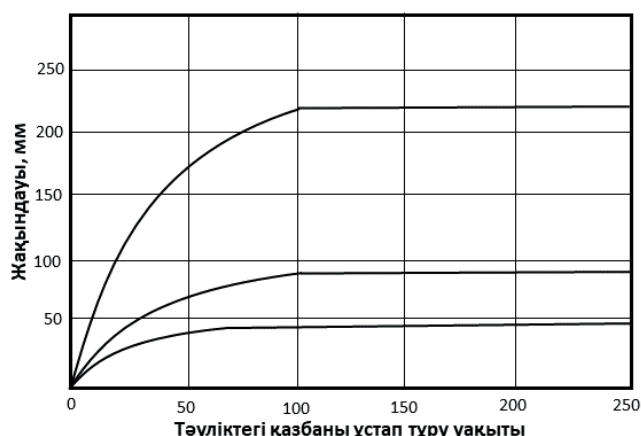
Қазба төбесінің сыйымды тау жыныстарының беріктігі 20-дан 40 МПа-ға дейін өзгереді. Қазбаларды жүргізу жылдамдығы анкерлік бекітпені таза күйінде бекіту кезінде құрайды: далалық қазбалар үшін 100–140 м/ай, қабаттық қазбалар үшін 130–200 м/ай. Қазбалардың қызмет ету мерзімі 3–4 жылға дейін.

Анкерлерді қолдану орынсыз болған жағдайда (жарықшақты, тұрақсыз, суланған жыныстар, тектоникалық бұзылулардың болуы және т. б.) бекітпені күшейту тәсілдері қолданылады.

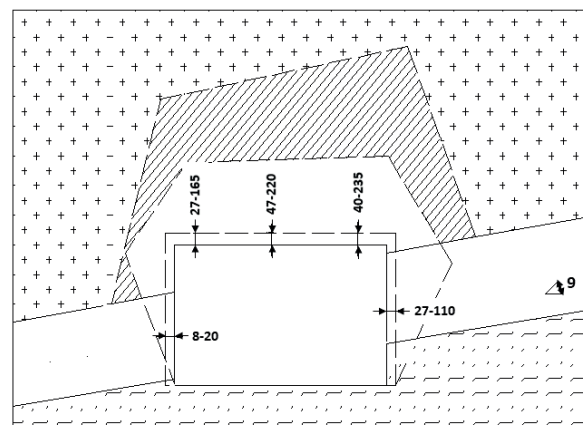
Тау-кен технологиялық факторлардың және қазбалар параметрлерінің Қарағанды көмір бассейндері («Күзембаев», Костенко, «Саранская», «Тентек», «Абай», «Шахта») «Тинская», «Қазақстан» шахталарында қазбалардың тұрақтылығына әсерін айқындау үшін нақты бақылау жүргізілді [10, 11].

Нәтижелер және талқылау

Шахталардағы дайындық қазбаларының жай-күйін зерттеу келесілерді анықтауға мүмкіндік берді.



а



б

Сурет 2. Бекіту түріне байланысты қазба конвергенциясының динамикасы.

а – контурлардың жылыжуы: 1 – анкерлік бекітпе, 2 – құрамдастырылған бекітпе, 3 – бұзылу немесе тірек қысымы аймақтарында күшейтілген, б – қазба айналасындағы ығысу геомеханикасы.

Figure 2. Dynamics of convergence of output depending on the type of fastening.

а – contour displacement: 1 – rock bolt support, 2 – combined support, 3 – reinforced in failure or abutment pressure zones, б – geomechanics of displacement around the excavation.

Рис. 2. Динамика конвергенции выработки в зависимости от типа крепления.

а – смещение контуров: 1 – анкерная крепь, 2 – комбинированная крепь, 3 – усиленная в зонах разрушения или опорного давления, б – геомеханика смещения вокруг выработки.

Кесме 1

Қазбалардағы қазба төбесінің және табанында күтілетін ығысулар

Table 1

Expected roof and soil displacement in workings

Таблица 1

Ожидаемые смещения кровли и почвы в выработках

Қазба жұмыстарының сипаты	Есептік көрсеткіштері					
	V_{oc} мм/тәу.	V_y мм/тәу.	R_{01} мм	R_{02} мм	R_a мм	R_o мм
Массивте жүргізілгені	0,6	-	60	-	-	250
Жанас қазбаларда	1,2	-	110	-	-	500
Лава артында жобаланған	-	1,5	-	110	160	680
Лава бойында жобаланған	0,6–0,9	0,8–1,6	60	110	140–160	850

Тау жыныстарының шоғырлануына анкерлік бекітпені метал арқалық иілгіш бекітпемен комбинацияда қолдану елеулі әсер ететіні анықталды. Құрамдастырылған және анкерлік бекітпесі бар қазбаларда 0,1–0,15 м шоғырланады, ал металл арқалық бекітпесі болса қазбаларда $= 0,4 \div 0,5$ м құрайды, бұл ретте төбені түсіру екі жағдайда да аз ерекшеленеді және 1,0–1,1 м құрай алады (1-кесте).

Мұнда V_{oc} және V_y – тиісінше тазалау жұмыстарының әсер ету аймағынан тыс және тау қысымы белгіленген аймақта жыныстардың ығысу жылдамдығы;

R_{01} , R_{02} , R_a , R_o – тиісінше бірінші, екінші лава алдындағы уақытша тірек қысымы аймағындағы жыныстардың жылжуы, бірінші лава артындағы қазба төбесінің дың белсенді жылжуы, күтілетін конвергенцияның жалпы шамасы.

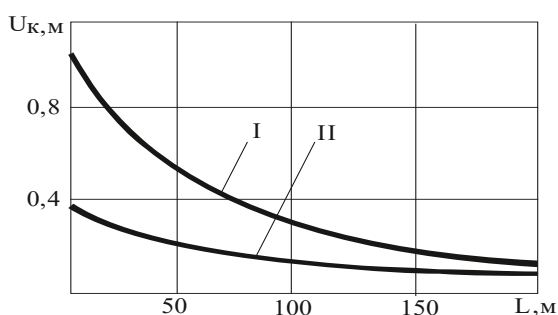
Тау жыныстардың қарқынды ығысуының басталуы лавадан 80–120 м қашықтықта (жүктеменің ең жоғары 250–350 кН және рұқсат етілетін 260 кН кезінде, бекітпе қадамы металл арқалық бекітпесі 0,5 м кезінде) тазарту кенжары желісінен төбенің ең жоғары ығысуы 0,5–1,1 м текше парабола бойынша қабаттың қуаты 1,5-тен 4,0 м-ге

дейін өзгерген кезде байқалады. Бүйір қабырғаларының ығысуы төбенің ығысуынан 20–45% аз. Бұл ретте ойып алу бағанасы жағынан бүйірлердің ығысуы тиіспеген массив жағынан 25–45%-ға көп.

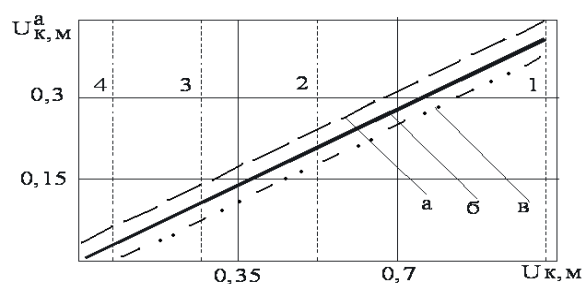
2,0–2,5 м тереңдіктегі жыныстардың қабатталуы (ұзақтығы) 1,5–2,0 м диапазондағы қабаттың қуаты кезінде 0,2–0,25 м және 3,5–4,5 м – қабаттың қуаты кезінде тиісінше 0,5–0,55 м құрады.

Қабаттың қуаты 2,0 және 4,0 м болған кезде бекітпеге жүктеме қазба төбесінің жағынан 50 және 80 кН, кен алу бағаны жағынан 45 және 70 кН, қол сұғылмайтын массив жағынан 40 және 65 кН (7–8% аз) құрады. Қуаты 1,5–2,0 және 3,5–4,0 м тіреу қысымының әсерінен 2,5 және 4,5 м тереңдікте, бүйірлерінде – 0,9 және 1,2–1,7 м жарықтар арасындағы арақашықтық 0,1–0,3 м болатын қабаттарда жарықтар пайда болды, оны қорғасынға бұрышпен орната отырып, ұзындығы 2,3–2,4 м анкерлік бекітпені қолдануға мүмкіндік береді.

Анкерлік бекітуді қолдану тиісінше 0,55 және 0,45 қазбаларға қазба төбесінің дың ығысуын айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді (3а, 3б-суреттерінде).



а



б

Сурет 3. Анкерлеу әсерінің ($U_k - б$) төбе жыныстарының ығысуына ($U_k - а$) лавадан қашықтыққа және анкерлерді орнату тығыздығына (P_a , анк./м²) тәуелділігі. 1 – металл қайрауыш (металл арқалық бекітпесі), 2 – анкерлі және металл арқалық бекітпесі. P_a : а – 0,8; б – 1,0; в – 1,2.

Figure 3. Dependence of the influence of anchoring ($U_k - б$) on roof rock displacement ($U_k - а$) on the distance from the lava and the density of anchor installation (P_a , anch./m²). 1 – steel frame support (steel arch support), 2 – rock bolt and steel frame support. P_a : а – 0.8; б – 1.0; в – 1.2.

Рис. 3. Зависимость влияния анкерования ($U_k - б$) на смещения пород кровли ($U_k - а$) от расстояния от лавы и плотности установки анкеров (P_a , анк./м²). 1 – металлическая рамная крепь (металлическая арочная крепь), 2 – анкерная и металлическая рамная крепь. P_a : а – 0,8; б – 1,0; в – 1,2.

Жыныстар үшін эксперименттік тәуелділіктер алынған, олар қазба төбесінің тау жыныстарын анкерлеу кезінде массивтің ығысуының өзгеруімен қарқындылығы бойынша бір типті. Ерекшелігі мынада: массивтің шоғырлануы түріндегі тау қысымының пайда болу шамасы төбе жыныстарының деформациясынан 1,25–1,27 есе асады.

Статистикалық эксперименттік деректерді өңдеумен қазбаның құрамдастырылған бекітпесі кезінде топырақтың (U_n , м) лава (L_n , м) қашықтығынан ену жылдамдығының эмпирикалық тәуелділігі белгіленген:

$$U_n = 0,7 - 0,003 \times L_n, \quad (1)$$

сондай-ақ топырақ жыныстарының ығысуына анкерлеу әсерінің (U_n^a , м) лавадан арақашықтығына (L_n , м) тәуелділігі:

$$U_n^a = 0,7 - 0,003 \times L_n. \quad (2)$$

Қазба топырағына орнатылатын анкерлердің ұзындығын пайдаланудың тау-кен-техникалық факторларына байланысты эмпирикалық формула бойынша айқындау ұсынылады:

$$L = \frac{6,75 \times B_n \times H_n}{\Pi_n}, \quad (3)$$

мұндағы 6,75 – эмпирикалық коэффициент;

B_n – кеше кен қазбасының ені, м;

H_n – тау жыныстарының шоғырлану шамасы (эксперименттік деректер), м;

Π_n – тау жыныстарының сығуға беріктігі, МПа.

Айқаспалы бағдарланған ұңғыма астындағы анкерлерді орнату қадамы металл арқалық бекітпе арқалары санының 1 пог. метрге екі еселенген шамасына теңдей метр көрсеткіштері [11].

Қорытынды

Анкерлерді орнату жіктелу аймағының мөлшерін орташа алғанда 1,25 есе азайту есебінен қазба төбесінің мен жыныстарының ығысуын азайтады. Қаралып отырған өзгерістер шегінде анкерлерді орнату тығыздығының өзгеруі (0,8–1,2 анк./м²) қазбалардың деформация шамасына елеулі әсер етпейді.

Анкерлік бекітпе түріндегі күшейту бекітпесі есебінен тікелей қазба төбесі тау жыныстарының беріктігін арттыру кезінде анкерлермен «тоқу» есебінен сыйымды жыныстардың беріктігі өседі (1,2–1,3 есе ұлғайды). Металл арқалық бекітпе кезінде қазба бүйірінің жалпы деформациясының шамасы анкерлік бекітпеге қарағанда орташа алғанда 0,55 м немесе 2 есе көп деформацияны құрады.

Анкерлік бекітпені неғұрлым кеңінен енгізу үшін кедергілердің бірі нақты геомеханикалық жағдайды және пайдалану тәжірибесін ескере отырып, бекіту параметрлерін негізді қабылдауға мүмкіндік беретін нормативтік базаның болмауы болып табылады. Жүргізілген зерттеулер бұл өнімді толықтыруға мүмкіндік береді.

Дербес анкерлік бекітпе пайдаланудың бүкіл мерзімі бойына олардың орнықты жай-күйін қамтамасыз етпейтін қазбаларда анкерлік қрды рамалық бекітпенің әдеттегі түрлерімен үйлесімде қолдану өте тиімді.

Қарағанды көмір бассейнінің шахталарында шахталық толтырмалардың мен жинақталған тәжірибенің нәтижелерін талдау анкерлік бекітпені рамамен үйлестіре отырып қолдану қазбалардың орнықтылығын едәуір және бекіту материалдарының шығынын 1,5–2,0 есе төмендетуді қамтамасыз ететінін көрсетеді. Анкерлердің көмегімен қазба айналасындағы жыныстарда (қазба төбесі мен бүйір жақтарынан) жоғары жергілікті қабылдауды және тау қысымын рама бекітпесінің контуры бойынша теңестіруді, оның элементтерін бөлуді қамтамасыз етуге болады.

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Еременко В. А. Анкерлік бекітудің қазіргі заманғы технологиялары // Тау-кен ақпараттық-талдау бюллетені. – 2012. – № S5. – Б. 111–117 (орыс тілінде)
2. Іргелес тау-кен қазбаларын жүргізу мен қолдаудың геомеханикалық жағдайларын зерттеу / Г. Д. Танекеева [және т. б.] // Уголь. – 2023. – № 2. – Б. 31–33 (орыс тілінде)
3. Дауренбекова А. Н., Кожантов А. У. Тау-кен технологиясының негіздері. – Алматы: Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 2017. – 161 б. (қазақ тілінде)
4. Дауренбекова А. Н., Кожантов А. У. Тау-кен өндірісінің өзара байланысты процестері үшін кешенді кен орындарын ашық игеру (жер қойнауынан кешенді пайдалы қазбаларды өндіру кезінде). – Алматы: Т. Кенеев атындағы «Polytech» баспа орталығы, 2025. – 104 б. (орыс тілінде)
5. Жер асты қазбаларынан туындаған жер үсті деформацияларының факторлары мен мониторингіне әсер ететін даму ерекшеліктері / Y. Li [және т. б.] // Sustainability. – 2023. – № 15 (3). – Б. 18–69 (ағылшын тілінде)
6. Жер асты жолдарындағы анкерлік болттардың деформациялық сипаттамалары мен жауап беру коэффициенттері / Z. Wang [және т. б.] // Applied Sciences. – 2024. – № 14 (15). – Б. 66–94 (ағылшын тілінде)
7. Терең жолдардың деформациясы мен бұзылуының сипаттамалары және оларды бақылау / D. Chen [және т. б.] // Frontiers in Earth Science. – 2022. – № 10. – Б. 1–15 (ағылшын тілінде)
8. Olenyuk A., Shashkin V., Baimakhanov A. Қарағанды көмір бассейнін тақырыптық зерттеу // E3S Веб-конференциялар. – 2024. – № 432. – Б. 10–14 (ағылшын тілінде)
9. Бобнев Ю. Н. Саран шахтасы жағдайында лаваларды өнімділігі жоғары өңдеу проблемалары // Тау-кен ақпараттық-талдау бюллетені. – 2006. – № 12. – Б. 44–49 (орыс тілінде)

10. Korobayeva A., Shashkin V., Tleubergenov A. Қарағанды көмір бассейнінде микроэлементтерді бөлу (Қазақстан) // *Geosciences*. – 2024. – № 14 (6). – Б. 201–212 (ағылшын тілінде)
11. Vassilyev S., Isakov G. Қазақстандағы шахмалық метан: экономикалық және экологиялық тақырыптық зерттеу // *Central Asian Journal of Sustainability and Climate Research*. – 2024. – № 3. – Б. 96–125 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Eremenko V. A. *Sovremennyye tekhnologii ankernogo krepleniya [Modern anchorage technologies]*. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. – 2012. – No. S5. – P. 111–117 (in Russian)
2. *Issledovanie geomekhanicheskikh uslovii provedeniya i podderzhaniya prisechnykh gornyykh vyrabotok [Investigation of geomechanical conditions for conducting and maintaining cross-section mining operations]* G. D. Tanekeeva et al. *Ugol' [Coal]*. – 2023. – No. 2. – P. 31–33 (in Russian)
3. Daurenbekova A. N., Kozhantov A. U. *Osnovy gornorudnoi tekhnologii [Fundamentals of mining technology]*. – Almaty: Kazakhskii natsional'nyi issledovatel'skii tekhnicheskii universitet imeni K. I. Satpaeva, 2017. – 161 p. (in Kazakh)
4. Daurenbekova A. N., Kozhantov A. U. *Otkrytaya razrabotka kompleksnykh mestorozhdenii dlya vzaimosvyazannykh protsessov gornogo proizvodstva (pri dobyche kompleksnykh poleznykh iskopaemykh iz neдр zemli) [Open-Pit Mining of Complex Deposits for Interrelated Processes of Mining Production (during the extraction of complex mineral resources from the earth's subsurface)]*. – Almaty: Izdatel'skii tsentr «Polytech» imeni T. Kenееva, 2025. – 104 p. (in Russian)
5. *Developmental Features, Influencing Factors, and Monitoring of Surface Deformation Induced by Underground Excavations* / Y. Li et al. // *Sustainability*. – 2023. – No. 15 (3). – P. 18–69 (in English)
6. *Deformation Characteristics and Response Factors of Rock Bolts in Underground Roadways* / Z. Wang et al. // *Applied Sciences*. – 2024. – No. 14 (15). – P. 66–94 (in English)
7. *Deformation and Failure Characteristics and Control of Deep Roadways* / D. Chen et al. // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – No. 10. – P. 1–15 (in English)
8. Olenyuk A., Shashkin V., Baimakhanov A. *A case-study of the Karaganda Coal Basin* // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – No. 432. – P. 1–14 (in English)
9. Bobnev Yu. N. *Problemy vysokoproizvoditel'noi otrabotki lav v usloviyakh shakhty «Saranskaya» [Problems of high-performance lava mining in the conditions of the Saranskaya mine]*. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. – 2006. – No. 12. – P. 44–49 (in Russian)
10. Korobayeva A., Shashkin V., Tleubergenov A. *Trace Elements Distribution in the Karaganda Coal Basin (Kazakhstan)* // *Geosciences*. – 2024. – No. 14 (6). – P. 201–212 (in English)
11. Vassilyev S., Isakov G. *Coal mine methane in Kazakhstan: economic and environmental case study* // *Central Asian Journal of Sustainability and Climate Research*. – 2024. – No. 3. – P. 96–125 (in English)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Еременко В. А. *Современные технологии анкерного крепления* // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № S5. – С. 111–117 (на русском языке)
2. *Исследование геомеханических условий проведения и поддержания присечных горных выработок* / Г. Д. Танекеева [и др.] // Уголь. – 2023. – № 2. – С. 31–33 (на русском языке)
3. Дауренбекова А. Н., Кожантов А. У. *Основы горнорудной технологии*. – Алматы: Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, 2017. – 161 с. (на казахском языке)
4. Дауренбекова А. Н., Кожантов А. У. *Открытая разработка комплексных месторождений для взаимосвязанных процессов горного производства (при добыче комплексных полезных ископаемых из недр земли)*. – Алматы: Издательский центр «Polytech» имени Т. Кенеева, 2025. – 104 с. (на русском языке)
5. *Особенности развития, влияющие факторы и мониторинг поверхностной деформации, вызванной подземными раскопками* / Y. Li [и др.] // *Sustainability*. – 2023. – № 15 (3). – С. 18–69 (на английском языке)
6. *Деформационные характеристики и коэффициенты отклика скальных болтов на подземных дорогах* / Z. Wang [и др.] // *Applied Sciences*. – 2024. – № 14 (15). – С. 66–94 (на английском языке)
7. *Характеристики деформации и разрушения и контроль глубоких дорог* / D. Chen [и др.] // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – № 10. – С. 1–15 (на английском языке)
8. Olenyuk A., Shashkin V., Baimakhanov A. *Тематическое исследование Карагандинского угольного бассейна* // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – № 432. – С. 10–14 (на английском языке)

9. Бобнев Ю. Н. Проблемы высокопроизводительной отработки лав в условиях шахты «Саранская» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 12. – С. 44–49 (на русском языке)
10. Korobayeva A., Shashkin V., Tleubergenov A. Распределение микроэлементов в Карагандинском угольном бассейне (Казахстан) // Geosciences. – 2024. – № 14 (6). – С. 201–212 (на английском языке)
11. Vassilyev S., Isakov G. Шахтный метан в Казахстане: экономическое и экологическое исследование // Central Asian Journal of Sustainability and Climate Research. – 2024. – № 3. – С. 96–125 (на английском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Кожантов А. У., т. ф. к., «Тау-кен ісі» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), a.kozhantov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-3658-9940>

Ахметканов Д. К., т. ф. к., «Тау-кен ісі» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), d.akhmetkanov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-4824-7240>

Абен Е. Х., т. ф. к., «Тау-кен ісі» кафедрасының профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), y.aben@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8537-229X>

Мырзахметов С. С., т. ф. к., «Тау-кен ісі» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан), s.myrzakhmetov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-3233-2515>

Information about the authors:

Kozhantov A. U., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Mining Department at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Akhmetkanov D. K., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Mining Department at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Aben E. Kh., Candidate of Technical Sciences, Professor of the Mining Department at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Myrzhakhmetov S. S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining at Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Кожантов А. У., к. т. н., ассоциированный профессор кафедры «Горное дело» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Ахметканов Д. К., к. т. н., ассоциированный профессор кафедры «Горное дело» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Абен Е. Х., к. т. н., профессор кафедры «Горное дело» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

Мырзахметов С. С., к. т. н., ассоциированный профессор кафедры «Горное дело» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)



ГОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РОССИЯ

www.techmining.ru

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

15 сентября
2026

Москва

Swissôtel Красные Холмы Москва



Код МРНТИ 52.01.85:52.13.17

А. А. Бояндинова, *Ж. А. Адилханова

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОСПРОИЗВОДСТВОМ МОЩНОСТЕЙ ГОРНО-ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ КАРЬЕРОВ

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы совершенствования информационного обеспечения управления воспроизводством производственных мощностей горно-транспортных комплексов карьеров, представлены структура информационного обеспечения и блок-схема алгоритма информационно-программного комплекса. Разработанное решение обеспечивает интеграцию данных эксплуатации в едином информационном пространстве и поддержку принятия решений по техническому обслуживанию и обновлению оборудования. Методическая основа комплекса базируется на дифференциальной диагностике мощностей и оценке рентабельности функционирования ГТК, что позволяет учитывать техническое состояние и экономическую эффективность эксплуатации при формировании управленческих решений. Реализация подхода обеспечивает многовариантный анализ сценариев, повышение обоснованности планирования ремонтов и оптимизацию использования производственных ресурсов.

Ключевые слова: информационное обеспечение, горно-транспортный комплекс, производственная мощность, управление, эффективность, оптимизация, карьер.

Карьерлердің тау-кен-көлік кешендерінің қуаттарын басқаруды ақпараттық қамтамасыз етуді жетілдіру

Андатпа. Мақалада карьерлердің тау-кен-көлік кешендерінің өндірістік қуаттарын өндіруді басқаруды ақпараттық қамтамасыз етуді жетілдіру мәселелері қаралды, ақпараттық қамтамасыз ету құрылымы және ақпараттық-бағдарламалық кешен алгоритмінің блок-схемасы ұсынылды. Өзірленген шешім пайдалану деректерін бірыңғай ақпараттық кеңістікте біріктіруді және жабдыкка техникалық қызмет көрсету және жанарту бойынша шешімдер қабылдауды қолдауды қамтамасыз етеді. Кешеннің әдістемелік негізі қуаттардың дифференциалды диагностикасына және басқарушылық шешімдерді қалыптастыру кезінде пайдаланудың техникалық жағдайы мен экономикалық тиімділігін ескеруге мүмкіндік беретін ТКЖ жұмысының рентабельділігін бағалауға негізделген. Тәсілді іске асыру сценарийлерді көп нұсқалы талдауды, жөндеуді жоспарлаудың негізділігін арттыруды және өндірістік ресурстарды пайдалануды оңтайландыруды қамтамасыз етеді.

Түйінді сөздер: ақпараттық қамтамасыз ету, тау-кен көлік кешені, өндірістік қуат, басқару, тиімділік, оңтайландыру, карьер.

Improvement of information support for capacity management of mining and transport complexes of open-pit

Abstract. This article examines the improvement of information support for managing the reproduction of production capacities of open-pit mining and transport systems. It presents the structure of the information support and a flowchart of the algorithm for the software and information system. The developed solution integrates operational data into a single information space and supports decision-making on equipment maintenance and upgrades. The methodological basis of the system is based on differential capacity diagnostics and an assessment of the profitability of the mining and transport system, which allows for consideration of the technical condition and economic efficiency of operation when formulating management decisions. Implementation of this approach enables multivariate scenario analysis, improved validity of repair planning, and optimized use of production resources.

Key words: information support, mining and transport complex, production capacity, management, efficiency, optimization, open-pit.

Введение

В условиях интенсивной эксплуатации горной техники обеспечение и повышение ее ресурсного потенциала являются одними из ключевых задач повышения эффективности горнодобывающего производства. Решение данной задачи связано с организацией эффективной системы управления техническим состоянием оборудования, учитывающей факторы, влияющие на его надежность, производительность и срок службы [1]. Комплексное управление процессами технического обслуживания и ремонта позволяет планировать и координировать мероприятия по поддержанию работоспособности техники, контролировать качество их выполнения и своевременно принимать решения, направленные на предотвращение отказов [2]. В современных условиях особую значимость приобретает переход от реактивного к проактивному управлению эксплуатацией оборудования, основанному на прогнозировании его технического состояния и анализе эксплуатационных данных [3].

Современное горнодобывающее производство характеризуется усложнением технологических процессов, увеличением масштабов работ и ужесточением требований к эффективности использования производственных ресурсов [4]. В связи с этим возрастает потребность во внедрении современных систем мониторинга, диагностики и планирования, обеспечивающих информаци-

онную поддержку принятия управленческих решений [5–8]. Их применение способствует повышению надежности оборудования, сокращению эксплуатационных затрат и более рациональному использованию производственного потенциала предприятий.

Особое значение для обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающих предприятий имеет управление процессами воспроизводства производственных мощностей горно-транспортных комплексов (ГТК) карьеров. Эффективность функционирования ГТК во многом определяется уровнем технической готовности оборудования, своевременностью его обновления и сбалансированностью структуры парка оборудования. В связи с этим актуальной научно-практической задачей является совершенствование информационно-аналитического обеспечения процессов управления воспроизводством производственных мощностей, направленное на повышение обоснованности управленческих решений и эффективности использования производственных ресурсов.

Методы исследования

В основу исследования положен системный подход к анализу и управлению процессами воспроизводства производственных мощностей горно-транспортных комплексов, который рассматривает горно-транспортную систему как иерархически организованную совокупность взаимос-

вязанных технических, технологических и организационно-экономических элементов.

В ходе работы применялись методы функционального анализа, позволившие выделить основные элементы системы управления производственными мощностями и определить характер их взаимодействия в рамках технологического процесса. Для оценки состояния и динамики изменения производственного потенциала использовались методы анализа эксплуатационных данных, включая обработку показателей технической готовности, надежности и эффективности использования горнотранспортного оборудования.

При разработке подходов к управлению воспроизводством мощностей применялись методы экономико-математического моделирования, обеспечивающие формализацию зависимостей между параметрами структуры парка оборудования, уровнем его загрузки и экономическими результатами эксплуатации. Это позволило обосновать рациональные пропорции обновления производственных ресурсов.

Для оценки эффективности принимаемых управленческих решений были использованы методы вариантов и сравнительного анализа, основанные на сопоставлении различных сценариев эксплуатации и обновления горно-транспортного парка с учетом ограничений по производственной мощности и нормативным срокам службы оборудования.

Дополнительно были применены методы имитационного моделирования, позволяющие исследовать поведение системы в условиях изменяющихся внешних и внутренних факторов, а также методы прогнозирования, направленные на оценку перспективного состояния производственных мощностей и потребности в их воспроизводстве.

Информационной базой исследования послужили данные о технической эксплуатации, ремонте и обновлении горно-транспортного оборудования горнодобывающих предприятий, а также нормативно-методические материалы, регламентирующие процессы управления производственными мощностями.

Результаты

В статье представлены результаты работ по совершенствованию информационно-аналитического обеспечения для поддержки процессов управления воспроизводством производственных мощностей горно-транспортных комплексов карьеров. Разрабатываемое решение ориентировано на автоматизацию процессов сбора, обработки и анализа эксплуатационных данных, а также на информационную поддержку принятия управленческих решений в области технической эксплуатации и развития производственных мощностей.

Данный комплекс функционирует как составной элемент корпоративной системы управления геотехнологическим производством и интегрируется с подсистемами календарного планирования, мониторинга работы оборудования и управления транспортными процессами [9–10]. Взаимодействие с другими компонентами информационной инфраструктуры обеспечивает формирование едино-

го информационного пространства, необходимого для повышения эффективности управления производственными активами и обеспечения устойчивого функционирования горно-транспортных комплексов [11].

Общая структура информационного обеспечения системы управления процессами воспроизводства производственных мощностей представлена на рис. 1.

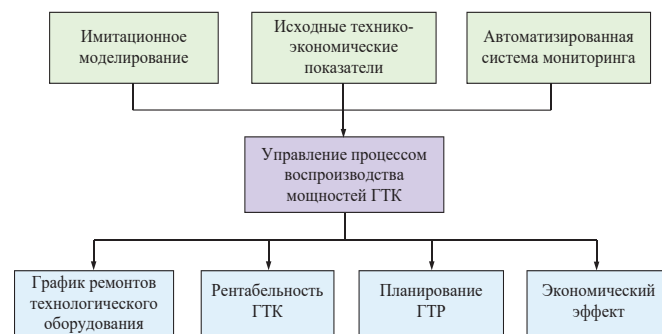


Рис. 1. Структура информационного обеспечения системы управления производственными мощностями ГТК.

Сурет 1. ТКК кешенінің өндірістік қуаттарын басқару жүйесін ақпараттық қамтамасыз ету құрылымы.

Figure 1. The structure of information support for the MTC production capacity management system.

Функциональные возможности информационно-аналитического управления производственными мощностями горно-транспортных комплексов обеспечивают:

- *оценку технического состояния и определение рациональных сроков эксплуатации оборудования с целью своевременного принятия решений о его модернизации, замене или выводе из эксплуатации;*
- *формирование и актуализацию планов технического обслуживания, ремонтов и воспроизводства производственных мощностей с учетом эксплуатационных и производственных факторов;*
- *анализ влияния возраста оборудования, показателей технической готовности, производительности и экономической эффективности на целесообразность его дальнейшего использования;*
- *поддержание оптимальной структуры и технического уровня парка оборудования на основе комплексной оценки его жизненного цикла и прогнозирования потребности в обновлении производственных мощностей;*
- *информационно-аналитическую поддержку оперативного планирования и управления процессами воспроизводства мощностей горно-транспортных комплексов, обеспечивающую сбалансированность производственных ресурсов и рациональное распределение нагрузки между технологическими звеньями;*
- *оптимизацию параметров эксплуатации оборудования с учетом нормативов, производственных планов и требований к эффективности использования ресурсов;*
- *обеспечение согласованного функционирования горного и транспортного оборудования посредством учета взаимосвязей между технологическими процессами добычи, транспортирования и разгрузки горной массы;*

– повышение обоснованности управленческих решений за счет использования данных мониторинга, прогнозных оценок и аналитических моделей управления производственными активами.

Поскольку структура парка технологического оборудования оказывает определяющее влияние на уровень производственной мощности предприятия, горно-транспортный комплекс рассматривается как многоуровневая система. Она включает как отдельные функциональные подсистемы, обеспечивающие выполнение технологических операций на производственных участках, так и интегрированный комплекс технических средств, формирующий единый производственный потенциал предприятия.

В этой связи управление процессами воспроизводства мощностей основывается на системном подходе, который предусматривает комплексный учет совокупности взаимосвязанных технических, технологических, организационных и экономических факторов, определяющих эффективность функционирования горно-транспортного комплекса. Принятие управленческих решений осуществляется на основе многовариантного анализа, результатов мониторинга технического состояния оборудования, диагностики и оценки эксплуатационных показателей технологических комплексов.

Особое внимание уделяется определению рациональных пропорций между отдельными видами технологического оборудования с учетом производственных задач, уровня загрузки и экономической эффективности их эксплуатации. Такой подход обеспечивает научно-обоснованное планирование обновления производственных мощностей, поддержание сбалансированной структуры парка оборудования и устойчивость производственных процессов на протяжении всего жизненного цикла горно-транспортного комплекса.

Функционирование информационно-программного комплекса основано на экономическом механизме, определяющем технико-организационную структуру системы машин и опирающемся на результаты многоуровневой диагностики горно-транспортного комплекса. В рамках данного подхода оценка состояния функционирующих ГТК осуществляется на двух взаимосвязанных уровнях: экспресс-оценке экономических и производственных показателей и углубленной диагностике технического состояния.

Результаты детальной диагностики позволяют сформировать комплексную оценку («диагноз») состояния исследуемого технологического комплекса с учетом его эксплуатационных особенностей, выполнить прогнозирование возможных последствий и рисков развития выявленных отклонений, а также определить резервы повышения эффективности использования существующих производственных мощностей.

Рентабельность функционирования ГТК карьера, предложенная в работе [10], представляет собой один из ключевых интегральных показателей эффективности его функционирования и отражает совокупный результат использования производственных ресурсов в системе горно-транспортного обеспечения. Применение данного показателя обеспечивает более обоснованную количественную оценку уровня вовлеченности и эффективности

использования производственных мощностей, а также служит основой для принятия управленческих решений, направленных на повышение экономической результативности эксплуатации оборудования.

Формирование уровня рентабельности продукции горно-транспортного комплекса осуществляется под влиянием комплекса взаимосвязанных производственно-экономических факторов, включающих горно-геологические условия разработки месторождения, технологические параметры ведения горных работ, уровень ценовой конъюнктуры на продукцию и ресурсы производства, структуру и уровень затрат, а также параметры системы оплаты труда. Между предприятиями наблюдается существенная вариативность значений данного показателя, обусловленная различиями в горно-геологических, горнотехнических, технологических и организационно-экономических условиях функционирования производственных систем.

Повышение рентабельности функционирования горно-транспортного оборудования достигается за счет комплекса взаимосвязанных организационно-технических и экономических мероприятий, включая увеличение стоимости реализуемой товарной руды, снижение удельных затрат на транспортирование горной массы, повышение эффективности использования основных производственных фондов и нормируемых оборотных средств, рост производительности труда, минимизацию простоев и непроизводительных потерь рабочего времени, а также совершенствование системы организационного управления и диспетчеризации транспортных процессов.

В настоящее время функционал программного модуля ориентирован на формирование графиков технического обслуживания и ремонтов основного технологического оборудования, включая экскаваторы, автосамосвалы и локомотивосоставы. В перспективе предусмотрено расширение информационной модели системы за счет включения объектов транспортной инфраструктуры карьера, таких как автомобильные дороги и схема путевого развития, что позволит повысить полноту учета факторов, влияющих на организацию и эффективность транспортных процессов.

Угруппированная блок-схема алгоритма функционирования информационно-программного комплекса представлена на рис. 2.

На первом этапе (блок 1) осуществляется формирование и структурирование исходной информационной базы, необходимой для выполнения расчетных и аналитических процедур комплекса.

Исходные данные организованы в виде структурированных таблиц и дифференцированы по трем основным группам для каждого типа оборудования. Первая группа включает эксплуатационную информацию (дата ввода в эксплуатацию, суммарная наработка, а также сведения о завершенных ремонтных воздействиях с указанием их вида и даты выполнения). Вторая группа содержит нормативно-производственные параметры, характеризующие показатели производительности оборудования. Третья группа включает нормативы ремонтных воздействий, в том числе регламентированные сроки и продолжительность выполнения различных видов ремонтов.

Для обеспечения корректного функционирования про-



Рис. 2. Укрупненная блок-схема алгоритма функционирования информационно-программного комплекса.

Сурет 2. Ақпараттық-бағдарламалық кешеннің жұмыс істеу алгоритмінің үлкейтілген блок-схемасы.
Figure 2. A simplified block diagram of the algorithm for operation of the information and software complex.

граммного модуля требуется предварительное заполнение всех входных информационных таблиц, после чего становится возможным выполнение расчетных процедур по планированию ремонтов горно-транспортного оборудования.

На этапе обработки данных (блок 2) осуществляется верификация полноты и корректности заполнения входной информационной базы. При выявлении отсутствующих или некорректно введенных значений формируется диагностическое сообщение с указанием соответствующей таблицы и характера выявленного несоответствия, что обеспечивает контроль качества исходных данных.

В блоке 3 выполняется расчет плановых ремонтных воздействий для горно-транспортного оборудования на заданный плановый период. Результаты расчетов формируются в виде выходных таблиц, содержащих сведения о видах ремонтов (текущие ремонты и капитальный ремонт), а также о планируемых сроках начала и завершения ремонтных работ по каждой единице оборудования.

На основании полученных результатов в блоке 4 осуществляется формирование календарно-сетевых графиков ремонтов для каждой единицы горного и транспортного оборудования с дифференциацией по видам ремонтных работ.

Обсуждение результатов

Представленные результаты свидетельствуют о том, что проведенные работы обеспечивают комплексный переход к интегрированному управлению процессами производ-

ства производственных мощностей горно-транспортных комплексов. Ключевым эффектом является объединение функций мониторинга, диагностики, планирования и оптимизации в едином информационном контуре, что повышает согласованность принимаемых управленческих решений.

Использование многоуровневой диагностики позволяет рассматривать состояние горно-транспортного комплекса не только с позиции текущих производственных показателей, но и с учетом его технического состояния и экономической эффективности. Такой подход обеспечивает формирование более обоснованных управленческих решений, ориентированных на предотвращение отказов и повышение эффективности использования оборудования.

Важным результатом является реализация многовариантного подхода к планированию ремонтных воздействий, основанного на моделировании различных сценариев эксплуатации оборудования. Это обеспечивает возможность выбора рациональных решений с учетом ограничений по производственной мощности, нормативов технического обслуживания и экономических критериев.

Отдельного внимания заслуживает использование показателя рентабельности функционирования ГТК как интегрального критерия эффективности. Его применение позволяет увязать технические решения по обновлению и обслуживанию оборудования с конечными экономическими результатами, что усиливает практическую значимость разработанного подхода.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы совершенствования информационного обеспечения управления производственными мощностями горно-транспортных комплексов карьеров в условиях усложнения технологических процессов и повышения требований к эффективности эксплуатации горно-транспортного оборудования. Показано, что повышение эффективности функционирования горно-транспортных систем во многом определяется уровнем развития информационно-аналитической поддержки процессов планирования, диагностики и управления техническим состоянием оборудования.

Разработанные подходы к формированию информационного обеспечения основаны на принципах системного анализа, комплексной диагностики технического состояния оборудования и использовании методов имитационного моделирования. Это позволяет обеспечить переход к многовариантному управлению процессами воспроизводства производственных мощностей с учетом фактического состояния техники, параметров эксплуатации и экономических критериев эффективности.

Реализация предложенных решений обеспечивает повышение обоснованности и оперативности управленческих решений, улучшение координации процессов технического обслуживания и ремонта, а также более рациональное использование производственных ресурсов горно-транспортных комплексов. Дополнительно достигается повышение устойчивости функционирования системы за счет учета взаимосвязей между техническим состоянием оборудования и его влиянием на производственную мощность предприятия.

Таким образом, совершенствование информационного обеспечения управления мощностями горно-транспортных комплексов карьеров создает основу для повышения эффективности их эксплуатации и формирования современного цифрового подхода к управлению производственными активами в горнодобывающей отрасли.

Благодарность

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пигалев И. М. Факторы повышения работоспособности горного оборудования // В поисках новых возможностей развития предприятия / под общ. ред. В. И. Усенко, А. М. Макарова. – Лисаковск; Челябинск, 2002. – С. 74–77 (на русском языке)
2. Сетевая платформа автоматизации прогнозирования отказов карьерных самосвалов / И. В. Зырянов [и др.] // Горная Промышленность. – 2024. – № 3. – С. 56–63 (на русском языке)
3. Буданов В. Г. Возможности повышения потенциала ремонтного производства // В поисках новых возможностей развития предприятия / под общ. ред. В. И. Усенко, А. М. Макарова. – Лисаковск; Челябинск, 2002. – С. 66–69 (на русском языке)
4. Šech J., Sofranko M. Экономический прогноз и оценка горнодобывающего предприятия // E + M Ekonomie a Management. – 2018. – Т. 21. – Вып. 2. – С. 38–52 (на английском языке)
5. Темкин И. О., Клебанов Д. А. Интеллектуальные системы управления горно-транспортными комплексами: современное состояние, задачи и механизмы решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. «Неделя Горняка – 2014». – 2014. – С. 8–13 (на русском языке)
6. Уточнение геотехнических параметров с помощью 3D-геотехнического моделирования для повышения надежности планирования горных работ / E. D. R. Aquino [и др.] // Mining Technology Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy. – 2024. – Т. 133. – Вып. 1. – С. 74–85 (на английском языке)
7. Tosun A. Определение оптимального количества самосвалов в открытом угольном карьере // Archives of Mining Sciences. – 2021. – Т. 66. – № 2. – С. 213–225 (на английском языке)
8. Обзор применения машинного обучения в планировании и составлении графиков подземных горных работ / P. Chimunhu [и др.] // Resources Policy. – 2022. – Т. 79. – Ст. 103067 (на английском языке)
9. Adilkhanova Z. A., Boyandinova A. A. Концепция системы управления технологическими процессами на карьерах // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying, Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2018). – Албена, Болгария, 2018. – С. 191–196 (на английском языке)
10. Бояндинова А. А., Адилханова Ж. А. Научно-методическое обеспечение геоинформационных систем технологического менеджмента на карьерах: монография. – Алматы, 2020. – 210 с. (на русском языке)
11. Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. Информационное обеспечение системы управления технологическими процессами на открытых карьерах // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying, Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2020). – Албена, Болгария, 2020. – С. 441–448 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Пигалев И. М. Тау-кен жабдықтарының жұмыс қабілеттілігін арттыру факторлары // Кәсіпорын дамуының жаңа мүмкіндіктерін іздеу / жалпы ред. В. И. Усенко, А. М. Макарова. – Лисаковск; Челябинск, 2002. – Б. 74–77 (орыс тілінде)
2. Карьерлік самосвалдардың істен шығуын болжауды автоматтандырудың желілік платформасы / И. В. Зырянов [және т. б.] // Тау-кен өнеркәсібі. – 2024. – № 3. – Б. 56–63 (орыс тілінде)
3. Буданов В. Г. Жөндеу өндірісінің әлеуетін арттыру мүмкіндіктері // Кәсіпорын дамуының жаңа мүмкіндіктерін іздеу / жалпы ред. В. И. Усенко, А. М. Макарова. – Лисаковск; Челябинск, 2002. – Б. 66–69 (орыс тілінде)
4. Šech J., Sofranko M. Тау-кен кәсіпорынының экономикалық болжамы және бағалауы // E + M Ekonomie a Management. – 2018. – Т. 21. – Шығ. 2. – Б. 38–52 (ағылшын тілінде)
5. Темкин И. О., Клебанов Д. А. Тау-кен көлік кешендерін басқарудың зияткерлік жүйелері: қазіргі жағдайы, міндеттері мен шешу тетіктері // Тау-кен ақпараттық-талдау Бюллетені. Арнайы шығарылым. «Кеншілер Апталығы – 2014». – 2014. – Б. 8–13 (орыс тілінде)
6. Тау-кен жұмыстарын жоспарлаудың сенімділігін арттыру үшін 3D геотехникалық модельдеу арқылы геотехникалық параметрлерді нақтылау / E. D. R. Aquino [және т. б.] // Mining Technology Transactions of the institutions of Mining and Metallurgy. – 2024. – Т. 133. – Шығ. 1. – Б. 74–85 (ағылшын тілінде)
7. Tosun A. Ашық көмір карьеріндегі самосвалдардың оңтайлы санын анықтау // Тау-кен ғылымдарының мұрағаты. – 2021. – Т. 66. – № 2. – Б. 213–225 (ағылшын тілінде)
8. Жер асты тау-кен жұмыстарын жоспарлау мен жоспарлауда машиналық оқытуды қолдануға шолу / P. Chimunhu [және т. б.] // Ресурстар саясаты. – 2022. – Т. 79. – 103067 (ағылшын тілінде)

9. Adilkhanova Z. A., Boyandinova A. A. Карьерлердегі технологиялық процестерді басқару жүйесінің тұжырымдамасы // *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying, Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2018)*. – Албена, Болгария, 2018. – Б. 191–196 (ағылшын тілінде)
10. Бояндинова А. А., Әділханова Ж. А. Карьерлердегі технологиялық менеджменттің геоақпараттық жүйелерін ғылыми-әдістемелік қамтамасыз ету: монография. – Алматы, 2020. – 210 б. (орыс тілінде)
11. Boyandinova A. A., Adilkhanova Z. A. Ашық карьерлердегі технологиялық процестерді басқару жүйесін ақпараттық қамтамасыз ету // *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying, Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2020)*. – Албена, Болгария, 2020. – Б. 441–448 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Pigalev I. M. Faktory povysheniya rabotosposobnosti gornogo oborudovaniya [Factors for Improving the Performance of Mining Equipment] // *V poiskakh novykh vozmozhnostei razvitiya predpriyatiya [In Search of New Opportunities for Enterprise Development]* / ed. by V. I. Usenko, A. M. Makarova. – Lisakovsk; Chelyabinsk, 2002. – P. 74–77 (in Russian)
2. Setevaya platforma avtomatizatsii prognozirovaniya otkazov kar'ernykh samosvalov [Network platform for automating the prediction of failures of quarry dump trucks]. I. V. Zyryanov et al. *Gornaya Promyshlennost' [Mining Industry]*. – 2024. – No. 3. – P. 56–63 (in Russian)
3. Budanov V. G. Vozmozhnosti povysheniya potentsiala remontnogo proizvodstva [Opportunities to Increase the Capacity of Repair Production]. *V poiskakh novykh vozmozhnostei razvitiya predpriyatiya [In Search of New Opportunities for Enterprise Development]* / ed. by V. I. Usenko, A. M. Makarova. – Lisakovsk; Chelyabinsk, 2002. – P. 66–69 (in Russian)
4. Čech J., Sofranko M. Economic projection and evaluation of mining venture // *E + M Ekonomie a Management*. – 2018. – Vol. 21. – Issue 2. – P. 38–52 (in English)
5. Temkin I. O., Klebanov D. A. Intel'lektual'nye sistemy upravleniya gorno-transportnymi kompleksami: sovremennoe sostojanie, zadachi i mehanizmy resheniya [Intelligent control systems for mining and transport complexes: current status, tasks and solution mechanisms]. *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten'. Special'nyj vypusk. «Nedelja Gornjaka-2014» [Mining information and analytical bulletin. Special issue. «Miner's Week – 2014»]*. – 2014. – P. 8–13 (in Russian)
6. Qualification of geotechnical parameters with 3D geotechnical modelling to improve mine planning reliability / E. D. R. Aquino et al. // *Mining Technology Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*. – 2024. – Vol. 133. – Issue 1. – P. 74–85 (in English)
7. Tosun A. Determination of Optimum Truck Number at open Coal Quarry // *Archives of Mining Sciences*. – 2021. – Vol. 66. – No. 2. – P. 213–225 (in English)
8. A review of machine learning applications for underground mine planning and scheduling / P. Chimunhu et al. // *Resources Policy*. – 2022. – Vol. 79. – Article 103067 (in English)
9. Adilkhanova Zh., Boyandinova A. Concept of Management System of Technological Processes at Open Pits // *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. – Albena, Bulgaria, 2018. – P. 191–196 (in English)
10. Boyandinova A. A., Adilkhanova Zh. A. Nauchno-metodicheskoe obespechenie geoinformatsionnykh sistem tekhnologicheskogo menedzhmenta na kar'erakh [Scientific and Methodological Support for Geoinformation Systems of Technological Management at Open-Pit Mines]: monograph. – Almaty, 2020. – 210 p. (in Russian)
11. Boyandinova A. A., Adilkhanova Zh. A. Information Support of the Process Management System at Open-Pit Mines // *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying, Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2020)*. – Albena, Bulgaria, 2020. – P. 441–448 (in English)

Сведения об авторах:

Бояндинова А. А., д. т. н., доцент, ученый секретарь Филиала РГП «НЦ КПМС РК» «Институт горного дела им. Д. А. Кунаева» (г. Алматы, Казахстан), A.Boyandinova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-5197-4599>

Адилханова Ж. А., к. т. н., гл. научный сотрудник Филиала РГП «НЦ КПМС РК» «Институт горного дела им. Д. А. Кунаева» (г. Алматы, Казахстан), Zhanna_mark10@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2637-4006>

Авторлар туралы мәліметтер:

Бояндинова Ә. Ә., т. ғ. д., доцент, «ҚР ҰК МҚК» РМҚ «Д. А. Қонаев атындағы Тау-кен институты» филиалының ғылыми хатшысы (Алматы қ., Қазақстан)

Әділханова Ж. А., т. ғ. к., «ҚР ҰК МҚК» РМҚ «Д. А. Қонаев атындағы Тау-кен институты» филиалының бас ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Boyandinova A. A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Scientific Secretary of the «Institute of Mining named after D. A. Kunayev» Branch of the «NC CPMS RK» RSE (Almaty, Kazakhstan)

Adilkhanova Zh. A., Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher of the «Institute of Mining named after D. A. Kunayev» Branch of the «NC CPMS RK» RSE (Almaty q., Kazakhstan)

Комплексные решения для процессов измельчения и дробления

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



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



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



**Специализированные
материалы и различные
габариты**



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

Эл.Почта:
mongolia@me-elecmetal.com

Код МРНТИ 38.35.21:38.37.17

*Е. С. Ли¹, В. Г. Степанец², В. Л. Левин³, С. Б. Иманбаева¹¹НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан),²Astra Mining Kazakhstan (г. Лондон, Великобритания),³ТОО «Институт геологических наук им. К. И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан)

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ И ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БАРИЙСОДЕРЖАЩЕЙ СЛЮДЫ

Аннотация. В статье проведен минералогический и петрографический анализ барийсодержащей слюды (барифенгита) из Северного Улытау, Казахстан. Химический состав изучен методом электроннозондового микроанализа. Показано, что минерал характеризуется высоким содержанием SiO_2 (49,31–53,31 мас. %) и BaO (1,90–5,32 мас. %), а также варьирующими концентрациями Na и Al . Сравнение с образцами из Швейцарии, США и Италии выявило больше FeO и MgO , чем у барифенгитов Беризала и Линкольн-Хилла, и более сложный химсостав, чем у фенгитов экологитов Вольтри. Минерал демонстрирует уникальные кристаллохимические особенности, отражающие гидротермальную активность региона. Данные расширяют понимание формирования барийсодержащих слюд в различных геологических условиях.

Ключевые слова: барифенгит, барийсодержащая слюда, кварцит, сланец, альбит, Северный Улытау.

Құрамында барий бар слюданың минералогиялық және петрографиялық талдауы

Аңдатпа. Мақалада Солтүстік Ұлытаудан (Қазақстан) алынған барийлі слюда (барифенгит) минералогиялық және петрографиялық талданды. Минерал құрамын электронды-зондты микроанализ әдісімен зерттеді. Минералдың SiO_2 мөлшері жоғары (49,31–53,31 масс. %) және BaO (1,90–5,32 масс. %), сондай-ақ Na және Al концентрациялары әрқелкі екені көрсетілді. Швейцария, АҚШ және Италиядан алынған үлгілермен салыстырғанда, Солтүстік Ұлытау барифенгитінде Беризал мен Линкольн-Хилл барифенгиттерінен көбірек FeO және MgO бар және Вольтри тобының эклогит фенгиттеріне караганда химиялық құрамы күрделірек. Минерал аймақтың гидротермальдық белсенділігін көрсететін ерекше кристаллохимиялық қасиеттерге ие. Алынған мәліметтер барийлі слюдалардың әртүрлі геологиялық жағдайларда қалыптасуын түсінуді кеңейтеді.

Түйінді сөздер: барифенгит, құрамында барий бар слюда, кварцит, тақтатаас, альбит, Солтүстік Ұлытау.

Mineralogical and petrographic analysis of barium-bearing mica

Abstract. The article presents a mineralogical and petrographic analysis of barium-bearing mica (bariophengite) from Northern Ulytau, Kazakhstan. The chemical composition was studied using electron probe microanalysis. It was shown that the mineral is characterized by high SiO_2 content (49.31–53.31 wt.%) and BaO (1.90–5.32 wt.%), as well as variable concentrations of Na and Al . Comparison with samples from Switzerland, the USA, and Italy revealed higher FeO and MgO contents than in the bariophengites from Berisal and Lincoln Hill, and a more complex chemical composition than in the phengites of the Voltri eclogite group. The mineral exhibits unique crystallochemical features reflecting the hydrothermal activity of the region. These data expand the understanding of the formation of barium-bearing micas under different geological conditions.

Key words: bariophengite, barium-containing mica, quartzite, schist, albite, Northern Ulytau.

Введение

Барийсодержащая слюда (барифенгит) представляет собой уникальный минерал, обнаруженный в альбито-кварцевых и графитизированных кварцевых флюидизатах Северного Улытау. Его минералогический состав, текстурные особенности и химические характеристики имеют важное значение для понимания геохимических и петрологических процессов, протекавших в данном регионе. В данной статье проводится всесторонний анализ барифенгита, включая его морфологию, химический состав и особенности кристаллохимии.

Краткое геологическое строение

В пределах Северного Улытау в бассейне реки Кара-Тургай традиционно выделяются три протерозойские серии [1] – бектурганская, аралбайская и карсакпайская, которые перекрыты кайнозойскими отложениями. Наибольшим распространением в среднем течении реки Кара-Тургай пользуются образования карсакпайской серии [2], которая представлена нерасчлененными образованиями – это серицито-кварцевые, хлорито-кварцевые сланцы, порфиroidы, амфиболово-плагноклазовые, хлорито-альбитовые, мусковито-альбит-кварцевые сланцы, мраморы, кварциты, железистые кварциты. Возраст карсакпайской серии условно принят верхнепротерозойским согласно положению в разрезе относительно пород аралбайской серии [2]. С породами карсакпайской серии сопряжены выходы пикрито-риолитового комплекса.

Методы исследования

Породообразующие минералы были идентифицированы в шлифах и аншлифах в Лаборатории минералогии ТОО ИГН им. К. И. Сатпаева (Алматы, Казахстан). Для изучения барифенгита использовались электроннозондовый микроанализ (ЕРМА) для определения химического состава минерала, включая концентрации Ba , K , Al , Si , Mg и Fe , проведенный при стандартных условиях: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток пучка 20 нА, диаметр пучка 1–2 мкм, точность ± 1 –2 мас. % и пределы обнаружения 0,01–0,05 мас. %; рентгенофазовый анализ (РФА) для установления кристаллической структуры и фазового состава минералов; оптическая микроскопия для изучения морфологии минералов и их текстурных особенностей (рис. 1); сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) для детального исследования микроструктуры и включений в минерале; ЭДРФА, проведенный с использованием лабораторного спектрометра РЛП-21Т (ТОО «АспапГЕО», Алматы, Казахстан). Применение этих методов позволило комплексно охарактеризовать химические, структурные и текстурные особенности барифенгита и породообразующих минералов.

Результаты и обсуждение

Химический состав барифенгита. Барифенгит характеризуется содержанием BaO от 1,90 до 5,32 мас. %, K_2O – от 9,78 до 11,10 мас. %, Na_2O – от 0,04 до 0,63 мас. %. Высокие концентрации SiO_2 (49,31–53,31 мас. %) свидетельствуют о кремниевой насыщенности минерала. Также

отмечены примеси **FeO** (2,10–6,16 мас. %) и **MgO** (2,25–3,01 мас. %), что может указывать на процессы перекри-

сталлизации и миграции элементов в ходе постмагматических процессов (таблица 1).

Таблица 1

Состав (мас. %) бариофенгита по данным электроннозондового микроанализа

Кесте 1

Электрондық зонд микроталдау деректеріне сәйкес бариофенгиттің құрамы (мас. %)

Table 1

Composition (wt. %) of baryophengite according to electron probe microanalysis data

БАКФ										
Проба	1					2				
Компоненты	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
SiO₂	50.50	50.88	50.19	51.15	49.31	51.29	51.97	50.01	50.08	49.90
TiO₂	0.07	0.16	0.38	0.28	0.18	0.22	0.07	0.13	0.37	0.10
Al₂O₃	29.00	28.44	28.42	28.89	30.58	28.55	28.51	30.14	30.45	28.42
FeO	3.58	3.75	4.16	3.24	2.60	3.56	3.38	3.37	2.10	4.57
MgO	2.90	3.00	2.04	2.93	2.63	2.81	2.74	2.24	2.53	2.55
MnO	0.00	0.34	0.11	0.18	0.19	0.22	0.07	0.19	0.22	0.07
K₂O	10.74	10.99	10.48	10.42	10.82	11.25	10.83	10.37	10.53	10.97
Na₂O	0.26	0.13	0.63	0.41	0.33	0.28	0.32	0.33	0.28	0.23
BaO	2.94	2.31	3.58	2.48	3.36	1.90	2.00	3.23	3.44	3.18
БАКФ										
Проба	3					4	5	6	7	8
Компоненты	1	2	3	4	5					
SiO₂	50.22	50.63	51.24	50.34	50.10	51.45	50.74	50.87	53.37	51.67
TiO₂	0.24	0.19	0.23	0.15	0.04					
Al₂O₃	28.59	28.66	28.45	28.78	29.79	28.51	27.35	27.84	26.40	28.20
FeO	3.85	3.89	3.52	3.87	3.11	3.68	3.61	4.51	4.05	3.54
MgO	2.55	2.79	2.81	2.46	2.78	2.28	3.31	2.75	2.68	2.24
MnO										
K₂O	10.98	10.93	10.78	10.76	10.86	9.8	10.48	10.36	10.01	9.93
Na₂O	0.25	0.21	0.33	0.44	0.46	1.03	0.18	0.40	0.20	1.01
BaO	3.32	2.70	2.65	3.20	2.86	3.19	4.09	3.26	3.30	3.41
ГКФ										
Компоненты	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
SiO₂	50.10	51.16	50.68	50.13	51.82	50.10	48.87	48.75	49.70	48.39
TiO₂	0.32	0.34	0.06	0.02	0.15	0.19	0.39	0.33	0.32	0.09
Al₂O₃	28.22	27.95	28.06	28.90	27.76	28.21	27.13	28.46	27.87	28.22
FeO	2.91	2.95	3.10	3.60	3.15	3.04	4.36	5.64	4.10	4.91
MgO	3.41	3.27	3.54	2.49	3.20	3.15	3.00	2.07	2.77	2.52
MnO										
K₂O	10.69	10.30	10.32	10.38	10.58	10.36	10.36	10.18	9.91	10.12
Na₂O	0.45	0.36	0.29	0.40	0.25	0.30	0.04	0.34	0.15	0.43
BaO	3.90	3.68	4.08	4.07	3.09	4.65	4.93	4.23	5.17	5.32

Примечание: БАКФ – бариофенгито-альбито-кварцевый флюидизат; ГКФ – графитизированный кварцевый флюидизат. Формульные коэффициенты вынесены в приложение.

Формульные коэффициенты

БАКФ										
Проба	1					2				
Компоненты	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	Формульные коэффициенты в расчете на 11 атомов кислорода									
<i>Si a.p.f.u.</i>	3.308	3.327	3.316	3.329	3.234	3.340	3.364	3.274	3.267	3.300
<i>Al^{IV}</i>	0.692	0.663	0.687	0.671	0.766	0.660	0.636	0.726	0.733	0.700
<i>T site</i>	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
<i>Al^{VI}</i>	1.546	1.519	1.529	1.544	1.597	1.531	1.556	1.600	1.609	1.515
<i>Ti</i>		0.008	0.019	0.014	0.009	0.011	0.003	0.006	0.018	0.005
<i>Fe²⁺</i>	0.196	0.205	0.230	0.176	0.143	0.194	0.184	0.184	0.115	0.253
<i>Mg</i>	0.28	0.293	0.201	0.284	0.257	0.273	0.266	0.219	0.246	0.251
<i>Mn</i>		0.019	0.006	0.010	0.011	0.012	0.004	0.011	0.012	0.004
<i>M site</i>	2.029	2.043	1.984	2.028	2.016	2.020	2.014	2.020	2.00	2.028
<i>K</i>	0.897	0.917	0.883	0.865	0.905	0.934	0.901	0.866	0.88	0.925
<i>Na</i>	0.033	0.016	0.081	0.052	0.042	0.035	0.040	0.042	0.04	0.029
<i>Ba</i>	0.075	0.059	0.093	0.063	0.086	0.048	0.051	0.083	0.100	0.082
<i>I site</i>	1.006	0.992	1.057	0.980	1.033	1.018	0.993	0.991	1.000	1.037
Σ cations	7.035	7.036	7.041	7.008	7.049	7.039	7.007	7.011	7.000	7.065
<i>Fe + Mg</i>	0.476	0.498	0.431	0.460	0.400	0.467	0.450	0.403	0.361	0.504
<i>Fe + Mg + Si</i>	3.784	3.825	3.747	3.789	3.634	3.807	3.814	3.677	3.628	3.804
БАКФ										
Проба	3					4	5	6	7	8
Компоненты	1	2	3	4	5					
	Формульные коэффициенты в расчете на 11 атомов кислорода									
<i>Si a.p.f.u.</i>	3.310	3.318	3.345	3.312	3.277	3.363	3.357	3.353	3.481	3.380
<i>Al^{IV}</i>	0.690	0.682	0.655	0.688	0.723	0.637	0.643	0.647	0.519	0.620
<i>T site</i>	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
<i>Al^{VI}</i>	1.530	1.531	1.534	1.543	1.574	1.560	1.490	1.516	1.510	1.555
<i>Ti</i>	0.012	0.009	0.011	0.007	0.002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Fe²⁺</i>	0.212	0.213	0.192	0.213	0.170	0.201	0.200	0.249	0.221	0.194
<i>Mg</i>	0.251	0.273	0.274	0.241	0.271	0.222	0.327	0.270	0.261	0.218
<i>Mn</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>M site</i>	2.005	2.026	2.011	2.004	2.017	1.983	2.016	2.034	1.991	1.967
<i>K</i>	0.923	0.914	0.898	0.903	0.906	0.817	0.885	0.871	0.833	0.829
<i>Na</i>	0.032	0.027	0.042	0.056	0.058	0.131	0.023	0.023	0.025	0.128
<i>Ba</i>	0.086	0.069	0.068	0.082	0.073	0.082	0.106	0.084	0.084	0.087
<i>I site</i>	1.041	1.010	1.007	1.042	1.038	1.029	1.014	0.978	0.942	1.044
Σ cations	7.046	7.07	7.019	7.045	7.055	7.012	7.030	7.013	6.964	7.011
<i>Fe + Mg</i>	0.463	0.486	0.466	0.454	0.441	0.421	0.527	0.519	0.482	0.412
<i>Fe + Mg + Si</i>	3.773	3.804	8.811	3.766	3.718	3.784	3.884	3.872	3.963	3.792
ГКФ										
Компоненты	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
	Формульные коэффициенты в расчете на 11 атомов кислорода									
<i>Si a.p.f.u.</i>	3.303	3.325	3.335	3.308	3.382	3.314	3.298	3.258	3.309	3.253
<i>Al^{IV}</i>	0.697	0.675	0.665	0.692	0.618	0.686	0.702	0.742	0.691	0.747

Продолжение приложения

<i>T</i> site	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
<i>Al^{VI}</i>	1.495	1.508	1.511	1.555	0.618	1.513	1.456	1.500	1.496	1.489
<i>Ti</i>	0.016	0.017	0.003	0.001	0.007	0.009	0.020	0.017	0.016	0.005
<i>Fe²⁺</i>	0.160	0.164	0.171	0.199	0.172	0.168	0.246	0.315	0.228	0.276
<i>Mg</i>	0.335	0.323	0.347	0.245	0.311	0.311	0.302	0.206	0.275	0.253
<i>Mn</i>										0.00
<i>M</i> site	2.006	2.012	2.031	2.00	2.008	2.001	2.024	2.038	2.016	2.022
<i>K</i>	0.899	0.871	0.866	0.874	0.881	0.874	0.892	0.868	0.842	0.868
<i>Na</i>	0.058	0.046	0.037	0.051	0.032	0.038	0.005	0.044	0.019	0.056
<i>Ba</i>	0.101	0.096	0.091	0.105	0.079	0.121	0.130	0.111	0.135	0.140
<i>I</i> site	1.057	1.013	0.994	1.030	0.991	1.033	1.028	1.023	0.996	1.064
Σ cations	7.064	7.025	7.026	7.030	6.999	7.034	7.051	7.060	7.012	7.086
<i>Fe + Mg</i>	0.495	0.484	0.518	0.444	0.483	0.479	0.546	0.521	0.593	0.529
<i>Fe + Mg + Si</i>	3.798	3.809	3.853	3.752	3.865	3.793	3.844	3.779	3.902	3.782

Примечание: *a.p.f.u* – число атомов в формульной единице; БАКФ – бариофенгито-альбито-кварцевый флюидизит; ГКФ – графитизированный кварцевый флюидизит.

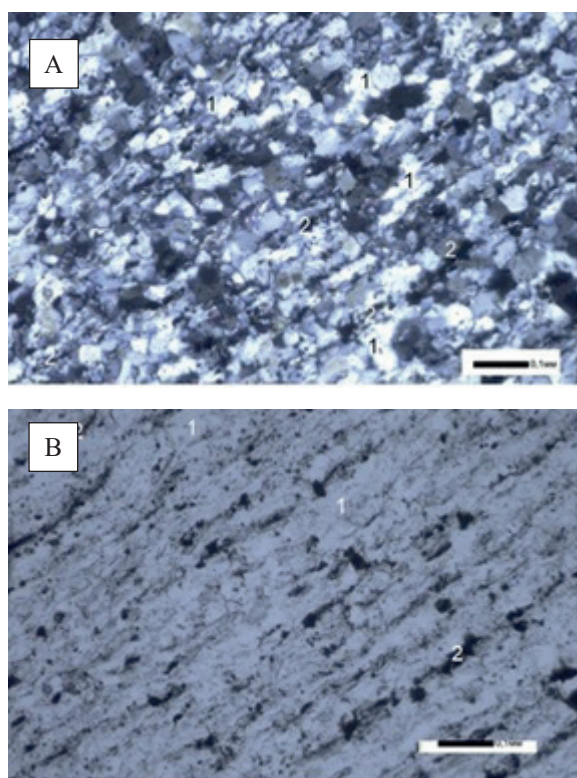


Рис. 1. Шлиф, увел 100. Ник +.

А) Слюдисто-альбито-кварцевая порода с кварцем (1) и белая слюда (2). В) Графитизированный кварц. Кварц (1), графитовое вещество (2).

Сурет 1. Жылтыратылған, ұлғайтылған 100. Ник +.

А) Кварцты (1) және ақ слюдамен (2) слюда-альбит-кварцты жыныс. В) Графиттелген кварц. Кварц (1), графит заты (2).

Figure 1. Section, magnification 100. Nick +.

А) Mica-albite-quartz rock with quartz (1) and white mica (2).

В) Graphitized quartz. Quartz (1), graphite substance (2).

Морфология и текстурные особенности. Бариофенгит встречается в виде пластинчатых и игольчатых кристаллов, образующих текстуры в ассоциации с альбитом и кварцем. Кристаллы имеют тенденцию к образованию параллельных агрегатов, что характерно для гидротермально измененных пород. В некоторых образцах бариофенгит включает мелкие зерна циркона и монацита, что свидетельствует о сложной истории его формирования.

Проведенное сравнение бариофенгита из Северного Улытау с аналогами из других месторождений, таких как Беризал (Швейцария), Линкольн-Хилл (США) и Вольтри (Италия), показало его схожесть по содержанию бария, но отличия в содержании натрия и алюминия. В частности, исследуемый минерал демонстрирует более сложный химический состав, что может быть обусловлено специфическими геохимическими условиями формирования породы.

Для сопоставления пород и бариофенгита была использована трехкомпонентная диаграмма **Ba-Na-K** (Raith et al., 2014). Эта диаграмма позволяет рассматривать барийсодержащие слюды в системе координат мусковит-гантерит-парагонит, отражающую сложную систему тройного твердого раствора. Результаты электроннозондового микроанализа показали, что исследуемые слюды можно подразделить на две группы: первая содержит крайне низкие концентрации оксида натрия (0.04–0.18 мас. %), вторая группа – относительно высокие количества оксида натрия (> 0.20 мас. %) (таблица 1, рис. 2), что отличает их от ранее описанных барийсодержащих слюд, в упомянутых ранее опубликованной в работе (Raith et al., 2014).

Особо следует упомянуть о барийсодержащих слюдах гидротермального месторождения дюмортьерита Линкольн-Хилл около Ореаны, штат Невада, США [4]. Эти слюды содержат низкие, но постоянные концентрации *Na*, это дало основание С. Ма и Г. Р. Россману [4] высказать

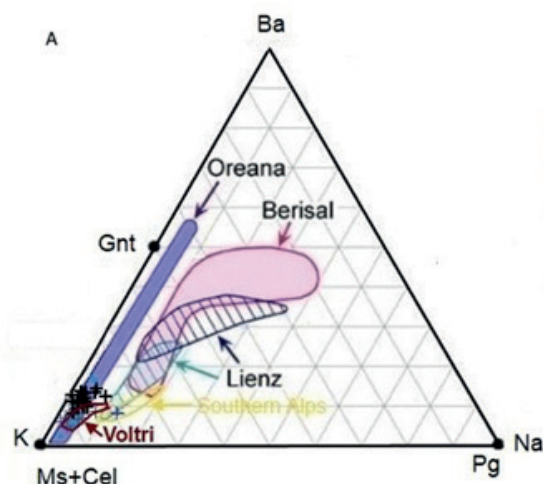


Рис. 2. Трехкомпонентная диаграмма Ba-Na-K (а.р.ф.у) для сопоставления Ва-фенгита карсакапской серии с таковыми: гранат-биотит-мусковитовых гнейсов комплекса Беризал (Berisal), Швейцария [3], думортьерита месторождения Линкольн-Хилл в Ореане (Oreana), США [4] и зоны контакта массива Лиенца (Lienz), Австрия [5], кварцево-полевошпатовых сланцев Южных Альп (Alps), Новой Зеландия [6], фенгитом эклогитов группы Вольтри (Voltri), Италия [7].

Фазовые компоненты: Ms – мусковит, Gnt – гунтерит, Cel – целадонит, Pg – паргонит. Черным крестом обозначен бариофенгит графитизированного кварца, а синим крестом – бариофенгито-альбито-кварцевого флюидизата.

Сурет 2. Карсакапай тобындағы Ба-фенгитті салыстыратын үш компонентті Ва-На-К (а.р.ф.у) диаграммасы: Берисал кешенінің гранат-биотит-мусковит гнейстері, Швейцария [3], Ореанадағы Линкольн-Хилл кен орнының думортиериті және АҚШ-тың Линкольн-Хилл кен орнының думортиериті, Линц зонасы, АҚШ-тың байланыс аймағы [4]. [5], Оңтүстік Альпі, Жаңа Зеландиядағы кварцты дала шпаттары [6] және Вольтри тобының эклогиттерінің фенгиті, Италия [7].

Фазалық компоненттер: Ms – мусковит, Гнт – гунтерит, Cel – целадонит, Pg – паргонит. Қара крест графиттелген кварцтың бариофенгитін, ал көк крест бариофенгит-альбит-кварцты флюидизацияны көрсетеді.

Figure 2. Three-component Ba-Na-K diagram (a.p.f.u) for comparison of Ba-phengite of the Karsakpai series with those of: garnet-biotite-muscovite gneisses of the Berisal complex, Switzerland [3], dumortierite of the Lincoln Hill deposit in Oreana, USA [4] and the contact zone of the Lienz massif, Austria [5], quartz-feldspar schists of the Southern Alps, New Zealand [6], phengite of the eclogites of the Voltri group, Italy [7].

Phase components: Ms – muscovite, Gnt – gunterite, Cel – celadonite, Pg – paragonite. The black cross denotes baryophengite of graphitized quartz, and the blue cross – baryophengite-albite-quartz fluidizate.

мнение, что существуют чисто бинарные твердые растворы **К-Ва**. Изученные нами светлые белые слюды, содержащие барий, по содержанию оксида натрия подразделяются на две группы, обладающие неширокой амплитудой колебания – **BaO** (1.90–5.32 мас. %). Для них также характерны высокие концентрации **SiO₂** (49.31–53.31 мас. %) и примеси – **FeO** (2.10–6.16 мас. %), **MgO** (2.25–3.01 мас. %), что выше, чем в ранее исследованных барийсодержащих слюдах изоморфного ряда мусковит-гантерит-парагонит [3, 5, 6, 7]. По-видимому, исключение составляет богатый барием фенгит эклогитов группы Вольтри, Италия [7], имеющий относительно невысокие концентрации **Na₂O** и **TiO₂**, что характерно и для изученной нами барийсодержащей слюды. Фенгит [8], как и исследуемые нами светлые слюды, содержат относительно большое количество кремния с тетраэдрической координацией (3.26–3.47 а.р.ф.у). Эти пределы Si (а.р.ф.у.), К (< 0.923 а.р.ф.у.) диоктаэдрической (двухвалентными катионами – **Fe**, **Mg**, **Mn**, **Ti**) белой слюды указывают, что фенгит находится между соединениями мусковит-алюминоселадонита и мусковит-селадонита. Полученные значения а.р.ф.у (таблица 1) сближают изученный нами бариофенгит с идеальной формулой фенгита **KAl_{1,5}(Mg,Fe)_{0,5}Si_{3,5}Al_{0,5}O₁₀(OH)₂** по С.В. Бейли [9]. В настоящее время фенгит дискредитирован Международной минералогической ассоциацией как самостоятельный минеральный вид (Номенклатура слюд, 1998). По отношению **Al₂O₃** к **MgO** (мас. %) бариофенгит отвечает глиноземистой магматической серии по [10].

Основные выводы

1. Барийсодержащая слюда, идентифицированная как бариофенгит, образовалась в результате сложных магматических и гидротермальных процессов, что указывает на многостадийность эволюции пород Северного Улытау.

2. Морфологические и химические особенности минерала свидетельствуют о его генетической связи с газонасыщенными кислыми магмами, что позволяет использовать бариофенгит как индикатор магматической активности и минерагенических процессов.

3. Сравнение с аналогичными минералами из других регионов выявило уникальные химические признаки бариофенгита Северного Улытау, что расширяет базу данных для минералогической характеристики редкометалльных объектов.

4. Дальнейшие исследования механизма формирования и трансформации бариофенгита в природных условиях имеют важное прикладное значение: они могут повысить эффективность прогнозирования редкометалльного оруденения и использоваться в геологоразведочной практике для поиска перспективных месторождений.

Благодарность

Исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по реализации научной, научно-технической программы ИРН № BR24993009.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вишневская И. И., Трусова И. Ф. Западно-Улытауский пояс ультраосновных и основных пород // Геология и разведка. – 1967. – № 11. – С. 32–43 (на русском языке)
2. Геологическая карта. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист М-(41), 42. Целиноград (Ақмола): объяснительная записка. – СПб.: Наука, 1993. – 145 с. (на русском языке)
3. Graeser S., Hetherington C. J., Gierke R. Гантерит – новый барий-доминантный аналог мусковита из комплекса Беризаль, район Симплон, Швейцария // *The Canadian Mineralogist*. – 2003. – Т. 41. – С. 1271–1280 (на английском языке)
4. Green D. I., Cotterell T. F., Tindle A. G. Изоморфное замещение бария в мусковите с замечанием о гантерите // *Journal of the Russell Society*. – 2019. – Т. 22. – С. 48–58 (на английском языке)
5. Tribus M., Tropper P., Haefeker U. Акцессорные минералы при контактном метаморфизме II: кристаллохимия и рамановская спектроскопия барийсодержащих белых слюд из внутренней контактной ореолы Лиенц/Эденвальдского тоналита // Кристаллы, минералы и материалы: совместная конференция Немецкого кристаллографического общества, Немецкого минералогического общества, Австрийского минералогического общества: сб. тезисов. – Зальцбург: Ольденбург Ферлаг, Мюнхен, 2011. – С. 108 (на английском языке)
6. Grapes R. H. Бариевая слюда и распределение бария в метакертах и кварц-полевошпатовых сланцах Южных Альп, Новая Зеландия // *Mineralogical Magazine*. – 1993. – Т. 57. – С. 265–272 (на английском языке)
7. Динамика эксгумации высокобарических метаморфических пород из блока Вольтри, Западные Альпы: данные рубидий-стронциевой геохронологии по фенгиту / A. J. Smye [и др.] // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2021. – Т. 176. – С. 14 (на английском языке)
8. Минеральная химия, ближняя и средняя инфракрасная спектроскопия отражения фенгита из месторождения Олимпик-Дэм типа IOCG, Южная Австралия / M. C. Tappert [и др.] // *Ore Geology Reviews*. – 2013. – Т. 53. – С. 26–38 (на английском языке)
9. Bailey S. V. Кристаллохимия истинных слюд // Слюды. Обзоры по минералогии / под ред. С. В. Бейли. – Вашингтон: Минералогическое общество Америки, 1984. – Т. 13. – С. 13–60 (на английском языке)
10. Современные достижения в изучении минералогии магматических и гидротермальных биотитов / P. Tang [и др.] // *Acta Geologica Sinica*. – 2019. – Т. 93. – № 6. – С. 1947–1966 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Вишневская И. И., Трусова И. Ф. Батыс Ұлытау ультраһегізгі және һегізгі жыһыһтары белдеуі // Геология және барлау. – 1967. – № 11. – Б. 32–43 (орыс тілінде)
2. Геологиялық карта. Масштаб 1:1 000 000 (жаңа серия). М-(41), 42 парағы. Целиноград (Ақмола): түсіндірме жазба. – СПб.: Ғылым, 1993. – 145 б. (орыс тілінде)
3. Graeser S., Hetherington C. J., Gierke R. Гантерит – Швейцария, Симплон аймағындағы Беризаль кешенінен табылған барийге бай, мусковитке ұқсас жаңа минерал // *The Canadian Mineralogist*. – 2003. – Т. 41. – Б. 1271–1280 (ағылшын тілінде)
4. Green D. I., Cotterell T. F., Tindle A. G. Мусковиттегі барийдің изоморфты орынбасуы және гантерит туралы ескерту // *Journal of the Russell Society*. – 2019. – Т. 22. – Б. 48–58 (ағылшын тілінде)
5. Tribus M., Tropper P., Haefeker U. Контакттілі метаморфизм жағдайындағы акцессорлық минералдар II: Лиенц/Эденвальд тоналитінің ішкі контакттілі ореолындағы барийлі ақ слюдалардың кристаллохимиясы және Раман спектроскопиясы // «Кристалдар, минералдар және материалдар»: Германия кристаллография қоғамы, Германия минералогия қоғамы және Австрия минералогия қоғамының бірлескен конференциясы: тезистер жинағы. – Зальцбург: Ольденбург Ферлаг, Мюнхен, 2011. – Б. 108 (ағылшын тілінде)
6. Grapes R. H. Барийлі слюда және барийдің таралуы Оңтүстік Альпідегі метакерттер мен кварц-плагиоклазды тақтатастарда, Жаңа Зеландия // *Mineralogical Magazine*. – 1993. – Т. 57. – Б. 265–272 (ағылшын тілінде)
7. Вольтри блогындағы (Батыс Альпілер) жоғары қысымды метаморфтық жыныстардың эксгумация динамикасы: фенгит бойынша рубидий-стронций геохронологиясы негізіндегі мәліметтер / A. J. Smye [және т. б.] // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2021. – Т. 176. – Б. 14 (ағылшын тілінде)
8. Оңтүстік Аустралиядағы Олимпик Дэм типіндегі IOCG кен орнының фенгиттерінің минералдық химиясы, жақын және орташа ИҚ шағылысу спектроскопиясы / M. C. Tappert [және т. б.] // *Ore Geology Reviews*. – 2013. – Т. 53. – Б. 26–38 (ағылшын тілінде)

9. Bailey S. V. Шынайы слюдалардың кристаллохимиясы // Слюдалар. Минералогия бойынша шолулар / ред. С. В. Бэйли. – Вашингтон: Американың минералогиялық қоғамы, 1984. – Т. 13. – Б. 13–60 (ағылшын тілінде)
10. Магмалық және гидротермальды биотит минералогиясын зерттеудегі қазіргі жетістіктер / P. Tang [және т. б.] // *Acta Geologica Sinica*. – 2019. – Т. 93. – № 6. – Б. 1947–1966 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Vishnevskaya I. I., Trusova I. F. Zapadno-Ulytauskij poyas ul'traosnovnykh i osnovnykh porod [The Western Ulytau belt of ultrabasic and basic rocks]. *Geologiya i razvedka [Geology and Exploration]*. – 1967. – No. 11. – P. 32–43 (in Russian)
2. *Geologicheskaya karta. Masshtab 1:1 000 000 (novaya seriya). List M-(41), 42. Tselinograd (Akmola) [Geological map. Scale 1:1,000,000 (new series). Sheet M-(41), 42. Tselinograd (Akmola)]*: *objasnitel'naja zapiska*. – St. Petersburg: Nauka, 1993. – 145 p. (in Russian)
3. Graeser S., Hetherington C. J., Gieré R. Ganterite, a new Ba-dominant analogue of muscovite from the Berisal Complex, Simplon Region, Switzerland // *The Canadian Mineralogist*. – 2003. – Vol. 41. – P. 1271–1280 (in English)
4. Green D. I., Cotterell T. F., Tindle A. G. Barium substitution in muscovite with a comment on ganterite // *Journal of the Russell Society*. – 2019. – Vol. 22. – P. 48–58 (in English)
5. Tribus M., Tropper P., Haefeker U. Accessory minerals in contact metamorphism II: crystal chemistry and Raman spectroscopy of Ba-rich white micas from the innermost contact aureole of the Lienz/Edenwald tonalite // *Joint Meeting DGK, DMG, OMG «Crystals, Minerals and Materials»: abstract volume*. – Salzburg: Oldenbourg Verlag-Munchen, 2011. – P. 108 (in English)
6. Grapes R. H. Barian mica and distribution of barium in metacherts and quartzofeldspathic schists, Southern Alps, New Zealand // *Mineralogical Magazine*. – 1993. – Vol. 57. – P. 265–272 (in English)
7. Exhumation dynamics of high-pressure metamorphic rocks from the Voltri Unit, Western Alps: Constraints from phengite Rb–Sr geochronology / A. J. Smye et al. // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2021. – Vol. 176. – P. 14 (in English)
8. The mineral chemistry, near-infrared, and mid-infrared reflectance spectroscopy of phengite from the Olympic Dam IOCG deposit, South Australia / M. C. Tappert et al. // *Ore Geology Reviews*. – 2013. – Vol. 53. – P. 26–38 (in English)
9. Bailey S. V. Crystallochemistry of true micas // *Micas. Reviews in Mineralogy* / ed. by S. V. Bailey. – Washington, D.C.: Mineralogical Society of America, 1984. – Vol. 13. – P. 13–60 (in English)
10. Advances in research of mineral chemistry of magmatic and hydrothermal biotites / P. Tang et al. // *Acta Geologica Sinica*. – 2019. – Vol. 93. – P. 1947–1966 (in English)

Сведения об авторах:

Ли Е. С., ст. преподаватель кафедры «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), antonova_elenit@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4856-5222>

Степанец В. Г., главный геолог Astra Mining Kazakhstan (г. Лондон, Великобритания), wladimir@stepanec.de; <http://orcid.org/0000-0001-9771-5026>

Левин В. Л., ст. научный сотрудник ИГН им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), levin_v@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0002-6945-0371>

Иманбаева С. Б., и. о. доцента кафедры «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых», НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова» (г. Караганда, Казахстан), svetakaz77@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0049-2642>

Авторлар туралы мәліметтер:

Ли Е. С., «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ «Пайдалы қазбалар кен орындарын барлау» кафедрасының аға оқытушысы (Қарағанды қ., Қазақстан)

Степанец В. Г., Astra Mining Kazakhstan бас геологы (Лондон қ., Ұлыбритания)

Левин В. Л., аға ғылыми қызметкер, Сәтбаев атындағы геологиялық ғылымдар институты (Алматы қ., Қазақстан)

Иманбаева С. Б., «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ «Пайдалы қазбалар кен орындарын барлау» кафедрасының доцент м. а. (Қарағанды қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Li E. S., Senior Lecturer of the Department of Geology and Exploration of Mineral Deposits, «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)

Stepanets V. G., Chief Geologist of Astra Mining Kazakhstan (London, UK)

Levin V. L., Senior Researcher of the IGS named after K. Satpayev (Almaty, Kazakhstan)

Imanbaeva S. B., Acting Associate Professor of the Department of Geology and Exploration of Mineral Deposits, «Abylkas Saginov Karaganda Technical University» (Karaganda, Kazakhstan)



KEMION
BANG & BONSONER

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ И БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ

РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ BIO-BINDER И ECO-BINDER ДЛЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ

Пылеподаватели Kemion предлагают экологически безопасные решения для связывания пыли и стабилизации почвы для горнорудных объектов и грунтовых дорог. Наши продукты, разработанные для снижения воздействия на окружающую среду при одновременном повышении эффективности эксплуатации, обеспечивают надежную работу в различных условиях.



РЕШЕНИЯ KEMION

BIO-BINDER LWS & SWS



ШИРОКИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН ДЛЯ
ПОВСЕДНЕВНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ.
ЭФФЕКТИВНЫЙ ПЫЛЕПОДАВИТЕЛЬ ДЛЯ ГРУНТОВЫХ
ДОРОГ И РУДНИКОВ

- Длительная стабилизация при различных погодных условиях
- Сокращает потребность в техническом обслуживании и повышает долговечность поверхности
- Подходит для крупномасштабных областей применения

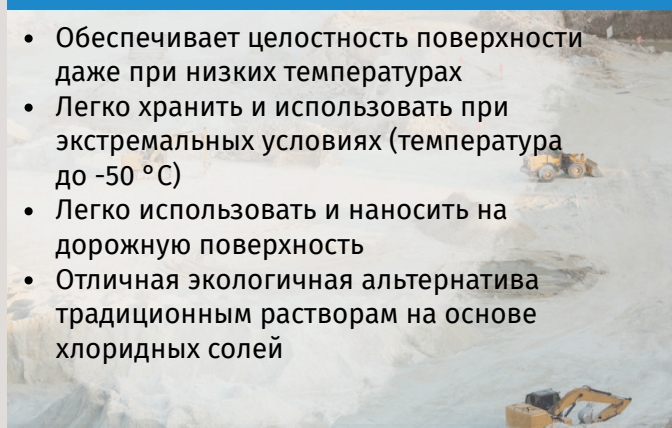


ECO-BINDER F



СОЗДАН ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗИМНИХ УСЛОВИЙ

- Обеспечивает целостность поверхности даже при низких температурах
- Легко хранить и использовать при экстремальных условиях (температура до -50 °C)
- Легко использовать и наносить на дорожную поверхность
- Отличная экологичная альтернатива традиционным растворам на основе хлоридных солей



**ПОЛНОСТЬЮ
БИОРАЗЛАГАЕМ**



**ДЛЯ
УНИВЕРСАЛЬНОГО
ПРИМЕНЕНИЯ**



**ЭКОНОМИТ
ВОДУ**



**БЕЗОПАСЕН ДЛЯ
МАТЕРИАЛОВ И НЕ
ВЫЗЫВАЕТ КОРРОЗИЮ**



Kemion Oy

FI25577973

www.kemion.fi



УЗНАТЬ БОЛЬШЕ

КОНТАКТЫ

ЕЛЕНА АРАКЧЕЕВА
МЕНЕДЖЕР ПО ПРОДАЖАМ
ТЕЛ. +7 (771) 071 77 97
Elena.Arakcheyeva@bangbonsomer.com

Код МРНТИ 38.21.01

O. D. Gavrilenko¹, Zh. T. Bagasharova^{1,2}, I. P. Poezhaev^{3,4}, *D. R. Nazirova³
¹National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan),
²Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan),
³ECOSERVICE-S LLP (Almaty, Kazakhstan),
⁴Innova Engineering Service LLP (Almaty, Kazakhstan)

CRITERIA OF RARE-METAL ORE POTENTIAL AND THEIR APPLICATION IN PREDICTING PROSPECTIVE AREAS (A CASE STUDY OF THE KALBA-NARYM BELT)

Abstract. The paper summarizes studies of the Kalba-Narym Belt of the Altai accumulated over more than 70 years of research into the ore potential of rare-metal granites. Ore-formation features of rare-metal mineralization are analyzed, and key groups of ore indicators and criteria are identified. Metallogenic zoning was used to delineate prospective areas for discovering new occurrences and assessing the potential of known deposits. Source materials were systematized into a database of 280 occurrences and deposits integrated into the ArcGIS geospatial environment using regional geophysical data and remote sensing (Landsat, Sentinel-2). Machine learning improves the reliability of predictive modeling.

Key words: rare metals, Kalba-Narym Belt, metallogenic zoning, formation types, magmatic criteria, Sentinel-2.

Сирек металдардың рудалылық критерийлері және оларды перспективалы аумақтарды болжауда қолдану (Қалба-Нарым белдеуі мысалында)

Аннотация. Мақалада Алтайдағы Қалба-Нарым белдеуі бойынша сирекметалды граниттердің рудалылығын зерттеудің 70 жылдан астам уақыт ішінде жиналған нәтижелері қорытындыланған. Сирекметалды минералдану көріністерінің рудно-формациялық ерекшеліктері қарастырылып, негізгі белгілер мен рудалылық критерийлері айқындалған. Металлогендік аудандастыру негізінде жаңа нысандарды анықтауға және белгілі кен орындарының әлеуетін бағалауға перспективалы аумақтар бөлінген. Бастапқы материалдар 280 нысанды қамтитын деректер базасына жүйеленіп, ArcGIS геоаппараттық ортасына геофизикалық және ЖЗЗ (Landsat, Sentinel-2) деректерімен біріктірілген. Машиналық оқыту болжам нәтижелерінің сенімділігін арттырады.

Түйінді сөздер: сирек металдар, Қалба-Нарым белдеуі, металлогендік аудандастыру, формациялық типтер, магмалық критерийлер, Sentinel-2.

Критерии рудоносности редких металлов и их использование при прогнозировании перспективных площадей (на примере Калба-Нарымского пояса)

Аннотация. Обобщены результаты исследований Калба-Нарымского пояса Алтая, накопленные за более чем 70-летний период изучения рудоносности редкометальных гранитов. Рассмотрены рудно-формационные особенности проявлений редкометальной минерализации, выделены основные группы признаков и критериев рудоносности. На основе металлогенического районирования определены перспективные площади для выявления новых объектов и оценки потенциала известных месторождений. Исходные материалы систематизированы в базе данных (280 проявлений и месторождений), интегрированной в геопространственную среду ArcGIS с привлечением региональных геофизических данных и материалов ДЗЗ (Landsat, Sentinel-2). Применение методов машинного обучения повышает достоверность прогнозных построений.

Ключевые слова: редкие металлы, Калба-Нарымский пояс, металлогеническое районирование, формационные типы, магматические критерии, Sentinel-2.

Introduction

The Kalba-Narym belt represents one of the most important rare-metal provinces, encompassing several deposits (Bakennoe, Belogorskoe, Yubileinoe, Akhmetkino, Medvedka, Tochka, Cherdoyak, etc.), which constitute the core of the rare-metal mineral resource base of the Republic of Kazakhstan in terms of light lithophile elements (*Be, Rb, Cs, Li*), as well as a significant portion of the resource base for heavy lithophile elements (*Ta, Nb, W*, lanthanides) and tin (*Sn*).

From a geotectonic point of view, the Kalba-Narym belt is a fragment of Gondwana, which joined the Siberian paleocontinent as a result of the Hercynian collision [1, 2]. In post-collision conditions, a stretching environment was created along the emerging Zaisan rift with orogeny in adjacent territories, with powerful granite magmatism and shear tectonics (Figure 1).

Granites of the Kalba-Narym belt have been studied in detail since the 1930s, initially as sources of tin mineralization. From the 1950s onward, geological exploration focused on the search for deposits of tantalum-niobates, beryllium, and cesium. Such a prolonged period of investigation has resulted in the accumulation of a substantial body of data on various aspects of the metallogeny of the Kalba-Narym belt; approximately 300 occurrences and indications of rare-metal mineralization have been identified (Figure 2). In addition to comprehensive monographs [2, 3, 5, etc.], significant contributions have been

made by geological re-evaluation and thematic reports of the 1970s–1990s, dedicated to reassessing the potential of individual deposits and ore clusters.

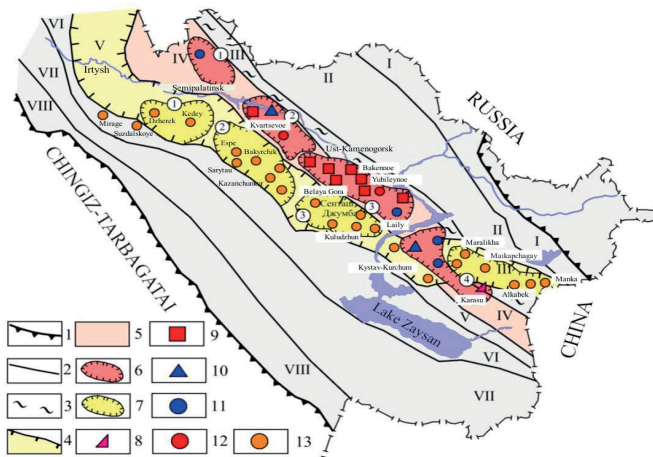
Methods and materials

Ore-Formation and Metallogenic Zoning of the Kalba-Narym Belt

The Kalba-Narym belt is underlain by the eponymous pluton, a magmatic body extending over more than 500 km in length and up to 50 km in width, composed of individual massifs that are interconnected at the surface or at depth. According to gravimetric data, the pluton corresponds to a regional negative gravity anomaly with an amplitude of 13–32 mGal, complicated by local anomalies associated with individual intrusive bodies [1, 2].

According to the scheme of V. V. Lopatnikov [3] the following sequence of magmatic intrusions has been established: the plagiogranite-granodiorite formation, ranging in composition from gabbro to plagiogranites (Kunush Complex, C_{2–3}); the Kalguty rhyolite-dacite formation (C₃); the Kalba granite-granodiorite complex (P₁); the granite-leucogranite formation (Monastyr Complex, P₂ – T₁). Several researchers additionally distinguish a dyke complex of gabbro-diabase-granite porphyry composition (Mirolubov Complex, T₁) [5, 6].

The rare-metal specialization of the Kalba-Narym belt is primarily associated with the granites of the Kalba Complex;



1 – boundaries of the Greater Altai; 2 – boundaries of metallogenic zones; 3 – Irtysh shear zone; 4 – boundary of the gold belt; 5 – Kalba-Narym belt.

6 – ore districts of the Kalba-Narym Belt:

1 – Shulbinsky, 2 – North-West Kalba, 3 – Central Kalba, 4 – Narym;

7 – ore districts of the West Kalba gold belt:

1 – Mukur, 2 – Bakyrchik, 3 – Kuludzhun, 4 – South Altai;

8–13 – deposits:

8 – albitite-greisen (Sn, Ta); 9 – rare-metal pegmatites (Ta, Nb, Be, Li, etc.); 10 – greisen-quartz vein (Sn, W); 11 – hydrothermal quartz-vein (Sn, W); 12 – tin; 13 – gold.

Metallogenic zones:

I – Beloubinsk–Sarymsaktin, II – Rudny Altai, III – Irtysh, IV – Kalba–Narym, V – West Kalba, VI – Char, VII – Zharma–Saur, VIII – Sirektas–Sarsazan

Figure 1. Spatial distribution of the Kalba-Narym Belt and the West Kalba gold belt within the Altai structural framework, combined with the metallogenic zoning of the Kalba-Narym Belt, after [1, 2].

Сурет 1. Алтай құрылымындағы Қалба-Нарым белдеуі мен Батыс Қалба алтын белдеуінің орналасу сызбасы, Қалба-Нарым белдеуінің металлогендік аудандастырылуымен бірге көрсетілген [1, 2] бойынша.

Рис. 1. Схема размещения Калба-Нарымского пояса и Западно-Калбинского золоторудного пояса в структуре Алтая, совмещенная с металлогеническим районированием Калба-Нарымского пояса, согласно [1, 2].

however, rare-metal enrichment is also characteristic of the Kalguty, and Monastyr complexes. Several pegmatite deposits (Akhmetkino, Tochka, Medvedka, etc.) are also hosted within ore-localizing dykes of plagiogranites and granite porphyries of the Kunush Complex.

The lateral heterogeneity of the Kalba-Narym Belt structure has allowed the identification of four megablocks along the belt's main NW–SE elongation. These blocks also correlate with the predominant ore-formational characteristics of the deposits [2, 7] and can be briefly described as follows:

Shulbinsky District is located on the outermost north-western flank of the Kalba-Narym Belt and is largely covered by a cover of unconsolidated sediments. According to geologi-

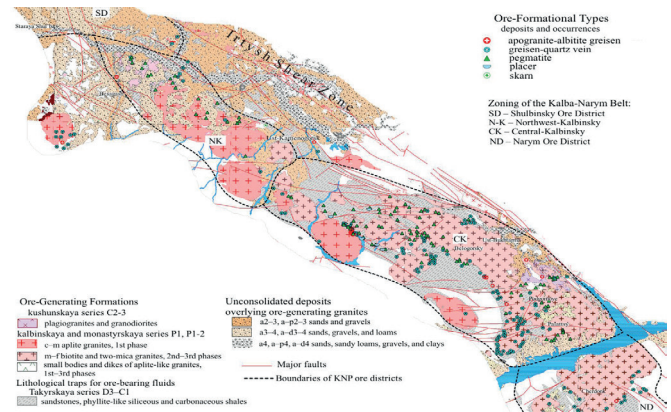


Figure 2. Distribution areas of granites of the Kalba-Narym Belt (KNB) and associated rare-metal mineralization occurrences.

Сурет 2. Қалба-Нарым белдеуінің (ҚНБ) граниттерінің таралу аймақтары және олармен байланысты сирекметалды минералдану нысандары.

Рис. 2. Области развития гранитов Калба-Нарымского пояса (КНП) и связанные с ними объекты редкометальной минерализации.

cal-geophysical reconstructions by Lyubetsky [10], the belt exhibits a significant widening (up to 90 km). Several large granite massifs have been identified (Shulbinsky, Kozhankul, Bekovsky, etc.), mostly covered by loose sediments. Prospects are associated with potentially ore-bearing *Li–F* granites, tin-bearing dykes, direct evidence of rare-metal mineralization (*W*, *Sn*), numerous zones of silicification in the host sedimentary rocks, and geochemical anomalies of *W*, *Sn*, *Be*, *Nb*, *Bi*, *As*, *Cu*, and *Au*.

The North-Western District. Monastyr and Kalba granites are widely developed among the enclosing sandy-black shale strata. Quartz veins are widely distributed within the sedimentary rocks. Quartz-vein deposits (*Sn*, *W*, *Sn–W*, *Sn–Au*) and rare-metal pegmatitic occurrences (*Ta*, *Nb*, *Be*, *Li*, etc.) are roughly equally represented [4, 5].

Central District. Granites of the Kalba Complex strongly dominate, while the Monastyr series is poorly developed. At the district margins, Kunush plagiogranites with a vein pegmatitic series specialized in rare metals are present. Among host intrusive rocks, the Takyr series of carbonaceous black shales is most widespread. Pegmatite occurrences are primarily concentrated in the apical parts of Kalba intrusions; at the periphery, quartz veins in Kalba granites and host sequences, as well as pegmatitic vein-like bodies in the Phase II Kunush series, are common. Over 90% of pegmatite deposits are concentrated in the Central District, with apogranitic greisen-quartz vein and greisen occurrences featuring *Ta–Sn*, *Ta–Nb–Be*, and *Li–Cs* mineralization [6, 7]. Sn and W mineralization is limited to the peripheral parts of the district and occurs on a relatively small scale.

Narym District. Kalba granites are widely developed, while Monastyr granites are completely absent. Vein-type rocks are extensively represented. Numerous isolated stocks and small dyke-like bodies of granitoids of the Kalguty association, as well as extensive belts of porphyritic dykes, have

been documented [3]. Linear zones and fields of quartz veins with *Sn*, *W*, and *Sn-W* mineralization are characteristic. *Ta-Nb-Be* and *Li-Cs* specialization is almost absent.

Currently, the primary sources of *Ta*, *Nb*, *Be*, *Li*, and *Cs* are granite pegmatites. Greisen and quartz-vein objects are smaller in scale, while known cassiterite, scheelite, and tantalum-niobate placers have been largely worked out and are not considered in this study.

The formation types of rare-metal granitoids of the Kalba-Narym Belt, according to [6, 9], are summarized below.

Results and Discussion

Exploration criteria and indicators

They have been studied and summarized in numerous works since the 1950s. Based on the data of [2, 3, 5, 6, et al.], these criteria can be systematized as follows:

Magmatic criteria. The granitoids of the Kalba Complex are ore-forming for most rare-metal objects of the Kalba-Narym Belt. At the same time, the leucogranites of the Monastyr Complex are less significant in this regard. The most recent derivatives, the dikes of the Mirolyubovsky complex, are practically uncomplicated.

Major rare-metal pegmatite deposits are associated with Phase I granites of the Kalba Complex. The main criteria for ore-bearing potential [2, 7] include: extensive areal develop-

ment; weakly expressed post-magmatic alterations (mainly microclinization); lack of uniformity in facies composition (granites, granodiorites, plagiogranites, etc.) with plagioclase predominating over K-feldspar; enrichment in rare alkalis (*Li + Rb + Cs*), whose sum is twice that of Phase II granites; geochemical specialization in rare elements (*Ta*, *Nb*, *Be*, *Li*, *Sn*), fixed in rock-forming minerals – quartz, feldspars, and biotite; and spatial association of vein rocks with rare-metal pegmatites.

Phase II granites are characterized by local processes of albitization and greisenization, accompanied by their own rare-metal pegmatite deposits, with major ore minerals being tantalite and beryl. Phase II granites are also associated with albitite-greisen (apogranite) type occurrences with tin-tantalum-lithium mineralization (Karasu, Novo-Akhmirovskoe, Apogranitnoye). Small-scale greisen-quartz vein and hydrothermal *Sn-W* occurrences are also known (Kozlovskoe, Karash, Burabay, etc.).

Leucocratic granites of the Monastyr Complex (P₁₋₂) are represented by large granite massifs in the Narym District and form small tabular bodies in marginal endocontacts of the Mirolyubov, Kaindin, and Karatsaygan massifs. They are specialized in rare elements (*Ta*, *Li*, *W*, *Sn*, *REE*), but due to crystal-chemical dispersion, they are not associated with rare-metal objects; only chamber-type crystal-bearing occurrences (Dun-

Table 1

Formation types of rare-metal granitoids of the Kalba-Narym Belt and associated deposits

Кесте 1

Қалба-Нарым белдеуінің сирекметалды гранитоидтарының формациялық түрлері және оларға байланысты кен орындары

Таблица 1

Формационные типы редкометальных гранитоидов Калба-Нарымского пояса и связанных с ними месторождений

Formation	Petrographic characteristics	Mineralization	Objects
Kalba Complex (P ₁),			
Granodiorite subformation	Normal <i>K-Na</i> series, moderate basicity, highly aluminous, with garnet-ilmenite-apatite accessory specialization	Rare-metal pegmatitic (<i>Ta</i> , <i>Nb</i> , <i>Be</i> , <i>Li</i> , <i>Cs</i> , <i>Sn</i>)	Bakennoe, Yubileinoe, Belaya Gora
		Blocky microcline pegmatites (<i>Nb</i> , <i>Be</i> , microcline, quartz)	Nizhniy Laibulak
		Quartz-vein type (<i>Sn</i> , <i>W</i>)	Chudskoe, Kaindinskoe, Cherdoyak
Granite subformation	Normal <i>K-Na</i> series, low basicity, highly aluminous, with ilmenite-apatite accessory specialization	Lithium-tantalum pegmatitic (<i>Ta</i> , <i>Li</i> , <i>Nb</i> , <i>Be</i>)	Kvartsevoye Akhmetkino
		Albitite-greisen type (apogranites, <i>Sn</i> , <i>Ta</i> , <i>Li</i>)	Karasu, Novo-Akhmirovskoe, Muncha
		Greisen/quartz-vein type (<i>Sn</i> , <i>W</i>)	Karash, Kozlovskoe
Monastyr Complex (P ₂ – T ₁),			
Granite subformation	Subalkaline <i>K–Na</i> series, high-pyrometamorphic, highly aluminous, with ilmenite-fluorite-monazite accessory specialization	Chamber-type crystal-bearing pegmatites (non-ore minerals) and mineralization zones with monazite	Zhamantas, Dungalinskoe, Karagayly
Leucogranite subformation	Leucocratic granites, vein-type granites, aplites, and quartz veins	Quartz-vein type (<i>Sn</i> , <i>W</i>)	Bolshevik, Razdolnenskoe

galinskoe) and small hydrothermal tungsten occurrences in the Mirol'yubov massif (Bolshevik, Razdolnenskoe, Vostochnoye, etc.) are known.

Mineralogical-geochemical criteria. Geochemical studies highlight alkali-deficient and ore-specific element spectra (**Li**, **Rb**, **Cs**, **Ta**, **Nb**, **Be**, **Sn**) in granites, ores, and monomineralic fractions of feldspars, quartz, and micas [7]. This indicates a similar composition of the parent magmatic melts and pegmatite-forming fluids, emphasizing the synchronicity of granite crystallization and pegmatite formation.

There are four consecutive stages: microclinization, accompanied by the formation of blocky microcline pegmatites. Indicators include blocks of microcline and quartz, nests of large-plate muscovite containing **Ta**, **Nb**, **Be**, **Li**, and other elements. Ore minerals include platy columbite and prismatic beryl crystals.

Albitization is associated with the formation of albite-microcline and albitite complexes, which constitute the matrix of rare-metal pegmatite veins. Dominant typomorphic minerals are albite, muscovite, green tourmaline, pink garnet, fluorapatite, and phosphate minerals.

Greisenization, observed in quartz-albite-muscovite complexes formed in the interiors of pegmatite veins. Typomorphic minerals are green muscovite, fluorapatite, green tourmaline, tantalite-columbite, and cassiterite. A notable feature is extremely high Ta content (up to 1% and above) and **Sn** enrichment.

Spodumene formation, occurring at the late stage of the pegmatite process, is characterized by massive accumulations, discrete nests, and large crystals of spodumene. The resulting quartz-cleavelandite and spodumene-quartz complexes are the most productive. Other indicators include cleavelandite, spodumene, amblygonite, pollucite, lepidolite, colored tourmalines, fluorite, and tantalum-bearing minerals (manganotantalite, microlite, ixiolite), among others.

The most productive pegmatite veins are those exhibiting all four metasomatic stages intensively.

Structural-tectonic criteria. The association of rare-metal objects of the Kalba-Narym Belt with vein systems has been recognized since the 1950s. The largest pegmatite fields – Asubulak, Belogorsko-Baymurzino, Chernovin, Karagoin-Lukon, etc. – occur in endo- and exocontact zones of granite massifs, in roof sag areas and residual blocks, where they are localized in tectonically weakened zones flanking second- and third-order faults. As an example, a diagram illustrates the increased density of vein rocks per unit area in relation to fault tectonics and the localization of rare-metal occurrences in the Central District of the Kalba-Narym Belt. A positive correlation is evident between zones of high vein density (% of total area) and the presence of rare-metal occurrences.

The most important factor in the localization of ore veins is multi-level granite massif architecture, represented by alternating tabular granite layers and platy xenoliths of host rocks. Such formations are noted at intersections of massifs by first- and second-order faults and are most often associated with complicating third- and fourth-order fracture systems. Host rocks act as screens and lithological traps beneath which complexes of pegmatite bodies are localized, with the vein fields themselves acquiring a tiered structure. Xenoliths are

most composed of Middle-Upper Devonian flysch-type formations, represented by carbonaceous shales and sandstones. Promising locations also include sag zones of granite roofs, where ore-forming fluids were trapped by previously formed sedimentary layers.

Thus, vein-hosted rocks, 95% of which belong to Phase III of the Kalba Complex, are concentrated in fields and zones. The most favorable sites for pegmatite formation and localization are areas of tiered massif structures, where granitoids actively interact with host rocks.

Based on the formation characteristics described above and the set of exploration criteria and indicators, the prospects of the Kalba-Narym Belt for rare-metal resources can be outlined as follows:

- Due to the long-term study of the Kalba-Narym Belt, geological exploration and mining activities, the discovery of new economically attractive objects across most of the ore-bearing formations is unlikely, except in poorly studied areas covered by Cenozoic unconsolidated deposits. The discovery of new pegmatite and albitite-greisen occurrences not exposed at the surface is also possible.

*- Areas covered by thick sequences of unconsolidated deposits are of interest, particularly most of the Shulbinsky District. Geophysical work in 1990–2000 revealed a wide development of granitoid massifs with contact metasomatism of the host sedimentary rocks within the southern part of sheet M-44-IX and the northern part of M-44-XV [2, 7]. Several manifestations of **Sn-W** mineralization were found (Kozhankul, Korosteli, Stepanovskoye).*

*- The Karagoin-Saryozek ore zone of Central Kalba shows promise for new discoveries. Here, sagging of the massif roofs is characteristic: granites outcrop at the periphery, while central locations are covered by Taky Series shales. Of particular interest are albite-spodumene pegmatites associated with Kunush plagiogranites and dykes (deposits and occurrences at Akhmetkino, Tochka, Novo-Saryozek, Kushbarlyk, Medvedka), featuring low **Ta**, **Be**, **Sn** content but large estimated lithium resources.*

*- Non-pegmatitic rare-metal mineralization includes albitite-greisen occurrences with **Sn-Ta-Li** mineralization (Novo-Akhmirovskoe, Karasu, Malo-Chernovinskoe, Apogranitnoye, Tortkalmak, etc.). In terms of formation characteristics, these are comparable to the Sarymbet deposit (Northern Kazakhstan) and Alakha (Altai Mountains), remain poorly studied, and have significant potential for lithium, tantalum, zirconium, and rare-earth elements.*

Taking into account the tasks set in research project PCF BR27100483, machine learning methods are used in the form of a set of quantitative data analysis methods based on the construction of models that identify the relationship between a set of features and the target function. Unlike expert systems based on predefined rules, machine learning methods generate models based on empirical data, identifying statistical dependencies without explicitly programming decision-making rules.

The algorithm identifies patterns in the input data, establishing correlations, for example, between geochemical composition and rock type. Based on these relationships, the system then determines dependencies between geochemical

indicators and rock types. However, most machine learning algorithms are empirical and do not reflect the primary causes of observed phenomena. In other words, forecasts produced using machine learning tools are not free from errors, particularly if the model is not validated by domain experts [11, 12].

In this study, data preparation for rare-metal objects of the Kalba-Narym Belt utilized 28 specialized reports covering various stages of exploration, 15 published monographs, PhD theses and articles, large-scale geological maps, factual material maps, sections, and sampling schemes from deposits including Karagoin, Medvedka, Tochka, Akhmetkino, Targynskoe, Yubileinoe, and Krasny Kordon.

A total of 280 occurrences, deposits, and mineralization points were included in a database with parameters such as: object name, XY coordinates, elevation marks, formation-morphological parameters, concentrations of useful components, and resource/reserve data. Formation-morphological parameters were organized into a tree-like hierarchical structure generally corresponding to: «formation group – host formation – ore-bearing formation – ore body morphology – mineral associations – ore mineralization – ore elements, satellites, and accessories».

The database of 280 rare-metal mineralization objects was overlaid on the geological base map and complemented by consolidated results of regional geophysics – magnetic and gravity field maps. Landsat imagery and Sentinel-2 spectral zone data were also widely used. Using these datasets together with a digital elevation model enables automation of morphostructural mapping, particularly of lineaments and circular structures. Faults identified through morphostructural analysis, especially 3rd–4th order faults flanking main fractures and compression zones, often correlate with rare-metal occurrences.

Conclusion

Thus, data preparation for artificial intelligence applications under project BR 27100483 involves creating a point database of known objects while integrating raster or vector geophysical data and remote sensing materials in various spectral ranges. Combining these datasets in established AI algorithms supports achieving the objectives of the grant.

In conclusion, there is a certain euphoria in recent years regarding the widely publicized use of machine learning methods, including for resource evaluation, forecasting, and exploration. Clearly, the use of AI technologies in geology is still at an early stage, as discussed above. Nevertheless, large-scale digitization of archival materials, combined with the development and adaptation of machine learning algorithms for specific exploration and forecasting tasks, promises to significantly advance AI applications in geology.

The implementation of the research project BR 27100483, of which this report represents an intermediate stage, will provide experience in preparing and utilizing extensive factual materials accumulated in geological archives. This will enable higher-level conclusions and syntheses aimed both at strengthening the mineral resource base of the Republic of Kazakhstan and supporting the successful operations of private companies.

Acknowledgments

This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (No. BR 27100483 «Development of predictive exploration technologies for identifying ore-prospective areas based on data analysis from the unified subsurface user platform «Minerals.gov.kz» using artificial intelligence and remote sensing methods»).

REFERENCES

1. *Osobennosti geotektonicheskogo razvitiya i rudonosnosti Yuzhnogo Altaya (Vostochnyi Kazakhstan) [Features of geotectonic development and metallogeny of the Southern Altai (Eastern Kazakhstan)]*. B. A. Dyachkov et al. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*. – 2021. – No. 5. – P. 399–426 (in Russian)
2. *Dyachkov B. A., Oytseva T. A. Redkometal'noe orudnenie Kalby [Rare-metal mineralization of Kalba]*. – Ust-Kamenogorsk: Vostochno-Kazakhstanskii tekhnicheskii universitet imeni D. Serikbaeva, 2021. – 208 p. (in Russian)
3. *Magmatizm i rudonosnost' Kalba-Narymskoi zony Vostochnogo Kazakhstana [Magmatism and metallogeny of the Kalba-Narym zone of Eastern Kazakhstan]*. V. V. Lopatnikov, E. P. Izokh, P. V. Eromolov et al. – Moscow: Nedra, 1982. – 248 p. (in Russian)
4. *Morfologiya i stroenie Kalba-Narymskogo plutona [Morphology and structure of the Kalba-Narym pluton]*. G. N. Shcherba et al. *Izvestiya AN SSSR [Proceedings of the USSR Academy of Sciences]*. – 1971. – No. 3. – P. 57–65 (in Russian)
5. *Bol'shoi Altai (geologiya i metallogeniya). Kn. 2. Metallogeniya [Greater Altai (geology and metallogeny). Book 2. Metallogeny]* G. N. Shcherba, Kh. A. Bespaev, B. A. Dyachkov et al. – Almaty: Redaktsionno-izdatel'skii otдел Vysshei attestatsionnoi komissii Respubliki Kazakhstan, 2000. – 400 p. (in Russian)
6. *Dyachkov B. A. Geneticheskie tipy redkometal'nykh mestorozhdenii Kalba-Narymskogo poyasa [Genetic types of rare-metal deposits of the Kalba-Narym belt]*. – Ust-Kamenogorsk: Vostochno-Kazakhstanskii tekhnicheskii universitet imeni D. Serikbaeva, 2012. – 130 p. (in Russian)
7. *Oytseva T. A. Geologiya, mineralogiya i usloviya formirovaniya redkometal'nogo orudneniya Vostochnogo Kazakhstana (na primere tsentral'noi chasti Kalba-Narymskoi zony) [Geology, Mineralogy and Formation Conditions of Rare-Metal Mineralization of Eastern Kazakhstan (on the Example of the Central Part of the Kalba-Narym Zone)]*: PhD thesis. – Ust-Kamenogorsk: D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, 2018. – 157 p. (in Russian)
8. *Lyubetsky V. N. Glubinnoe stroenie Kalby po geologo-geofizicheskim dannym [Deep structure of Kalba based on geological and geophysical data]*. *Seriya geologiya. Izvestiya AN Kaz. SSR [Series Geology. Proceedings of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR]*. – 1991. – No. 5. – P. 66–72 (in Russian)

9. *Tipy redkometal'nykh mestorozhdenii Vostochnogo Kazakhstana i ikh otsenka [Types of rare-metal deposits of Eastern Kazakhstan and their assessment].* B. A. Dyachkov et al. *Gornyi zhurnal [Mining Journal]*. – 2017. – No. 8 (2241). – P. 45–50 (in Russian)
10. *Application of Sentinel-2 spectral indices for remote mapping of ore mineralization of deposits in Eastern Kazakhstan* / O. D. Gavrilenko et al. // *Mining Journal of Kazakhstan*. – 2026. – No. 2 (250). – P. 43–50 (in English)
11. *Review of the application of big data and artificial intelligence in geology* / L. Chen et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1684. – Article 012007 (in English)
12. *Machine learning and artificial intelligence for geoscience* / A. Caté et al. // *The Leading Edge*. – 2020. – Vol. 39. – No. 8. – P. 526–533 (in English)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Оңтүстік Алтайдың (Шығыс Қазақстан) геотектоникалық дамуы мен рудалылығының ерекшеліктері / Б. А. Дьячков [және т. б.] // *Кен орындарының геологиясы*. – 2021. – № 5. – Б. 399–426 (орыс тілінде)
2. Дьячков Б. А., Ойцева Т. А. Қалбадағы сирек металды минералдану. – Өскемен: Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, 2021. – 208 б. (орыс тілінде)
3. Шығыс Қазақстанның Қалба-Нарым аймағының магматизмі мен рудалылығы / Лопатников В. В., Изох Э. П., Еромов П. В. [және т. б.]. – М.: Недра, 1982. – 248 б. (орыс тілінде)
4. Қалба-Нарым плутонның морфологиясы мен құрылысы / Г. Н. Щерба [және т. б.] // *КСРО ҒА хабарлары*. – 1971. – № 3. Б. 57–65 (орыс тілінде)
5. Щерба Г. Н., Беспяев Х. А., Дьячков Б. А. [және т. б.] *Үлкен Алтай (геология және металлогения). Кітап 2. Металлогения*. – Алматы: ҚР ЖАК РИО, 2000. – 400 б. (орыс тілінде)
6. Дьячков Б. А. Қалба-Нарым белдеуінің сирек металды кен орындарының генетикалық типтері. – Өскемен: ШҚМТУ, 2012. – 130 б. (орыс тілінде)
7. Ойцева Т. А. Шығыс Қазақстанның сирек металды минералдануының геологиясы, минералогиясы және қалыптасу жағдайлары (Қалба-Нарым аймағының орталық бөлігі мысалында): философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация. – Өскемен: Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, 2018. – 157 б. (орыс тілінде)
8. Любецкий В. Н. Геологиялық-геофизикалық деректер бойынша Қалбаның терең құрылысы // *Геология сериясы. ҚазССР ҒА хабарлары*. – 1991. – № 5. – Б. 66–72 (орыс тілінде)
9. Шығыс Қазақстанның сирек металды кен орындарының типтері және оларды бағалау / Б. А. Дьячков [және т. б.]. // *Тау-кен журналы*. – 2017. – № 8 (2241). – Б. 45–50 (орыс тілінде)
10. *Спектралдық индекстерді қолдана отырып Sentinel-2 деректері бойынша Шығыс Қазақстан кен орындарының рудалы минералдануын қашықтан картографиялау* / O. D. Gavrilenko [және т. б.] // *Mining Journal of Kazakhstan*. – 2026. – № 2 (250). – Б. 43–50 (ағылшын тілінде)
11. *Геологияда үлкен деректер мен жасанды интеллектті қолдануға шолу* / L. Chen [және т. б.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Т. 1684. – 012007 (ағылшын тілінде)
12. *Тау-кен геологиясы үшін машиналық оқыту және жасанды интеллект* / A. Caté [және т. б.] // *The Leading Edge*. – 2020. – Т. 39. – № 8. – Б. 526–533 (ағылшын тілінде)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности геотектонического развития и рудоносности Южного Алтая (Восточный Казахстан) / Б. А. Дьячков [и др.] // *Геология рудных месторождений*. – 2021. – № 5. – С. 399–426 (на русском языке)
2. Дьячков Б. А., Ойцева Т. А. Редкометальное оруденение Калбы. – Усть-Каменогорск: ВКТУ, 2021. – 208 с. (на русском языке)
3. Магматизм и рудоносность Калба-Нарымской зоны Восточного Казахстана / В. В. Лопатников, Э. П. Изох, П. В. Еромов [и др.]. – М.: Недра, 1982. – 248 с. (на русском языке)
4. Морфология и строение Калба-Нарымского плутона / Г. Н. Щерба [и др.] // *Известия АН СССР*. – 1971. – № 3. – С. 57–65 (на русском языке)
5. Большой Алтай (геология и металлогения). Кн. 2. Металлогения / Г. Н. Щерба, Х. А. Беспяев, Б. А. Дьячков [и др.]. – Алматы: РИО ВАК РК, 2000. – 400 с. (на русском языке)
6. Дьячков Б. А. Генетические типы редкометальных месторождений Калба-Нарымского пояса. – Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2012. – 130 с. (на русском языке)
7. Ойцева Т. А. Геология, минералогия и условия формирования редкометального оруденения Восточного Казахстана (на примере центральной части Калба-Нарымской зоны): дис. ... д-ра философии (PhD). – Усть-Каменогорск: ВКГТУ им. Д. Серикбаева, 2018. – 157 с. (на русском языке)
8. Любецкий В. Н. Глубинное строение Калбы по геолого-геофизическим данным // *Серия геология. Известия АН Каз. ССР*. – 1991. – № 5. – С. 66–72 (на русском языке)
9. Типы редкометальных месторождений Восточного Казахстана и их оценка / Б. А. Дьячков [и др.] // *Горный журнал*. – 2017. – № 8 (2241). – С. 45–50 (на русском языке)
10. *Применение спектральных индексов Sentinel-2 для дистанционного картографирования рудной минерализации месторождений Восточного Казахстана* / O. D. Gavrilenko [и др.] // *Mining Journal of Kazakhstan*. – 2026. – № 2 (250). – С. 43–50 (на английском языке)

11. Обзор применения больших данных и искусственного интеллекта в геологии / L. Chen [и др.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Т. 1684. – Ст. 012007 (на английском языке)
12. Машинное обучение и искусственный интеллект для горной геонауки / A. Caté [и др.] // *The Leading Edge*. – 2020. – Т. 39. – № 8. – С. 526–533 (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; <https://orcid.org/0000-0003-4227-1098>

Bagasharova Zh. T., Candidate of Technical Sciences, National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), zh.t_bagasharova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8996-8656>

Poezzhaev I. P., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, ECOSERVICE-S LLP, Innova Engineering Service LLP (Almaty, Kazakhstan), ipoyezzhayev@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5689-1063>

Nazyrova D. R., GIS Specialist, ECOSERVICE-S LLP (Almaty, Kazakhstan), nazyrovadilyara@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1148-4480>

Авторлар туралы мәліметтер:

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

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

Поезжаев И. П., геология-минералогия ғылымдарының кандидаты, «ECOSERVICE-S» ЖШС, «Innova Engineering Service» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

Назырова Д. Р., ГАЗ маманы, «ECOSERVICE-S» ЖШС (Алматы қ., Қазақстан)

Сведения об авторах:

Гавриленко О. Д., канд. геолого-минералогических наук, Национальная инженерная академия Республики Казахстан (г. Алматы, Казахстан)

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

Поезжаев И. П., канд. геол.-минер. наук, TOO «ECOSERVICE-S», TOO «Innova Engineering Service» (г. Алматы, Казахстан)

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



ФОРУМ ТРУДА
Живи и работай
в Оренбуржье!



ГАЗ. НЕФТЬ.
ОРЕНБУРЖЬЕ

ХІХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА-ФОРУМ

9-11 сентября 2026 г.

Организаторы:

Правительство Оренбургской области
Министерство труда и занятости населения Оренбургской области
Министерство промышленности и энергетики Оренбургской области

Оператор:

Башкирская выставочная компания

По вопросам участия в выставке:
(347) 246-41-77, 246-41-86
expo@orenburg-gazneft.ru

По вопросам участия в деловой программе:
(347) 246-42-85, 246-42-81
kongress@bvkexpo.ru

Код МРНТИ 36.23.31

М. Б. Нұрпейісова¹, Д. М. Қырғызбаева¹, *А. М. Абенов¹, Н. А. Милетенко²

¹Сәтбаев аындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті ҚазҰТЗУ (Алматы қ., Қазақстан),

²Ресей тау-кен академиясының академик Н. В. Мельников атындағы жер қойнауын кешенді игеру мәселелері институты (Мәскеу қ., Ресей)

ТАУ-КЕН КӘСІПОРЫНДАРЫН ЗАМАНАУИ ГЕОДЕЗИЯЛЫҚ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ*

Аннотация. Мақалада қазіргі заманғы координаталық негіздің даму деңгейіне сай келетін геодезиялық әдістемелердің сипаттамасы берілген. Тау жыныстары массиві мен жер бетінің деформацияланған күйіне мониторинг жүргізі, бағалау және болжау әдістерін жетілдірудің маңыздылығы атап көрсетіледі. Нақты мысал ретінде Ұлытау облысындағы Жыланды кен орындары тобы алынған және онда геодинамикалық процестерді бақылау жүргізілетін геодезиялық тірек торабы құрылғаны көрсетілген. Мақалада геодезиялық тірек тораптарын құру және мониторинг жүргізу үшін спутниктік технологияларды қолдану мәселесі, әсіресе мемлекеттік геодезиялық тораптың (МГТ) бір немесе бірнеше пунктін пайдаланған кезде пункттердің координаталарын анықтау дәлдігін бағалау тұрғысынан қарастырылған. Спутниктік технология, лазерлік сканерлеу және электрондық тахеометр негізінде жер бетінің деформацияларын бақылаудың бірегей технологиясы ұсынылған, ол жерасты кен қазу жұмыстары жүргізілетін аумақтарда шөгү мұдасының кеңістіктік орнын анықтауға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: геодезиялық өлшеулер, геодезиялық тірек тораптары, түсірістер, спутниктік технологиялар, зер беті, деформациялар, жылжулар, мониторинг, жердің цифрлы модельдері.

Modern geodetic support for mining operations*

Abstract. The article presents a description of geodetic methods that meet the modern level of development of the coordinate reference framework. The importance of improving methods for the assessment, forecasting, and monitoring of the deformed state of rock massifs and the Earth's surface is emphasized. Using a specific example – namely, the deposits of the Zhilandy group in the Ulytau region – the creation of a geodetic control network for monitoring geodynamic processes is demonstrated. The paper also considers the application of satellite technologies for establishing geodetic control networks and for monitoring, particularly with regard to assessing the accuracy of point coordinate determination when using one or several points of the State Geodetic Network (SGN). An original technology for monitoring ground surface deformations in undermined areas is presented, based on satellite technology, laser scanning, and an electronic total station, which makes it possible to determine the three-dimensional position of the subsidence trough.

Key words: geodetic measurements, geodetic control networks, surveys, satellite technologies, Earth's surface, deformations, displacements, monitoring, digital terrain models.

Современное геодезическое обеспечение горных предприятий*

Аннотация. В статье представлено описание геодезических методов, соответствующих современному уровню развития координатной основы. Подчеркивается важность совершенствования методов мониторинга, оценки и прогнозирования деформированного состояния массива горных пород и земной поверхности. Показано на конкретном примере, т. е. на месторождениях Жиландинских групп в Улутауской области создание геодезической опорной сети, в которой ведется мониторинг геодинамических процессов. Рассматривается вопрос о применении спутниковой технологии для создания опорных геодезических сетей и ведения мониторинга, в части оценки точности определения координат пунктов при использовании одной или нескольких пунктов государственной геодезической сети (ГГС). Показана оригинальная технология ведения мониторинга за деформациями земной поверхности на подрабатываемых территориях на основе спутниковой технологии, лазерного сканирования и электронного тахеометра, позволяющая получать пространственное положение мульты движения.

Ключевые слова: геодезические измерения, геодезические опорные сети, съемки, спутниковые технологии, земная поверхность, деформации, смещения, мониторинг, цифровые модели.

Кіріспе

Тау-кен кәсіпорындарын пайдалану кезінде негізгі мәселелердің бірі – маркшейдерлік тірек тораптарын құру, жер қойнауы мен жер бетінде жүріп жатқан деформациялық процестерді бақылау, сондай-ақ тау-кен нысандарының модельдерін жасауда қолданылатын маркшейдерлік-геодезиялық әдістемелердің қазіргі жағдайын зерттеу және оларды жетілдіру болып табылады. Аталған үш бағыт өзара тығыз байланысты және біртұтас координаттар жүйесінде қарастырылуы тиіс. Сонымен қатар, бұл техногендік тау-кен нысандарын біртұтас жүйе ретінде қарастыру үшін маңызды.

Қазіргі уақытта осындай перспективалы аймақтардың бірі – Жыланды кен орындары тобы. Оның құрамына Шығыс және Батыс Сарыоба, Қыпшақбай, Қарашошақ, Итауыз кен орындары кіреді (1-сурет).

Зерттеудің мақсаты мен әдістемесі

Зерттеудің мақсаты – ауқымды кен орындарын игерудегі тау жыныстарымен жер бетінің жылжуын мониторингтеу және болжау. Бұл жұмыста алға қойылған мақсатқа жету үшін қазіргі заманғы геодезиялық торап құрудың деңгейіне сай келетін заманауи әдістер мен аспаптар (электронды тахеометр, лазерлі сканер, спутниктік технологиялар) негізінде кен орындары геодезиялық қамтамасыз етілді және бақылау нәтижелерінің дәлдігін мониторинг нәтижелерінің дәлдігі ең кіші квадраттар әдісімен бағаланды.



Сурет 1. Жыланды кен орындары тобы.

Figure 1. Zhylandy group of deposits.

Рис. 1. Группа месторождений Жыланды.

Геодезиялық тірек торабын құру тәсілдерінің дамуы, сөзсіз, спутниктік өлшеу технологияларын қолданумен айқындалады. Нақтысында, ғаламдық навигациялық спутниктік жүйелер (ГНСЖ) координаталарды түсіріс пункттеріне беру кезінде (координаталық торапты жиілетуде) пландық және биіктік негіздеуге балама болып, ал бір-қатар жағдайларда оларды толықтай алмастырды. Координаталық негізді құруды жеңілдетумен қатар, ГНСЖ пайдалану дәлдікті едәуір арттыруға мүмкіндік береді, бұл қазіргі заманғы тау-кен жұмыстарын жүргізу жағдайында аса маңызды. Спутниктік анықтаулар технологиясы [1–3] базалық станцияларды қолдануды қамтиды. Осыған

*Жұмысты жүргізуде К. Б. Рысбеков, Г. М. Мейрамбек, Ш. К. Айтказинова, Қ. Н. Дербісов және тау-кен кәсіпорындары қызметкерлері қатысты.

байланысты олардың сандық жеткіліктілігі мен қолдану дәлдігіне қатысты маңызды ғылыми-практикалық мәселе туындайды. Төменде екі немесе үш базалық станцияны қолдану арқылы жүргізілген спутниктік анықтаулар бойынша зерттеу нәтижелері келтірілген.

Маркшейдерлік-геодезиялық қамтамасыз етуді дамытудың екінші аспектісі *тау-кен-техникалық объектілердің модельдерін құрумен* байланысты. Мұндай модельдер тау жұмыстарын жобалау және олардың қауіпсіздігін қамтамасыз етуге арналған инженерлік-техникалық шешімдердің сапасын едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Бұл бағыттағы жетілдіру лазерлік сканерлеу жүйелерін және ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА) арқылы жүргізілетін түсірілімдерді қолдану кезінде аса тиімді болып табылады.

Лазерлік сканерлеу жүйелерін қолдану бір ғана түсірілім барысында карьердің цифрлық моделін алуға мүмкіндік береді. Тахеометриялық түсіріліммен салыстырғандағы артықшылығы-алынатын нүктелер бұлты есебінен ақпараттылығының жоғары болуы. Тахеометр арнайы бағыттау құралдарын (вехалар, призмалар және т. б.) пайдалану кезінде өлшеулер жүргізуде өте тиімді, себебі ол нүктелердің координаталарын анықтауға арналған аспап болып табылады. Ал лазерлік сканерді беттерді түсіру кезінде және олардың кеңістіктегі орнын анықтау үшін қолдану орынды.

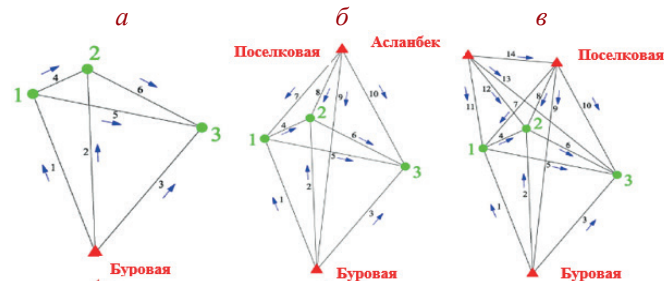
Мақаланың келесі аспектісі, пайдалы қазбалар кен орындарын игеру кезінде жүргізілетін *деформациялық процестерді мониторингтеуді* ұйымдастырумен тікелей байланысты [4–6]. Жер бетінің жылжу параметрлерін есептеуге қатысты нормативтік құжаттар [7] және тау жыныстарының, жер бетінің және қазбалармен әлсіретілген құрылыстардың жылжуын бақылауды жүргізу жөніндегі құжаттар [8] едәуір дәрежеде ескірген. Атап айтқанда, Қорғау ережелері [8] тазалау жұмыстарының ілгерілеу жылдамдығы 150 м-ге дейін болатын жағдайларға арналып әзірленген. Қазіргі кезде бұл параметрлер бірнеше есе асып түсуде. Ал [7]-дағы бақылау әдістемелеріне келсек, соңғы 30 жылда маркшейдерлік-геодезиялық аспаптық база мен технологиялар түбегейлі өзгерді және ең бастысы – бақылаулардың дәлдігі мен ақпараттылығын арттыру мүмкіндіктері айтарлықтай өсті.

Нәтижелер және оларды талдау

Техникалық әдебиеттерде геодезиялық мақсаттарға арналған арнайы тораптарды құруда ГНСС технологияларын қолдану мәселелері кеңінен қарастырылғанымен, олардың маркшейдерлік істе пайдаланылуына қатысты зерттеулер саны шектеулі. Осындай тораптарды жобалау барысында олардың дәлдігін алдын ала бағалау маңызды болып табылады. Бұл жобалау кезеңінде торапты құрудың ең тиімді нұсқасын таңдауға мүмкіндік береді. Дәлдікті бағалау, әдетте, ең кіші квадраттар әдісіне негізделген заманауи компьютерлік технологияларды қолдану арқылы жүзеге асырылады.

Төменде геодезиялық тораптарды *құруды модельдеу нәтижелерінің* талдауы келтірілген. Триангуляция тәсілімен жүргізілген өлшеулер, сондай-ақ спутниктік анықтаулар (спутниктік торап) нәтижелері бойынша координаттары есептелген үш анықталатын пункттің дәлдігі бағалан-

ды. Бұл ретте бір, екі және үш тірек пунктіне сүйенетін желінің үш нұсқасы қарастырылды (2-сурет).



Сурет 2. Геодезиялық тораптарды құрудың сұлбалары (а – бір тірек пунктіне тірелетін торап; б – екі тірек пунктіне; в – үш пунктке).

Figure 2. Schemes for constructing geodetic networks (a – a network based on one control point; b – on two control points; c – on three control points).

Рис. 2. Схемы построения геодезических сетей (а – сеть, опирающаяся на один опорный пункт; б – на два опорных пункта; в – на три пункта).

Геодезиялық желі сұлбаларында 1–14 нөмірлерімен белгіленген көк жебелер желі пункттері арасындағы геодезиялық өлшеулердің бағыты мен реттілігі көрсетілді. Бағаланатын торап тірек пункттерінің координаттары, дирекционный бұрыштары және қабырғаларының ұзындықтары 1 және 2-кестелерде келтірілген.

Кесте 1

Бастапқы тірек пункттерінің координаталары

Таблица 1

Координаты исходных опорных пунктов

Table 1

Coordinates of the initial control points

Пункттер	X, м	Y, м
Буровая	66340,237	16137,221
Поселковая	66571,339	16270,883
Асланбек	66067,008	16709,672

Геодезиялық тораптың дәлдігін бағалау ең кіші квадраттар әдісі бойынша орындалды. Триангуляция әдісімен құрылған геодезиялық тораптар дәлдігінің нәтижелері 3-суретте келтірілген.

Сурет 3-ке қарасақ, 1, 2 және 3 нүктелердің орнын анықтаудың дәлдігі екі немесе үш тірек нүктеге сүйенген геодезиялық тораптарда жоғары екенін байқаймыз. Бір және екі тірек пункттеріне сүйенген жағдай арасындағы айырмашылық үлкен (шамамен екі реттік), ал екі және үш пунктке сүйенген тораптар арасындағы айырмашылық аз, тек сантиметрдің бөліктерімен ғана ерекшеленеді.

Әрі қарай спутниктік технологияны қолданған геодезиялық торап пункттерінің дәлдігін бағалау нәтижелеріне тоқталамыз (сурет 4).

Сурет 4-те көрініп тұрғандай, спутниктік желілерде 1, 2 және 3 пункттердің орналасуын анықтаудың дәлдігі

Кесме 2

Геодезиялық торап қабырғаларының дирекциондық бұрыштары мен ұзындықтары

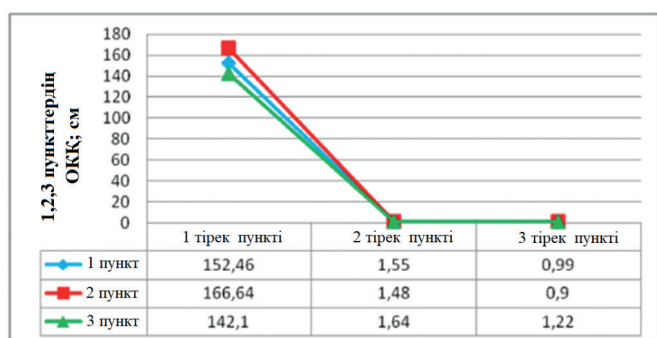
Table 2

Directional Angles and Side Lengths of Geodetic Networks

Таблица 2

Дирекционные углы и длины сторон геодезических сетей

Қабырғалар	Торап (1-сурет, а)		Торап (1-сурет 1, б)		торап (1-сурет, в)	
	Ұзындық, м	Дирекцион-дық бұрыш-тар град.	Ұзындық, м	Дирекцион-дық бұрыш-тар град.	Ұзын-дық, м	Дирекцион-дық бұрыш-тар град.
Буровая-1	7653	340,7927	7653	340,7927	7653	340,7927
Буровая-2	8366	357,8501	8366	357,8501	8366	357,8501
Буровая-3		37,0449		37,0449		37,0449
1-2	2478	62,8104	2478	62,8104	2478	62,8104
1-3	6986	102,6835	6986	102,6835	6986	102,6835
2-3	5326	120,0351	5326	120,0351	5326	120,0351
Поселковая-1				217,3843		217,3843
Поселковая -2			4078	202,2621	4078	202,2621
Поселковая – Буровая			12196	185,7935	12196	185,7935
Поселковая -3				154,5395		154,5395
Асланбек-1					5398	171,9564
Асланбек-2						144,9128
Асланбек-3					10229	132,2591
Асланбек – Поселковая					4526	95,5639

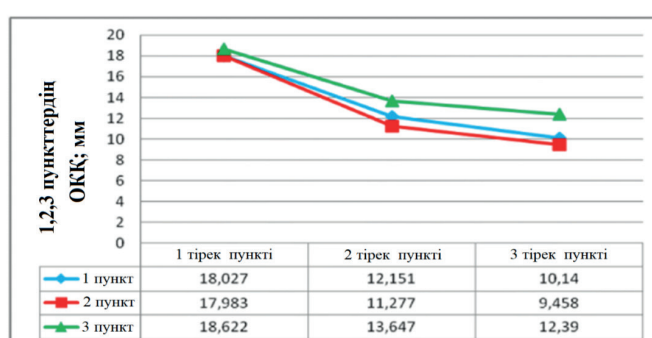


Сурет 3. Тірек пункттерінің санына байланысты тораптағы триангуляция пункттерінің дәлдігін бағалау.

Figure 3. Accuracy assessment of the triangulation network as a function of the number of control points.

Рис. 3. Оценка точности сети триангуляции в зависимости от количества опорных пунктов.

триангуляция әдісімен құрылған желідегіден айтарлықтай жоғары. Дәлдіктің өсуі тірек пункттер санына тәуелді екені байқалады. Келтірілген торап дәлдіктері нәтижелеріне сүйенсек, геодезиялық (маркшейдерлік) тораптарды құру кезінде тірек пункттерінің санына да, геодезиялық торап құру әдістеріне (жер бетіндегі немесе спутниктік технология бойынша) де назар аударған жөн.

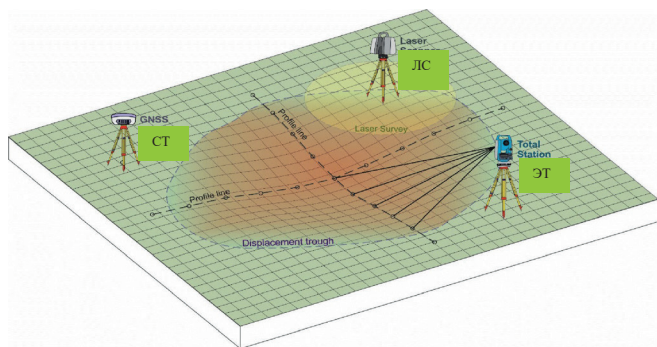


Сурет 4. Пландық координаттары ГНСЖ арқыл анықталған геодезиялық тораптың дәлдігін бағалау.

Figure 4. Accuracy assessment of the geodetic network whose horizontal coordinates are determined using GNSS technology.

Рис. 4. Оценка точности геодезической сети, плановые координаты которой определены по технологии ГНСЖ.

Жоғарыда тау-кен жұмыстарын жүргізу кезіндегі жер бетінің жылжуын бақылаудың маңыздылығы атап өтілді. Жерасты тау-кен жұмыстарын жүргізу нәтижесінде игеріліп жатқан аумақтарда жер бетінің деформациялары пайда болады, бұл тау-кен жұмыстарының ықпал ету аймағында орналасқан табиғи және техногендік объектілерге



Сурет 5. Қазіргі заманғы электрондық геодезиялық жабдықты пайдалана отырып, бақылау станциясындағы түсіріс сызбасы.

Figure 5. Surveying scheme at the observation station using modern electronic geodetic equipment.

Рис. 5. Схема съёмки на наблюдательной станции с использованием современного электронного геодезического оборудования.

теріс әсер ететіні сөзсіз. Осыған байланысты Жыланды кенішіндегі Шығыс Сарыоба кен орнындағы жер бетінің жылжуын анықтау мақсатында мониторинг жүргізіледі [9]. Әзірленген мониторинг әдістемесі бірден бірнеше түсірілім түрлерін қамтиды (5-сурет):

- ✓ спутниктік анықтаулар көмегімен түсіріс негізін құру;
- ✓ профильдік сызықтарды электрондық тахеометрмен түсіру;
- ✓ жер бетінің жылжу мұлдасын лазерлік сканерлеу әдісімен түсіру;

✓ қазба әсеріне ұшыраған объектілерді электрондық тахеометр және лазерлік сканерлеу жүйесі арқылы егжей-тегжейлі түсіру.

Мониторинг жүргізуде аспапты таңдаудың маңызы өте зор, ол бақылаудың белгілі бір кезеңіндегі дәлдік талаптарымен анықталады және өлшеу қателіктерін талдауға негізделеді. Әр түрлі геодезиялық (триангуляция және спутниктік) әдістермен жүргізілген өлшеулердің дәлдігін талдау нәтижелері 3 және 4 суреттерде келтірілген. Жүргізілген талдау өлшеулердің ең дәл әдісі – жер бетінің жылжуын профильдік сызықтардың реперлері бойыша бақылау, яғни электронды тахеометрия арқылы жүргізу дұрыс екенін көрсетті [10].

Қорытынды

Осылайша, мақалада тау-кен кәсіпорындарында маркшейдерлік-геодезиялық қамтамасыз етудің даму перспективалары көрсетілген. Деформациялық процестерді мониторингтеудің жаңа әдістерін әзірлеу саласында геодезиялық тораптардың модельдерін мониторинг құралы ретінде қолдануға қатысты зерттеулердің маңызы зор деп білеміз. Жүргізілген GPS-өлшеулер негізінде Жыланды кеніштерінің маркшейдерлік қызметтері, жоғары дәлдікпен анықталған тірек пункттерімен қамтамасыз етілді. Кешенді мониторингтеу кезінде зерттеулер заманауи аспаптармен (спутниктік, лазерлік сканерлер мен электрондық тахеометрлер) жүргізілді.

Алғыс

Зерттеулер Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің гранттық қаржыландыруы шеңберінде жүргізілді (AP26100471).

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Антонович К. М. Спутниктік радионавигациялық жүйелерді геодезияда қолдану. – М.: Картгеоцентр; Новосибирск: Наука, 2006. – 360 б. (орыс тілінде)
2. Юнес Ж. А., Мустафин Г., Морозова В. Д. Спутниктік позициялау технологиясын қолдану арқылы маркшейдерлік тірек тораптарын құру // Маркшейдер хабаршысы. – 2017. – № 2. – Б. 25–28 (орыс тілінде)
3. Спутниктік жүйені қолданып мониторинг жүргізу және оның нәтижелерін өңдеу / А. М. Абенов [және т. б.] // Жас ғалым. – 2022. – Т. 413. – Б. 50–53 (орыс тілінде)
4. Опарин В. Н. және т. б. Техногендік жер сілкіністері мен кен соққыларын сейсмикалық-деформациялық мониторингтеудің әдістері мен жүйелері. – Новосибирск: СБ РГА баспасы, 2016. – Т. 2. – 261 б. (орыс тілінде)
5. Рыльникова М. В., Юн А. Б., Терентьева И. В. Жезқазған кен орнын игерудің болашағы мен стратегиясы // Тау-кен журналы. – 2015. – № 5. – Б. 44–49 (орыс тілінде)
6. Трубецкой К. Н. Жер қойнауы ресурстарын кешенді игеру мен сақтаудың жай-күйі және негізгі бағыттары // Жер қойнауын кешенді игеру мен сақтаудың мәселелері мен перспективалары: халықаралық ғылыми конференция материалдары. – Мәскеу: ИПКОН РАН, 2020. – Б. 5–11 (орыс тілінде)
7. Көмір және тақтатаас кен орындарында тау жыныстарының, жер бетінің және тау-кен жұмыстары әсеріне ұшыраған құрылыстардың жылжуын бақылау жөніндегі нұсқаулық: КСРО Көмір өнеркәсібі министрлігі бекіткен 30.12.1987. – Мәскеу: Недра, 1989. – 96 б. (орыс тілінде)
8. Көмір кен орындарында жер асты тау-кен жұмыстарының зиянды әсерінен құрылыстар мен табиғи объектілерді қорғау ережелері. ПБ 07-269-98. – Мәскеу, 1998 (орыс тілінде)
9. Жер ойнауын ауқымды игеру кезінде тау жыныстары массивінің жай-күйін кешенді мониторингтеу / О. Bazaluk [және т. б.] // Frontiers in Environmental Science. – 2022. – Т. 10. – 852591 (ағылшын тілінде)
10. Nurpeisova M. B., Abenov A. M., Miletchenko N. A. Мыс кенін өндіру кезіндегі деформацияларды болжауға арналған жоғары тиімді мониторинг әдістемесі // Eurasian Mining. – 2023. – № 1. – Б. 19–24 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Antonovich K. M. *Ispol'zovanie sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii* [The Use of Satellite Radionavigation Systems in Geodesy]. – Moscow: Kartgeotsentr; Novosibirsk: Nauka, 2006. – 360 p. (in Russian)
2. Yunes J. A., Mustafin G., Morozova V. D. *Sozdaniye opornoy marksheyderskoy seti s ispol'zovaniyem tekhnologii sputnikovogo pozitsionirovaniya* [Creation of a support surveying network using the technology of satellite positioning]. *Marksheydersky Vestnik* [Surveyor's Bulletin]. – 2017. – No. 2. – P. 25–28 (in Russian)
3. Abenov A. M., Myngzhasarov B., Kirgizbaeva G. M., Nurpeissova M. B. *Monitoring s ispol'zovaniyem sputnikovykh sistem i obrabotka yego rezul'tatov* [Monitoring using satellite systems and processing of its results]. *Molodoy Uchenyy* [Young Scientist]. – 2022. – No. 413. – P. 50–53 (in Russian)
4. Oparin V. N. et al. *Metody i sistemy seysmo-deformatsionnogo monitoringa tekhnogennykh zemletryaseniy i gornykh udarov* [Methods and Systems of Seismic-Deformation Monitoring of Technogenic Earthquakes and Rockbursts]. – Novosibirsk: Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2016. – Vol. 2. – 261 p. (in Russian)
5. Rylnikova M. W., Yoon A. B., Terentyeva I. V. *Perspektivy i strategiya osvoyeniya Zhezkazganskogo mestorozhdeniya* [Perspectives and strategies for the development of Zhezkazgan deposit]. *Gorny zhurnal* [Mining Journal]. – 2015. – No. 5. – P. 44–49 (in Russian)
6. Trubetskoi K. N. *Sostoyaniye i osnovnye napravleniya kompleksnogo osvoeniya i sohraneniya resursov zemnykh neдр* [The state and main directions of the integrated development and conservation of the resources of the Earth's interior]. In: *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sohraneniya zemnykh neдр: materialy Mezhdunar. nauch. konf.* [Problems and prospects of integrated development and conservation of the Earth's interior: proceedings of the International Scientific Conference]. – Moscow: IPKON RAN, 2020. – P. 5–11 (in Russian)
7. *Instruktsiya po nablyudeniyam za sdvizheniyam gornykh porod, zemnoy poverkhnosti i podrabatyvayemyi sooruzheniyami na ugol'nykh i slantsevykh mestorozhdeniyakh* [Instruction for Monitoring the Movement of Rock Masses, Surface, and Mined Structures at Coal and Oil Shale Deposits]. – Moscow: Nedra, 1989. – 96 p. (in Russian)
8. *Rules for Protecting Structures and Natural Objects from Harmful Effects of Underground Mining at Coal Deposits* [Pravila okhrany sooruzheniy i prirodnykh ob'yektov ot vrednogo vliyaniya podzemnykh gornykh razrabotok na ugol'nykh mestorozhdeniyakh]. – PB 07-269-98. – Moscow, 1998 (in Russian)
9. *Integrated Monitoring for the Rock Mass State During Large-Scale Subsoil Development* / O. Bazaluk et al. // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Vol. 10. – Article 852591 (in English)
10. Nurpeissova M. B., Abenov A. M., Miletenko N. A. *Highly efficient monitoring procedure for deformation prediction in copper ore mining* // *Eurasian Mining*. – 2023. – No. 1. – P. 19–24 (in English)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Антонович К. М. *Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии*. – М.: Картгеоцентр; Новосибирск: Наука, 2006. – 360 с. (на русском языке)
2. Юнес Ж. А., Мустафин Г., Морозова В. Д. *Создание опорной маркшейдерской сети с использованием технологии спутникового позиционирования* // *Маркшейдерский вестник*. – 2017. – № 2. – С. 25–28 (на русском языке)
3. *Ведение мониторинга с использованием спутниковых систем и обработки его результатов* / А. М. Абенев [и др.] // *Молодой ученый*. – 2022. – С. 50–53 (на русском языке)
4. Опарин В. Н. и др. *Методы и системы сейсмо-деформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. – Т. 2. – 261 с. (на русском языке)
5. Рыльникова М. В., Юн А. Б., Терентьева И. В. *Перспективы и стратегия развития Жезказганского месторождения* // *Горный журнал*. – 2015. – № 5. – С. 444–497 (на русском языке)
6. Трубецкой К. Н. *Состояние и основные направления комплексного освоения и сохранения ресурсов земных недр* // *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы Междунар. науч. конф.* – М.: ИПКОН РАН, 2020. – С. 5–11 (на русском языке)
7. *Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях: утв. Минуглепромом СССР 30.12.1987*. – М.: Недра, 1989. – 96 с. (на русском языке)
8. *Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях*. ПБ 07-269-98. – М., 1998 (на русском языке)
9. *Интегрированный мониторинг состояния массива горных пород при крупномасштабном освоении недр* / O. Bazaluk [и др.] // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Т. 10. – Ст. 852591 (на английском языке)

10. Nurpeisova M. B., Abenov A. M., Miletenko N. A. Высокоэффективная процедура мониторинга для прогнозирования деформаций при добыче медной руды // *Eurasian Mining*. – 2023. – № 1. – С. 19–24 (на английском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Нұрпейісова М. Б., т. ғ. д., «Маркшейдерия және геодезия» кафедрасының профессоры, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті (Алматы қ., Қазақстан), marzhan-nurpeisova@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3956-5442>

Қырғызбаева Д. М., Ph.D, «Маркшейдерия және геодезия» кафедрасының ассоц. профессоры, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті (Алматы қ., Қазақстан), dinara@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8869-5497>

Абенев Ә. М., Ph.D докторант, «Маркшейдерия және геодезия» кафедрасының профессоры, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті (Алматы қ., Қазақстан), alishermamaevich@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0956-9207>

Милетенко Н. А., т. ғ. к., Ресей тау-кен академиясының академик Н. В. Мельников атындағы жер қойнауын кешенді игеру мәселелері институтының аға ғылыми қызметкері (Мәскеу қ., Ресей), nmilet@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9912-5529>

Information about authors:

Nurpeisova M., doctor of technical sciences, professor of the Department of of Mine Surveying and Geodesy, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Kyrgyzbayeva D., Ph.D, Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy, Satbayev Kazakh National Technical University (Almaty, Kazakhstan)

Abenov A., Ph.D doctoral student, Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Miletenko N., Candidate of Engineering Sciences Academician N. V. Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON), Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Сведения об авторах:

Нурпейісова М. Б., д. т. н., проф. кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)

Киргизбаева Д. М., Ph.D, ассоц. проф. кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)

Абенев А. М., Ph.D, докторант, кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия», Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан)

Милетенко Н. А., к. т. н., с. н. с. Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова – ИПКОН РАН (г. Москва, Россия)

Организатор:

окружной 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**



31th INTERNATIONAL
SPECIALIZED
TECHNOLOGICAL EXHIBITION

**SURGUT.
OIL & GAS
2026**

23.09 - 25.09

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



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

Код МРНТИ 55.35.33

Б. С. Бейсенов¹, *Н. К. Танатаров¹, И. Б. Бертолеев¹, Йонас Матейошюс²

¹Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),

²Институт механических наук Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса (г. Вильнюс, Литва)

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБРУШЕНИЯ СВОДОВ ЗАВИСШЕГО МАТЕРИАЛА В БУНКЕРАХ С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ УДАРНЫМ ПРИВОДОМ НА БАЗЕ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

Аннотация. В статье рассмотрена модернизированная система обрушения сводов зависшего сыпучего материала в бункерах горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, обеспечивающая повышение эффективности технологических процессов разгрузки. Рабочее воздействие в системе формируется за счет электрогидравлического ударного эффекта, создаваемого при импульсном разряде в жидкой среде, при этом в качестве источника импульсного питания используется генератор импульсных токов, заимствованный из магнитно-импульсных систем и адаптированный под условия промышленной эксплуатации. Приведены конструктивная схема системы, принцип ее действия, а также результаты экспериментальных и расчетных исследований, подтверждающие работоспособность и устойчивость параметров. Показано существенное повышение эффективности разрушения сводов, снижение удельных энергозатрат и увеличение надежности оборудования по сравнению с традиционными методами механического и вибрационного воздействия.

Ключевые слова: бункер, зависший материал, сводообразование, обрушение сводов, электрогидравлический ударный эффект, генератор импульсных токов.

Импульстік ток генератор негізінде электрогидравликалық соққы жетегімен бункерлердегі аспалы материалдардағы тоғыстарды қирату жүйесін жаңғырту

Аннотация. Мақалада тау-кен өндіру және қайта өңдеу кәсіпорындарының бункерлеріндегі ілініп қалған сусымалы материал күмбездерін бұзуға арналған жаңғыртылған жүйе қарастырылған, ол түсіру процестерінің тиімділігін арттыруды қамтамасыз етеді. Жүйедегі жұмыс әсері сұйық ортада импульстік разряд кезінде пайда болатын электрогидравликалық соққы әсері есебінен қалыптасады, ал импульстік коректену көзі ретінде магниттік-импульстік жүйелерден алынған және өндірістік пайдалану жағдайларына бейімделген импульстік ток генераторы қолданылады. Жүйенің конструктивтік сұлбасы, жұмыс істеу принципі, сондай-ақ оның жұмысқа қабілеттілігі мен параметрлерінің тұрақтылығын растайтын эксперименттік және есептік зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Дәстүрлі механикалық және вибрациялық әсер ету әдістерімен салыстырғанда күмбездерді бұзу тиімділігінің едәуір артқаны, меншікті энергия шығындарының төмендегені және жабдықтың сенімділігінің артқаны көрсетілген.

Түйінді сөздер: бункер, аспалы материал, тоғыстың пайда болуы, тоғысты қирату, электрогидравликалық соққы әсері, импульстік ток генераторы.

Modernization of the system for collapsing vaults of suspended material in bunkers with an electro-hydraulic impact drive based on a pulse current generator

Abstract. The article considers a modernized system for collapsing arches of bulk materials formed in bunkers at mining and processing enterprises, aimed at improving the efficiency of unloading processes. The working impact in the system is generated by an electrohydraulic shock effect occurring during a pulsed discharge in a liquid medium, while a pulse current generator borrowed from magnetic pulse systems and adapted for industrial operating conditions is used as a power source. The paper presents the structural scheme of the system, its operating principle, as well as the results of experimental and computational studies confirming its operability and parameter stability. A significant increase in the efficiency of arch destruction, a reduction in specific energy consumption, and an improvement in equipment reliability compared to traditional mechanical and vibrational methods are demonstrated.

Key words: bunker, hanging material, arching, electrohydraulic effect, pulse current generator.

Введение

Бункерные устройства широко применяются в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности для накопления, хранения и дозированной подачи сыпучих материалов [1, 2]. Надежность работы бункеров в значительной степени определяется устойчивостью процесса истечения материала [3–4]. Одной из наиболее распространенных и трудноустраняемых проблем является образование устойчивых сводов зависшего материала, приводящее к нарушению технологического режима, снижению производительности оборудования и увеличению простоев [4–5].

Для разрушения сводов применяются различные методы воздействия, включая механические, вибрационные и пневматические способы. Однако практика эксплуатации показывает, что указанные методы обладают рядом существенных недостатков: ограниченной эффективностью при работе с трудносыпучими и слеживающимися материалами, высоким уровнем энергопотребления и ускоренным износом оборудования [6].

Перспективным направлением является использование импульсных методов воздействия высокой интенсивности, обеспечивающих разрушение сводообразных струк-

тур без длительного механического нагружения конструктивных элементов бункера. Среди таких методов особое место занимает электрогидравлический эффект, впервые открытый и экспериментально обоснованный Л. А. Юткиным [7, 8]. Данный эффект основан на преобразовании энергии кратковременного электрического разряда в жидкой среде в интенсивное ударно-волновое воздействие [9–10]. Дальнейшее развитие данного эффекта позволило расширить область его практического применения, в том числе для разрушения прочных структур и уплотненных массивов материалов.

Вместе с тем реализация электрогидравлического воздействия требует надежных и управляемых источников импульсного питания, обеспечивающих воспроизводимость энергетических параметров разрядов. В этой связи актуальной является задача модернизации систем обрушения сводов зависшего материала за счет применения электрогидравлического ударного привода с импульсным источником питания на базе генератора импульсных токов [11–12].

Научная новизна работы заключается в обосновании и реализации способа импульсного воздействия на своды зависшего материала, при котором электрогидравлический эффект

используется в замкнутом объеме, стенки которого находятся в непосредственном контакте со стенками бункера, что обеспечивает передачу ударно-волнового импульса по площади контакта и позволяет отказаться от применения электродинамических сил и металлических ударных пластин, характерных для магнитно-импульсных систем [11–12].

Теоретическое обоснование предлагаемого способа базируется на положениях электрогидравлического эффекта, заключающегося в преобразовании энергии электрического разряда в жидкой среде в энергию ударной волны. При импульсном пробое межэлектродного промежутка формируется плазменный канал с высокой температурой и давлением, что приводит к возникновению сферически распространяющейся ударной волны.

Давление в зоне разряда определяется запасенной электрической энергией и условиями ее преобразования, а разрушение сводообразных структур происходит за счет кратковременных импульсных напряжений, превышающих силы внутреннего трения и сцепления частиц сыпучего материала.

В отличие от вибрационных и статических методов, эффективность воздействия определяется не столько величиной энергии, сколько скоростью ее высвобождения и импульсным характером нагрузки.

Материалы и методы

Модернизированная система обрушения сводообразных завесаний предназначена для разрушения устойчивых арок структур сыпучего материала, формирующихся в бункерах и рудоспусках. Конструктивно система включает электрогидравлический ударный привод, исполнительный элемент передачи импульса, узел крепления к стенке бункера и импульсный источник питания – генератор импульсных токов.

Электрогидравлический ударный привод выполнен в виде герметичной камеры, заполненной жидкой рабочей средой, внутри которой размещены разрядные электроды. Электроды подключены к генератору импульсных токов и предназначены для формирования высоковольтного импульсного разряда. Камера электрогидравлического воздействия установлена с внешней стороны бункера и находится в непосредственном механическом контакте со стенкой бункера либо соединена с ней через специальный передающий элемент.

При подаче импульсного напряжения между электродами в рабочей среде возникает электрический разряд, сопровождающийся образованием плазменного канала и резким локальным ростом давления. Данный процесс реализует электрогидравлический эффект и приводит к формированию кратковременного импульса давления и ударной волны, распространяющейся в жидкости и воздействующей на стенки камеры.

Передача импульса давления на стенку бункера осуществляется по всей площади контакта камеры, что принципиально отличает рассматриваемую систему от магнитно-импульсных устройств, в которых воздействие формируется электродинамическими силами, локализованными в зоне действия индуктора или ударной пластины. Площадной характер нагрузки обеспечивает более

равномерное распределение напряжений в стенке бункера и возбуждение упругих волн, распространяющихся в массиве зависшего материала.

В результате кратковременного импульсного воздействия в теле свода возникают инерционные силы и напряжения, превышающие силы сцепления и внутреннего трения между частицами материала, что приводит к разрушению сводообразной структуры и переходу материала в текучее состояние. Существенным преимуществом системы является отсутствие длительного вибрационного нагружения конструкции бункера, что снижает динамическое воздействие на элементы оборудования и уменьшает удельные энергозатраты.

Источником питания электрогидравлического привода служит генератор импульсных токов, конструктивно и схематехнически заимствованный из магнитно-импульсных систем. В рассматриваемой системе генератор используется исключительно для формирования электрических импульсов заданной энергии и длительности и не участвует в создании магнитно-импульсного воздействия.

Регулирование режима работы системы осуществляется изменением параметров импульсного питания, включая энергию разряда, длительность импульса и частоту их следования. Это позволяет адаптировать систему к различным физико-механическим свойствам сыпучих материалов, в том числе к материалам с повышенной влажностью и склонностью к слеживанию, а также к различным геометрическим и эксплуатационным условиям бункеров.

Таким образом, предложенная конструкция сочетает преимущества электрогидравлического ударного эффекта и импульсного источника питания, обеспечивая эффективное разрушение устойчивых сводов зависшего материала при сравнительно низких энергозатратах, высокой надежности и расширенной области рационального применения по сравнению с традиционными вибрационными и магнитно-импульсными системами.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке (рис. 1–3), моделирующей процесс электрогидравлического воздействия в замкнутом объеме жидкости.

Состав установки:

- генератор импульсных токов (ГИТ);
- конденсаторная батарея емкостью $C = 0,4$ мкФ;
- высоковольтный разрядник;
- разрядная камера объемом $V = (5–20) \cdot 10^{-6}$ м³;
- система измерения давления;
- регистрирующая аппаратура.

Принцип работы установки. Конденсаторная батарея заряжается до заданного напряжения (до $U = 50$ кВ); при срабатывании разрядника происходит пробой межэлектродного промежутка; в жидкости формируется плазменный канал; возникает ударная волна, распространяющаяся в объеме камеры; давление регистрируется датчиком и фиксируется измерительной системой;

Характеристики используемых приборов:

- генератор импульсных токов: напряжение до 50 кВ, длительность импульса $\sim 10^{-6}–10^{-5}$ с;

- датчик давления (манометр): диапазон измерений до 10 МПа, погрешность не более $\pm 5\%$;
- осциллограф: полоса пропускания не менее 100 МГц;
- система регистрации: цифровая, с временным разрешением до 1 мкс.

Регулирование параметров эксперимента осуществлялось изменением напряжения заряда, емкости и межэлектродного зазора.



Рис. 1. Общий вид установки.
Сурет 1. Орнатудың жалпы көрінісі.
Figure 1. General view of the installation.



Рис. 2. Разрядная камера установки.
Сурет 2. Орнатудың шығару камерасы.
Figure 2. Discharge chamber of the installation.

Расчет энергии разряда создаваемой ГИТ лабораторной установки при емкости конденсаторов 0,4 мкФ и зарядного напряжения 50 кВ.

Энергия, запасаемая в конденсаторной батарее, определяется формулой 1:

$$E_{эд} = \frac{1}{2} CU^2, \quad (1)$$

где, $E_{эл}$ – электрическая энергия, Дж;
 C – емкость конденсатора, Ф;
 U – напряжение, В.

Подстановка численных значений:

$$E_{эл} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot (5 \cdot 10^4)^2 \approx 500 \text{ Дж.}$$

С учетом коэффициента преобразования энергии (формула 2):

$$E_{имп} = \eta \cdot E_{эд}, \quad (2)$$

где, $E_{имп}$ – энергия ударного импульса, Дж;

η – коэффициент преобразования (0,01–0,05).

Тогда:

$$E_{имп} \approx 5\text{--}25 \text{ Дж.}$$

Максимальное давление определяется формулой 3:

$$p_{max} = \frac{E_{имп}}{V}, \quad (3)$$

где, p_{max} – максимальное давление, Па;

V – объем камеры, м³.

При $V = (5\text{--}20) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$:

$p_{max} \approx 0,25\text{--}5 \text{ МПа.}$

При принятых параметрах ЭГУ было достигнуто давление порядка 0,9 МПа (рис. 3).

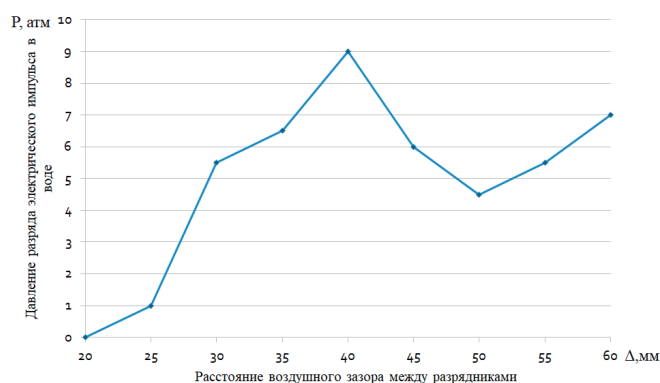


Рис. 3. Зависимость давления, образовавшегося в результате разряда электрического импульса в воде от расстояния воздушного зазора в высоковольтном разряднике.

Сурет 3. Судағы электр импульсінің разрядталуы нәтижесінде пайда болған қысымның жоғары вольтты разрядтағы ауа саңылауының қашықтығына тәуелділігі.

Figure 3. Dependence of the pressure formed as a result of the discharge of an electric pulse in water on the distance of the air gap in a high-voltage arrester.

Полученные значения согласуются с расчетами импульсного воздействия и подтверждают эффективность ЭГУ для разрушения своеобразных зависимостей сыпучего материала.

Разрушение свода в данном случае будет обусловлено высокой скоростью нарастания давления и импульсным характером нагрузки, а не величиной суммарной энергии, что принципиально отличает ЭГУ от статических и вибрационных методов воздействия.

Увеличение площади контакта S при заданной энергии импульса повышает эффективность передачи механического воздействия и снижает локальные напряжения в конструкции бункера.

Обсуждение результатов

Проведенные расчетные исследования были направлены на анализ параметров ударной волны, формируемой в результате электрогидравлического разряда, а также на оценку импульса давления, передаваемого массиву зависшего сыпучего материала. Расчеты выполнялись на основе моделей распространения ударных волн в жидкой среде с учетом их отражения и затухания при взаимодействии со стенками бункера. Полученные расчетные значения уровня давления и длительности импульса показали удовлетворительное согласование с результатами экспериментальных исследований.

Анализ энергетических показателей показал, что применение генератора импульсных токов в качестве источника питания электрогидравлического привода позволяет существенно снизить удельные энергозатраты на разрушение сводообразных завесаний по сравнению с непрерывными методами воздействия. Это обусловлено высокой концентрацией энергии в коротком временном интервале и отсутствием необходимости длительного нагружения конструкции бункера.

В ходе экспериментальных испытаний была подтверждена возможность регулирования режимов работы системы за счет изменения параметров импульсного питания. Данный подход обеспечивает адаптацию электрогидравлического устройства к различным условиям эксплуатации и типам сыпучих материалов, включая материалы с повышенной влажностью и склонностью к слеживанию.

Установлено, что при энергии импульса в диапазоне 1–3 кДж обеспечивается надежное разрушение устойчивых сводов. Расчетные оценки параметров ударной волны в указанном энергетическом диапазоне находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными данными по максимальному давлению и длительности импульса.

Результаты экспериментов показали, что применение электрогидравлического ударного привода обеспечивает разрушение сформированных сводов при существенно меньшем времени воздействия по сравнению с традиционными вибрационными методами. При этом эффективность обрушения определяется не только энергией импульса, но и расстоянием от зоны разряда до поверхности взаимодействия с массивом материала. Импульсный характер нагрузки способствует локальному разрушению

сводообразных структур без формирования остаточных уплотнений в прилегающих зонах.

Сравнительный анализ показал, что по отношению к вибрационным методам удельные энергозатраты на разрушение сводов снижаются на 25–30 %, что обусловлено высокой плотностью энергии и кратковременностью импульсного воздействия.

Полученные результаты согласуются с фундаментальными представлениями об электрогидравлическом эффекте, сформулированными Л. А. Юткиным, и подтверждают его эффективность при решении задач разрушения сводообразных завесаний в бункерах и рудоспусках.

Следует отметить, что рассматриваемый подход не предъявляет требований к электропроводности и материалу стенок бункера, что позволяет эффективно применять электрогидравлические системы в конструкциях с металлическими, футерованными и комбинированными стенками. Тем самым устраняются принципиальные ограничения, характерные для магнитно-импульсных систем, и расширяется область рационального применения импульсных методов обрушения сводообразных структур.

Полученные зависимости подтверждают, что ключевым фактором разрушения сводообразных структур является высокая скорость нарастания давления (градиент давления), а не только его максимальное значение. Это согласуется с теорией импульсного разрушения, согласно которой кратковременные динамические напряжения более эффективно преодолевают силы сцепления частиц по сравнению с квазистатическими нагрузками.

Заключение

1. Обоснована целесообразность применения электрогидравлического ударного эффекта для разрушения сводов зависшего материала в бункерах.
2. Разработана модернизированная система обрушения сводов с электрогидравлическим ударным приводом и импульсным источником питания.
3. Показано, что использование генератора импульсных токов обеспечивает устойчивость и воспроизводимость энергетических параметров разрядов.
4. Экспериментально подтверждено снижение удельных энергозатрат по сравнению с традиционными методами.
5. Система может быть рекомендована для модернизации действующих бункеров горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спиваковский А. О., Дьячков В. К. Механизация и автоматизация перегрузочных процессов в горной промышленности. – М.: Недра, 1985. – 368 с. (на русском языке)
2. Зенков Р. Л., Ивлев И. И. Бункерные устройства и питатели сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с. (на русском языке)
3. Метод оптимизации формы бункера с улучшением структуры массового потока и снижением сегрегации частиц / X. Huang [и др.] // *Chemical Engineering Science*. – 2022. – Т. 253. – Ст. 117579 (на английском языке)
4. Колобов Л. Н., Пертен Ю. А. Анализ причин сводообразования в бункерах горных предприятий // *Горный журнал*. – 2008. – № 6. – С. 42–46 (на русском языке)
5. Течение и сводообразование частиц биомассы в клиновидных бункерах / Y. Lu [и др.] // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2021. – Т. 9. – № 45. – С. 15267–15278 (на английском языке)

6. Баклицкий В. А., Савельев С. А. Применение импульсных методов для интенсификации истечения сыпучих материалов // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 55–60 (на русском языке)
7. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 212 с. (на русском языке)
8. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1960. – 278 с. (на русском языке)
9. Численное моделирование процессов распространения трещин и накопления повреждений в угольном пласте при воздействии контролируемых высокоэнергетических ударных волн / S. Wan [и др.] // Applied Sciences. – 2025. – Т. 15. – № 22. – Ст. 12279 (на английском языке)
10. Брагинский В. Б., Розенфельд Л. М. Электрогидравлический эффект и его технические применения. – М.: Энергия, 1971. – 256 с. (на русском языке)
11. Юдин В. А., Куликов С. В. Электрогидравлические ударные устройства в технологических процессах. // Техника и технология горного производства. – 2015. – № 2. – С. 18–24 (на русском языке)
12. Михайлов А. Н. Использование генераторов импульсных токов в импульсных энергетических установках // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 12–17 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Спиваковский А. О., Дьячков В. К. Тау-кен өнеркәсібіндегі тиеу-түсіру процестерін механикаландыру және автоматтандыру. – Мәскеу: Недра, 1985. – 368 б. (орыс тілінде)
2. Зенков Р. Л., Ивлев И. И. Үйінді материалдарға арналған бункерлік құрылғылар мен қоректендіргіштер. – Мәскеу: Машиностроение, 1990. – 320 б. (орыс тілінде)
3. Массалық ағын құрылымын жақсарту және бөлшектер сегрегациясын азайту арқылы бункер пішінін оңтайландыру әдісі / X. Huang [және т. б.] // Chemical Engineering Science. – 2022. – Т. 253. – 117579 (ағылшын тілінде)
4. Колобов Л. Н., Пертен Ю. А. Тау-кен кәсіпорындарының бункерлерінде күмбез түзілу себептерін талдау. // Тау-кен журналы. – 2008. – № 6. – Б. 42–46 (орыс тілінде)
5. Сына тәрізді бункерлердегі биомасса бөлшектерінің ағуы және күмбез түзілуі / Y. Lu [және т. б.] // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2021. – Т. 9. – № 5. – Б. 15267–15278 (ағылшын тілінде)
6. Баклицкий В. А., Савельев С. А. Үйінді материалдардың ағуын қарқындалту үшін импульстік әдістерді қолдану // ЖОО хабаршысы. Тау-кен журналы. – 2012. – № 4. – Б. 55–60 (орыс тілінде)
7. Юткин Л. А. Электрогидравликалық эффект. – Мәскеу; Ленинград: Госэнергоиздат, 1955. – 212 б. (орыс тілінде)
8. Юткин Л. А. Электрогидравликалық эффект және оның өнеркәсіпте қолданылуы. – Ленинград: Машиностроение, 1960. – 278 б. (орыс тілінде)
9. Басқарылатын жоғары энергиялы соққы толқындары әсеріндегі көмір қабатындағы жарықшақтардың таралуы мен бұзылу эволюциясын сандық модельдеу / S. Wang [және т. б.] // Applied Sciences. – 2025. – Т. 15. – № 22. – 12279 (ағылшын тілінде)
10. Брагинский В. Б., Розенфельд Л. М. Электрогидравликалық эффект және оның техникалық қолданылуы. – Мәскеу: Энергия, 1971. – 256 б. (орыс тілінде)
11. Юдин В. А., Куликов С. В. Технологиялық процестердегі электрогидравликалық соққы құрылғылары // Тау-кен өндірісінің техникасы мен технологиясы. – 2015. – № 2. – Б. 18–24 (орыс тілінде)
12. Михайлов А. Н. Импульстік энергетикалық қондырғыларда импульстік ток генераторларын пайдалану // Электротехника. – 2010. – № 9. – Б. 12–17 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Spivakovsky A. O., Dyachkov V. K. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya peregruzochnykh protsessov v gornoy promyshlennosti [Mechanization and automation of loading and unloading processes in mining industry]. – Moscow: Nedra, 1985. – 368 p. (in Russian)
2. Zenkov R. L., Ivlev I. I. Bunkernye ustroystva i pitateli sypuchikh materialov [Bunker devices and feeders of bulk materials]. – Moscow: Mashinostroenie, 1990. – 320 p. (in Russian)
3. A design method of hopper shape optimization with improved mass flow pattern and reduced particle segregation / X. Huang et al. // Chemical Engineering Science. – 2022. – Vol. 253. – Article 117579 (in English)
4. Kolobov L. N., Perten Yu. A. Analiz prichin svodoobrazovaniya v bunkerah gornyykh predpriyatiy [Analysis of arch formation causes in bunkers of mining enterprises] // Gornyy zhurnal [Mining Journal]. – 2008. – No. 6. – P. 42–46 (in Russian)
5. Flow and arching of biomass particles in wedge-shaped hoppers / Y. Lu et al. // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2021. – Vol. 9. – No. 45. – P. 15267–15278 (in English)

6. Baklitsky V. A., Saveliev S. A. *Primenenie impulsnykh metodov dlya intensivifikatsii istecheniya sypuchikh materialov* [Application of pulse methods for intensification of bulk material flow]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [University News. Mining Journal]. – 2012. – No. 4. – P. 55–60 (in Russian)
7. Yutkin L. A. *Elektrohydraulicheskiy effect* [Electrohydraulic effect]. – Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1955. – 212 p. (in Russian)
8. Yutkin L. A. *Elektrohydraulicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti* [Electrohydraulic effect and its industrial application]. – Leningrad: Mashinostroenie, 1960. – 278 p. (in Russian)
9. Numerical simulation of fracture propagation and damage evolution in coal seam under controlled high-energy shock wave fracturing / S. Wang et al. // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – No. 22. – Article 12279 (in English)
10. Braginsky V. B., Rosenfeld L. M. *Elektrohydraulicheskiy effekt i ego tekhnicheskie primeneniya* [Electrohydraulic effect and its technical applications]. – Moscow: Energiya, 1971. – 256 p. (in Russian)
11. Yudin V. A., Kulikov S. V. *Elektrohydraulicheskie udarnye ustroystva v tekhnologicheskikh protsessakh* [Electrohydraulic impact devices in technological processes]. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo proizvodstva* [Equipment and Technology of Mining Production]. – 2015. – No. 2. – P. 18–24 (in Russian)
12. Mikhailov A. N. *Ispolzovanie generatorov impulsnykh tokov v impulsnykh energeticheskikh ustanovkakh* [Application of pulse current generators in pulsed power installations]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. – 2010. – No. 9. – P. 12–17 (in Russian)

Сведения об авторах:

Бейсенов Б. С., к. т. н., ассоциированный профессор кафедры «Технологические машины и газотурбинные установки», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), b.beisenov@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-6501-6746>

Танатар Н. К., докторант ОП «Механика и металлообработка» (Образовательная программа: Промышленное машиностроение), Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), nursul_ktl@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4900-3587>

Бертолеев И. Д., докторант ОП «Механика и металлообработка» (Образовательная программа: Цифровая инженерия машин и оборудования), Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), i.bertoleyev@satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0008-3649-4299>

Йонас Матейошюс, Ph.D, ассоциированный профессор, руководитель лаборатории экспериментальной механики, ведущий научный сотрудник Института механических наук Вильнюсского технического университета им. Гедиминаса (г. Вильнюс, Литва), jonas.matijosius@vilniustech.lt; <https://orcid.org/0000-0001-6006-9470>

Авторлар туралы мәліметтер:

Бейсенов Б. С., т. ғ. к., «Технологиялық машиналар және газтурбиналық қондырғылар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Таңатар Н. Қ., «Механика және металл өңдеу» (Білім беру бағдарламасы: Өнеркәсіптік машина жасау) білім беру бағдарламасының докторанты, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Бертолеев И. Д., «Механика және металл өңдеу» ОП докторанты (Білім беру бағдарламасы: Машиналар мен жабдықтардың цифрлық инженериясы), Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Йонас Матейошюс, Ph.D докторы, доцент, эксперименттік механика зертханасының меңгерушісі, Вильнюс Гедиминас техникалық университетінің механикалық ғылымдар институтының жетекші ғылыми қызметкері (Вильнюс қ., Литва)

Information about the authors:

Beisenov B. S., Ph.D., Associate Professor of the Department of Technological machines and gas turbine installations, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Tangatar N. K., Doctoral Student of the Educational Program «Mechanics and Metalworking» (Educational program: Industrial Engineering), Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Bertoleev I. D., Doctoral Student, Mechanics and Metal Processing (Educational program: Digital Engineering of Machines and Equipment), Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Jonas Matijosius, Ph.D, Associate Professor, Head of the Experimental Mechanics Laboratory, Leading Researcher at the Institute of Mechanical Sciences, Vilnius Gediminas Technical University (Vilnius, Lithuania)

Код МРНТИ 53.31.21

*Ye. U. Zhumagaliyev¹, N. A. Ulmagambetov², B. T. Uakhitova¹, D. T. Ospanov¹¹Zhubanov University (Aktobe, Kazakhstan),²Research and Development LLP (Aktobe, Kazakhstan)

ENHANCING THE SERVICE LIFE OF FERROCHROME CASTING LADLES USING PROTECTIVE REFRACTORY COATINGS

Abstract. Lining wear of casting ladles is a key challenge in high-carbon ferrochrome production, leading to reduced service life and increased operating costs. This study presents a laboratory and pilot-industrial evaluation of protective refractory coatings during tapping of $FeCr$ 800–850 ferrochrome. Coatings based on chamotte, quartzite, and secondary materials with various binders were investigated. Liquid glass was found to exhibit poor adhesion, whereas a combined binder system (cement – bentonite – organic additive) demonstrated the highest stability. Chamotte-based coatings increased ladle service life to 13–18 heats (compared to 10 in the baseline regime), quartzite coatings showed a moderate effect, while slag-based coatings were ineffective.

Key words: high-carbon ferrochrome, casting ladle, refractory lining, service life improvement, secondary materials, pilot-industrial testing.

Феррохромды құю шөміштерінің қызмет ету мерзімін қорғаушы отқа төзімді қаптамаларды қолдану арқылы ұзарту

Аннотация. Құю шөміштерінің қаптамаларының тозуы жоғары көміртекті феррохром өндірісіндегі негізгі мәселелердің бірі болып табылады, бұл жабдықтың қызмет ету мерзімінің қысқаруына және шығындардың артуына әкеледі. Жұмыста $FeCr$ 800–850 феррохромын құю кезінде қорғаныш отқа төзімді қаптамалардың тиімділігі зертханалық және тәжірибелік-өнеркәсіптік деңгейде бағаланды. Шамот, кварцит және қайталама материалдар негізіндегі әртүрлі байланыстырғыштары бар жабындар зерттелді. Сұйық шынының адгезиясы төмен екені анықталды, ал цемент – бентонит – органикалық қоспа негізіндегі кешенді байланыстырғыш ең жоғары тұрақтылықты көрсетті. Шамотты қаптамалар шөміштің қызмет ету мерзімін 13–18 балқытуға дейін арттырады (базалық режимдегі 10 балқытуға қарсы), кварцитті қаптамалар орташа әсер береді, ал қож негізіндегі қаптамалар тиімсіз болып табылады.

Түйінді сөздер: жоғары көміртекті феррохром, құю шөміші, отқа төзімді қаптама, қызмет ету мерзімін арттыру, екінші реттік шикізат, тәжірибелік-өнеркәсіптік сынақтар.

Повышение срока службы разливочных ковшей для феррохрома с использованием защитных огнеупорных покрытий

Аннотация. Износ футеровки разливочных ковшей является ключевой проблемой производства высокоуглеродистого феррохрома, приводящей к снижению срока службы и росту затрат. В работе выполнена лабораторная и опытно-промышленная оценка защитных огнеупорных покрытий при разливке феррохрома $FeCr$ 800–850. Исследованы покрытия на основе шамота, кварцита и вторичных материалов с различными связующими. Установлено, что жидкое стекло обеспечивает низкую адгезию, тогда как комбинированное связующее (цемент – бентонит – органическая добавка) демонстрирует наилучшую стабильность. Шамотные покрытия увеличивают срок службы ковшей до 13–18 плавок (против 10 в базовом режиме), кварцитовые обеспечивают умеренный эффект, а шлаковые покрытия являются неэффективными.

Ключевые слова: высокоуглеродистый феррохром, разливочный ковш, огнеупорная футеровка, увеличение срока службы, вторичное сырье, опытно-промышленные испытания.

Introduction

Degradation and wear of refractory linings exposed to metal–slag melts remain a significant technological issue in modern metallurgical processes. Premature damage of ladle linings and casting equipment can result in unexpected production interruptions, higher maintenance expenditures, and a decline in operational reliability and safety [1–3]. Consequently, improving the durability of refractory materials has become an important objective in the context of increasing demands for energy efficiency and cost optimization.

The production of high-carbon ferrochrome is associated with elevated melt temperatures, chemically aggressive metal–slag systems, and severe thermomechanical stresses acting on refractory materials. Interaction between ferrochrome slags and refractory linings involves processes such as chemical dissolution, slag infiltration, and thermochemical corrosion, all of which contribute to accelerated lining wear and reduced service life [4–6]. Additional deterioration occurs during the mechanical removal of metal–slag accretions, which damages the lining surface and intensifies wear processes [7].

Conventional methods for extending ladle lining lifetime include increasing the thickness of refractory masonry or applying monolithic refractory materials. However, a thicker lining decreases the effective ladle capacity and increases the overall weight of the structure, which negatively affects technological performance and increases the load on lifting equipment.

An alternative approach involves the application of protective refractory coatings to the working surface of ladle linings.

Such coatings, typically composed of finely dispersed refractory materials combined with inorganic binders, can reduce both chemical and mechanical interaction with the primary lining, as reported in several review and industrial studies [8]. This approach is widely applied in steelmaking, where the effectiveness of protective coatings for ladles and intermediate vessels has been confirmed in both laboratory and industrial conditions [9].

Recently, increasing attention has been given to the use of secondary refractory and metallurgical materials, such as ferroalloy slags and industrial dusts, in coating compositions. Their use corresponds to resource-efficiency and circular economy principles but requires experimental verification of thermal stability, chemical compatibility, and resistance to aggressive metal–slag melts [10]. For high-carbon ferrochrome production, systematic studies in this area remain limited.

In this context, the present study provides a comparative laboratory evaluation of several protective refractory coating compositions, followed by pilot-industrial validation under ferrochrome casting conditions. Unlike steelmaking processes, ferrochrome production is characterized by higher temperatures and increased chemical aggressiveness of chromium-containing slags, which intensifies refractory wear and necessitates adaptation of protective coatings to ferroalloy conditions.

The novelty of the work lies in the systematic laboratory and pilot-industrial assessment of coatings based on both primary and secondary refractory materials, including ferro-

chrome slags and industrial dusts, as well as in the application of a combined binder system providing enhanced adhesion and thermal stability.

Methods

Industrial Context and Description of Casting Ladles

The production of high-carbon ferrochrome at the Aktobe Ferroalloy Plant is carried out under conditions of high metal-slag temperatures and increased chemical aggressiveness toward refractory materials. Ferrochrome smelting is performed in two production units: Smelting Shop No. 4 and Smelting Shop No. 1, equipped with direct-current and alternating-current electric arc furnaces, respectively.

The main volume of ferrochrome is produced in Smelting Shop No. 4, where casting is performed without intermediate equipment. The remaining production is smelted in Smelting Shop No. 1, where the casting process involves the use of dedicated casting ladles.

Although identical grades of high-carbon ferrochrome are produced in both shops, the casting conditions and auxiliary equipment differ, which affects the operating conditions of refractory linings. In Smelting Shop No. 1, casting ladles are a key element of the technological process and are subjected to intense thermochemical and mechanical loads.

The casting ladle is a steel structure with a flat bottom, equipped with side trunnions for transportation and tilting (Figure 1). Its inner surface is lined with chamotte refractory bricks of grade ShB-5.



Figure 1. General view of the casting ladle used in Smelting Shop No. 1.

Сурет 1. № 1 Балқыту цехында қолданылатын құю ожауының жалпы көрінісі.

Рис. 1. Общий вид разливочного ковша, используемого в плавильном цехе № 1.

The lining of casting ladles is constructed in one or two layers depending on the grade of the cast ferrochrome and its chemical composition. During the casting of ferrochrome grades **FeCr** 800–950 with a carbon content of 8.01–9.49 wt. %, a single-layer lining is applied, in which chamotte bricks are installed on edge with a radial orientation relative to the vertical axis of the ladle. The average service life of such a lining reaches up to ten heats.

When casting ferrochrome grades **FeCr** 600–650 with a reduced carbon content (6.01–6.49 wt. %), a two-layer lining configuration is used, in which the bricks are laid flat (Figure 2). This configuration facilitates replacement of the working lining layer; however, its service life typically does not exceed six heats, which is attributed to the increased chemical aggressiveness of the melt toward chamotte refractory materials.

Thus, the operating conditions of casting ladles in Smelting Shop No. 1 are characterized by intense thermochemical interaction between the metal-slag melt and the refractory lining, as well as additional mechanical loads during the removal of metal-slag accretions after casting. Therefore, the limited service life of the lining, even with a two-layer configuration, requires additional protection methods, including the application of protective refractory coatings to the working surface.



Figure 2. Lining of the ladle for casting ferrochrome grades **FeCr 600–650.**

Сурет 2. FeCr 600–650 маркалы феррохромды құюға арналған ожаудың қаптамасы.

Рис. 2. Футеровка ковша для разлива феррохрома марки FeCr 600–650.

Materials for Protective Refractory Coatings

Protective refractory coatings intended for application to the working surface of casting ladle linings were studied. The selection of coating components was based on their refractory properties, thermal resistance, and suitability for use under high-carbon ferrochrome casting conditions.

Both primary refractory materials and secondary metallurgical raw materials from ferrochrome production were used as fillers. Primary materials included ground chamotte, microsilica, quartzite, and corundum, while secondary materials consisted of processed ferrochrome slags and industrial dust generated in plant units.

To ensure coating formation and adhesion to the refractory substrate, inorganic binders and plasticizing additives were used. Sodium silicate and sodium aluminate were used as binding agents, while bentonite clay was incorporated in several compositions to enhance mixture plasticity and improve structural stability of the coating layer.

The coating formulations were designed with consideration of their applicability under industrial ladle operating condi-

tions and their ability to retain structural integrity during thermal loading and contact with metal-slag melts. The investigated compositions together with their approximate refractoriness values obtained in laboratory experiments are summarized in Table 1.

Sample Preparation and Thermal Treatment

Protective refractory coatings were prepared under laboratory conditions using a standardized procedure. Dry components were weighed in the required proportions and mixed in a laboratory mixer until a homogeneous mixture was obtained. The binder was then gradually added under continuous stirring to form a plastic mass. For mixtures with low wettability, plasticizers such as refractory or bentonite clay were introduced. When bentonite acted as the binder, water was added after dry mixing until the required consistency was achieved.

Table 1

Compositions of protective refractory coatings and their refractoriness

Кесте 1

Қорғаныш отқа төзімді жабындардың құрамы және олардың отқа төзімділігі

Таблица 1

Составы защитных огнеупорных покрытий и их огнеупорность

Mixture composition	Refractoriness*, °C	Remarks
Ground chamotte – 85% Bentonite (refractory clay) – 8–10% Sodium silicate – 10–20%	1730	Bentonite used as a plasticizer
Microsilica – 75% Ferrochrome slag – 5% Sodium silicate – 20%	1750	-
Quartzite Sodium silicate – 20%	1750	-
High-carbon ferrochrome slag – 80% Sodium silicate – 20%	1730	-
Baghouse dust – 90% Bentonite – 5% Sodium silicate (as required)	1890	Bentonite used as a plasticizer
Ground corundum from launders Sodium silicate / sodium aluminate	1800	-

*the refractoriness of the listed mixtures was determined by laboratory testing

The prepared mixtures were applied to refractory substrates or molded into specimens and dried in an oven at temperatures up to 200 °C for 15 min to remove excess moisture. After cooling, the samples were visually inspected for cracks, deformation, or binder degradation.

To evaluate high-temperature behavior, the specimens were heated in a muffle furnace at 1000 °C for 15 min, followed by air cooling. The selected temperature corresponds to the onset of intensive thermochemical interaction between refractory materials and ferrochrome slags and allows evaluation of coating stability under conditions close to industrial practice. The holding time represents short-term thermal exposure typical of casting operations and is used for rapid comparative assessment of thermal stability, structural integrity, and adhesion without reproducing the full operating cycle of the ladle.

After heating, the samples were re-examined for dimensional changes and coating shrinkage. Only compositions that retained structural integrity without visible defects were selected for further testing with metal-slag melts.

Tests on Interaction with Metal-Slag Melts

The resistance of protective refractory coatings to metal-slag melts was investigated using previously prepared specimens that had undergone thermal treatment and showed no visible defects. The experiments were carried out under laboratory conditions in a Tammann furnace. High-carbon ferrochrome or the corresponding slag was melted in a refractory crucible until a stable liquid phase was obtained. After that, samples with the applied coatings on chamotte brick fragments were immersed into the melt. The exposure time was 30 min, simulating the direct interaction between the protective lining layer and liquid metal-slag melts during casting operations. After the test period, the specimens were removed and allowed to cool in air.

Following cooling, the interaction between the coatings and the melts was analyzed. The evaluation included visual assessment of wetting behavior and adhesion of metal or slag to the coating surface, as well as determination of the melt penetration depth into the protective layer. The obtained results were used to compare the resistance of the investigated compositions and to identify the most promising coatings for further pilot-industrial testing.

Criteria for Evaluating the Effectiveness of Protective Coatings

The performance of protective refractory coatings was assessed using a set of qualitative indicators describing their behavior during thermal treatment and interaction with metal-slag melts. The evaluation relied on the results obtained from laboratory experiments.

The key assessment parameters included the ability of the coating to maintain structural integrity after heating and cooling without through-thickness damage, the absence of pronounced cracking, delamination, or degradation, and the nature of the interaction between the coating and the metal-slag melt under direct contact conditions. Additional factors considered were the visually observed wetting and adhesion of the melt, the degree of melt penetration into the coating structure, and the technological suitability of the compositions, including ease of preparation and application. Coating compositions that met these requirements were regarded as the most promising candidates for further investigation and subsequent pilot-industrial testing under ferroalloy production conditions.

Pilot-Industrial Trials of Casting Ladles

Pilot-industrial testing of protective refractory coatings was performed during the production of high-carbon ferrochrome grades **FeCr** 800–850 at Smelting Shop No. 1. using a casting ladle with the worn refractory lining completely removed.

After installation of a chamotte brick lining according to technological regulations, protective coatings were applied to separate areas of the lining surface. The mixtures were based on ground chamotte scrap, quartzite, and ground high-carbon ferrochrome slag, using sodium silicate as the binder. During transportation of the ladle to the drying station, all coatings delaminated from the lining surface. Increasing the binder content did not improve adhesion; therefore, further trials with sodium silicate binders were discontinued.

A combined binder system consisting of cement, bentonite, and lignosulfonate (Ligno) was subsequently applied, providing stable adhesion regardless of filler type. At the first stage, the ladle was coated with a mixture containing ground chamotte (85%), cement (6%), Ligno (3%), and bentonite (6%) with a moisture content of about 20%. The appearance of the ladle with the chamotte-based protective coating before pilot-industrial operation is shown in Figure 3.



Figure 3. Appearance of the casting ladle with a chamotte-based protective refractory coating prior to pilot-industrial operation.

Сурет 3. Тәжірибелік-өнеркәсіптік пайдалану алдында шамот негізіндегі қорғаныш отқа төзімді жабыны бар құю ожауының сыртқы көрінісі.

Рис. 3. Внешний вид разливочного ковша с защитным огнеупорным покрытием на основе шамота перед опытно-промышленной эксплуатацией.

After application of the coating, the ladle was filled with sand and placed at the drying station for 30–40 min in accordance with standard operating procedures. Visual inspection showed no cracking or delamination of the protective layer, after which the ladle was put into operation without changes to the standard casting practice. Similar trials were performed for coatings based on ground quartzite and ground high-carbon ferrochrome slag using the same combined binder system. Three ladles were tested for each coating type. During operation, the number of heats until ladle withdrawal from service was recorded, and the average service life values are presented in Table 2.

A significant influence on the performance of protective coatings is exerted by the binder composition. The combined system based on cement, bentonite, and lignosulfonate provides a synergistic effect through the formation of a rigid framework, improved plasticity and adhesion, and reduced cracking.

In contrast, sodium silicate-based binders exhibit insufficient adhesion and a tendency to crack, leading to coating delamination. Thus, not only the filler composition but also the binder type plays a decisive role.

Results and Discussion

Results of Laboratory Testing of Protective Refractory Coatings

A comparative laboratory study was performed for six compositions of protective refractory coatings differing in filler materials and binder systems. The preliminary screening considered mixture plasticity, adhesion to the chamotte substrate, resistance to drying at 200 °C, and thermal stability at 1000 °C.

Several compositions demonstrated unsatisfactory characteristics. The corundum-based mixture showed insufficient plasticity and weak adhesion to the refractory substrate. Coatings containing microsilica required a higher water addition (up to about 40 wt. % of the filler), which resulted in reduced adhesion and delamination after drying. Mixtures incorporating chromite dust exhibited good plasticity and adhesion but lacked thermal stability, as drying at 200 °C caused deep cracking and partial separation of the coating layer.

The best performance was observed for coatings based on ground chamotte, quartzite, and high-carbon ferrochrome slag. These compositions maintained structural integrity after drying and subsequent heating to 1000 °C, showed no significant cracking, and adhered satisfactorily to the chamotte substrate. Consequently, these mixtures were selected for further investigation of their interaction with metal-slag melts.

Interaction of Protective Coatings with Metal-Slag Melts

Tests of metal-slag resistance revealed differences in the interaction of coatings with molten high-carbon ferrochrome, including wetting, infiltration, and adhesion layer formation.

Chamotte-based coatings showed the lowest melt infiltration and weak adhesion, indicating good chemical compatibility and thermal stability. Quartzite-based coatings exhibited moderate wetting and infiltration without significant penetration, whereas coatings based on high-carbon ferrochrome slag showed increased wetting and infiltration due to chemical affinity with the melt.

These results indicate that coating performance is governed by wettability and chemical compatibility with slag: aluminosilicate compositions provide higher resistance to melt penetration, while slag-based coatings are less effective. Thus, despite the advantages of secondary materials, their use under ferrochrome casting conditions is limited by thermochemical compatibility.

Results of Pilot-Industrial Trials of Casting Ladles

Pilot-industrial evaluation of protective refractory coatings was conducted during the production of high-carbon ferro-

chrome (**FeCr** 800–850) in Smelting Shop No. 1. Ladle durability was assessed by the number of heats until withdrawal from service, with uncoated ladles used as a reference.

The results showed a clear influence of coating composition on service life. Chamotte-based coatings demonstrated the highest performance, increasing ladle lifetime to about 15 heats compared to 10 in the baseline regime. Quartzite-based coatings provided moderate improvement (11 heats), while coatings based on high-carbon ferrochrome slag were ineffective, reducing ladle life to 8 heats. The results are summarized in Table 2.

Table 2
Results of pilot-industrial trials of protective refractory coatings during FeCr 800–850 production in Smelting Shop No. 1

№ 1 балқыту цехында FeCr 800–850 өндіру кезінде қорғаныш отқа төзімді қаптамаларды тәжірибелік-өнеркәсіптік сынақтан өткізу нәтижелері

Результаты опытно-промышленных испытаний защитных огнеупорных покрытий при производстве FeCr 800–850 в плавильном цехе № 1

Coating type	Number of heats
No coating (baseline)	10
Chamotte-based coating	15
Quartzite-based coating	11
High-carbon ferrochrome slag-based coating	8

It should be noted that the number of pilot-industrial trials was limited ($n = 3$) due to production constraints; therefore,

the obtained results should be considered as preliminary industrial validation. At the same time, the observed differences in ladle service life are pronounced and reproducible, confirming the influence of coating composition, although further studies with a larger number of trials are required for a more comprehensive statistical assessment.

Conclusions

A combined laboratory and pilot-industrial investigation of protective refractory coatings was carried out under conditions close to industrial operation of casting ladles in high-carbon ferrochrome production (**FeCr** 800–850).

The results show that coating performance is governed not only by refractoriness, but also by adhesion, thermal stability, and resistance to metal–slag interaction. Chamotte-based coatings with a combined binder system (cement – bentonite – organic additive) demonstrated the highest efficiency, increasing ladle service life to 13–18 heats compared to 10 in the baseline regime.

Quartzite-based coatings provided only moderate improvement, while coatings based on high-carbon ferrochrome slag were ineffective. The results also highlight the decisive role of the binder system: sodium silicate led to coating delamination, whereas the combined binder ensured stable adhesion.

Overall, protective coatings represent an effective and economically viable method for extending ladle service life without modifying ladle design. The observed increase in durability (by approximately 30–80%) reduces maintenance frequency and associated costs, while requiring no additional capital investment.

Acknowledgments

This research was carried out with the financial support of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992882).

REFERENCES

1. Cui K., Wang J., Wang H., Zhang Y., Fu T. (2022). Erosion behavior and longevity technologies of refractory linings in blast furnaces for ironmaking: A review. *Steel Research International*. <https://doi.org/10.1002/srin.202200266> (in English)
2. Kondrukevich A. A., Ryabyi D. V. Effect of operational factors on steel-teeming ladle lining working layer life // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2018. – No. 5. – P. 469–474 (in English)
3. Matsui T., Taka N. Refractory technology of ladle // *Nippon Steel Technical Report*. – 2020. – No. 125. – P. 51–60 (in English)
4. Demeter J., Bul'ko B., Demeter P., Hrubovčáková M. (2023). Evaluation of factors affecting the MgO – C refractory lining degradation in a basic oxygen furnace. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app132212473> (in English)
5. Díaz-Tato L., Iturralde Carrera L. A., López-Perales J. F., Aviles M., Rodríguez-Castellanos E. A., Rodríguez-Resendiz J. (2025). Advances in magnesite–dolomite refractory materials: Properties, emerging technologies, and industrial applications: A review. *Technologies*. <https://doi.org/10.3390/technologies13110523> (in English)
6. Bul'ko B., Demeter P., Havran J. The influence of slag on degradation of tundish working lining // *Acta Metallurgica Slovaca*. – 2020. – No. 3. – P. 318–325 (in English)
7. Ali M., Sayet T., Gasser A., Blond E. Transient thermo-mechanical analysis of steel ladle refractory linings using mechanical homogenization approach // *Ceramics*. – 2020. – No. 3. – P. 171–189 (in English)
8. Shapagina N. A., Dushik V. V. (2024). Coatings based on refractory materials for corrosion and wear applications. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma17235936> (in English)
9. Ishihara E., Nishimura M. Introduction to carbon-free refractory lining for ladle steel bath in EAF steel mill // *Shinagawa Technical Report*. – 2022. – No. 2. – P. 135–147 (in English)

10. Application of waste raw materials as a reinforcement for protective coatings based on pyrophyllite / M. Pavlović et al. // *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. – 2025. – No. 3. – P. 199–206 (in English)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Cui K., Wang J., Wang H., Zhang Y., Fu T. (2022). Шойын өндіруге арналған домна пештеріндегі отқа төзімді футеровкалардың эрозиялық мінез-құлқы және олардың қызмет ету мерзімін арттыру технологиялары: шолу. *Steel Research International*. <https://doi.org/10.1002/srin.202200266> (ағылшын тілінде)
2. Kondrukevich A. A., Ryabyi D. V. Болатты құю кезінде құю шөмішінің футеровкасының жұмыс қабатының қызмет ету мерзіміне пайдалану факторларының әсері // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2018. – № 5. – Б. 469–474 (ағылшын тілінде)
3. Matsui T., Taka N. Құю шөміштеріне арналған отқа төзімді технологиялар // *Nippon Steel Technical Report*. – 2020. – № 125. – Б. 51–60 (ағылшын тілінде)
4. Demeter J., Buľko B., Demeter P., Hrubovčáková M. (2023). Оттекті-конвертер пешіндегі MgO – C отқа төзімді футеровкасының деградациясына әсер ететін факторларды бағалау. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app132212473> (ағылшын тілінде)
5. Díaz-Tato L., Iturralde Carrera L. A., López-Perales J. F., Aviles M., Rodríguez-Castellanos E. A., Rodríguez-Resendiz J. (2025). Магnezит-доломитті отқа төзімді материалдар саласындағы заманауи жетістіктер: қасиеттері, жаңа технологиялар және өнеркәсіптік қолданылуы: шолу. *Technologies*. <https://doi.org/10.3390/technologies13110523> (ағылшын тілінде)
6. Buľko B., Demeter P., Havran J. Аралық шөміштің жұмыс футеровкасының деградациясына шлақтың әсері // *Acta Metallurgica Slovaca*. – 2020. – № 3. – Б. 318–325 (ағылшын тілінде)
7. Ali M., Sayet T., Gasser A., Blond E. Механикалық гомогенизация тәсілін қолдана отырып, болат құю шөміштерінің отқа төзімді футеровкасының өтпелі термомеханикалық талдауы // *Ceramics*. – 2020. – № 3. – Б. 171–189 (ағылшын тілінде)
8. Sharagina N. A., Dushik V. V. (2024). Коррозия мен тозуға қарсы қолданылатын отқа төзімді материалдар негізіндегі жабындар. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma17235936> (ағылшын тілінде)
9. Ishihara E., Nishimura M. Электрдогалы болат балқыту цехтарында болат құю шөміштеріне арналған көміртексіз отқа төзімді футеровка технологиясына кіріспе // *Shinagawa Technical Report*. – 2022. – № 2. – Б. 135–147 (ағылшын тілінде)
10. Пирофиллит негізіндегі қорғаныш жабындарын күшейткіш ретінде қалдық шикізатты қолдану / M. Pavlović [және т. б.] // *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. – 2025. – № 3. – Б. 199–206 (ағылшын тілінде)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Cui K., Wang J., Wang H., Zhang Y., Fu T. (2022). Поведение эрозии и технологии повышения долговечности огнеупорных футеровок доменных печей для производства чугуна: обзор. *Steel Research International*. <https://doi.org/10.1002/srin.202200266> (на английском языке)
2. Kondrukevich A. A., Ryabyi D. V. Влияние эксплуатационных факторов на срок службы рабочего слоя футеровки разливочного ковша при разливке стали // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2018. – № 5. – С. 469–474 (на английском языке)
3. Matsui T., Taka N. Огнеупорные технологии для ковшей // *Nippon Steel Technical Report*. – 2020. – № 125. – С. 51–60 (на английском языке)
4. Demeter J., Buľko B., Demeter P., Hrubovčáková M. (2023). Оценка факторов, влияющих на деградацию огнеупорной футеровки MgO – C в кислородно-конвертерной печи. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app132212473> (на английском языке)
5. Díaz-Tato L., Iturralde Carrera L. A., López-Perales J. F., Aviles M., Rodríguez-Castellanos E. A., Rodríguez-Resendiz J. (2025). Современные достижения в области магнезитодоломитовых огнеупорных материалов: свойства, новые технологии и промышленные применения: обзор. *Technologies*. <https://doi.org/10.3390/technologies13110523> (на английском языке)
6. Buľko B., Demeter P., Havran J. Влияние шлака на деградацию рабочей футеровки промежуточного ковша // *Acta Metallurgica Slovaca*. – 2020. – № 3. – С. 318–325 (на английском языке)
7. Ali M., Sayet T., Gasser A., Blond E. Переходный термомеханический анализ огнеупорной футеровки сталеразливочных ковшей с использованием метода механической гомогенизации // *Ceramics*. – 2020. – № 3. – С. 171–189 (на английском языке)
8. Sharagina N. A., Dushik V. V. (2024). Покрытия на основе огнеупорных материалов для защиты от коррозии и износа. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma17235936> (на английском языке)
9. Ishihara E., Nishimura M. Введение в технологию безуглеродной огнеупорной футеровки сталеразливочных ковшей в электросталеплавильных цехах // *Shinagawa Technical Report*. – 2022. – № 3. – С. 135–147 (на английском языке)

10. Использование отходов сырья в качестве армирующего компонента для защитных покрытий на основе пирофиллита / М. Pavlović [и др.] // Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. – 2025. – № 3. – С. 199–206 (на английском языке)

Information about the authors:

Zhumagaliyev E. U., Candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Metallurgy and Mining, NJSC K. Zhubanov Aktobe Regional University (Aktobe, Kazakhstan), yezhumagaliyev@zhubanov.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-2227-0661>

Ulmaganbetov N. A., Chief Engineer of the Metallurgy Laboratory, LLP Research and Development (Aktobe, Kazakhstan), nursultan.ulmaganbetov@erg.kz; <https://orcid.org/0000-0003-4747-9381>

Uakhitova B. T., Ph.D, Head of the Department of Metallurgy and Mining, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov NCJSC (Aktobe, Kazakhstan), Uakhitova_bt@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1156-8809>

Ospanov D. T., Master's Student in the Educational Program «Metallurgy», NJSC K. Zhubanov Aktobe Regional University (Aktobe, Kazakhstan), ospanovdostan84@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-9416-5753>

Авторлар туралы мәліметтер:

Жумағалиев Е. У., т. ғ. к., «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының доценті, «Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе Өңірлік университеті» КеАҚ (Ақтөбе қ., Қазақстан)

Улмағанбетов Н. А., «Металлургия» зертханасының бас инженері, «Research and Development» ЖШС (Ақтөбе қ., Қазақстан)

Уахитова Б. Т., Ph.D, «Металлургия және тау-кен ісі» кафедрасының меңгерушісі, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті КеАҚ (Ақтөбе қ., Қазақстан)

Оспанов Д. Т., «Металлургия» ББ бойынша магистранты, «Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті» КеАҚ (Ақтөбе қ., Қазақстан)

Информация об авторах:

Жумағалиев Е. У., к. т. н., доцент кафедры «Металлургия и горное дело», НАО «Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова» (г. Актюбе, Казахстан)

Улмағанбетов Н. А., гл. инженер лаборатории «Металлургия», ТОО «Research and Development» (г. Актюбе, Казахстан)

Уахитова Б. Т., Ph.D, заведующая кафедрой «Металлургия и горное дело», НАО «Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова» (г. Актюбе, Казахстан)

Оспанов Д. Т., магистрант образовательной программы «Металлургия», НАО «Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова» (г. Актюбе, Казахстан)

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА

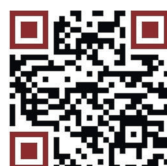


ПОДПИСКА' 2026

РЕКЛАМНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

СОТРУДНИЧЕСТВО

Узнайте больше
на сайте:



Instagram:



Консультация
в WhatsApp:



Код МРНТИ 52.47.15

С. М. Ерменов, В. П. Бондаренко, В. Г. Голубев, *А. С. Садырбаева
М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан)

ҰҢҒЫМАЛАРДЫ БҰРҒЫЛАУҒА АРНАЛҒАН МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ ӨНДІРІСТЕРДІҢ ҚАЛДЫҚТАРЫ НЕГІЗІНДЕ АУЫРЛАТЫЛҒАН БҰРҒЫЛАУ ЕРІТІНДІЛЕРІ

Аннотация. Мақалада мақта майының сабындалған гудронынан алынған модификацияланған ұнтақ тәрізді реагент (ҰР) негізіндегі бұрғылау ерітіндісі зерттеледі. Модификацияланған ҰР қолдана отырып, су негізіндегі ерітіндісінің қасиеттерін зерттеудің эксперименттік нәтижелері сипатталған. Суда еритін ҰР қолдану оны экологиялық таза аналогтар ретінде қолданудың кең перспективасын ашады. Бұрғылау ерітіндісінің құрылымдық-реологиялық, сұзу қасиеттерін жақсарту үшін металлургиялық өндіріс қалдықтарын қолдану мүмкіндігі анықталды. Осыған байланысты бұл зерттеудің өзектілігі айқын, өйткені оны жүзеге асыру нәтижесінде ерітіндінің тұтқырлығы мен тиксотропты құрылымын реттегіштер, сұзуді (су берілісі) төмендеткіштер үшін өсімдік майларының қалдықта-рынан экологиялық қауіпсіз реагенттер алынады.

Түйінді сөздер: бұрғылау, бұрғылау ерітіндісі, ұнтақ тәрізді реагент, реологиялық қасиеттер, металлургиялық өндіріс қалдығы, су берілісі.

Weighted drilling fluids based on metallurgical waste for drilling wells

Abstract. The paper examines a drilling fluid based on a modified powdered reagent (PR) obtained from saponified cottonseed oil tar. Experimental results of studying the properties of a water-based drilling fluid using the modified PR are described. The use of water-soluble PR opens up broad prospects for its application as an environmentally friendly alternative. The possibility of using metallurgical slag additives to improve the structural, rheological, and filtration properties of the drilling fluid has been established. Therefore, the relevance of this study is obvious, as its implementation will lead to the production of environmentally safe reagents from waste vegetable oils for viscosity regulators, thixotropic structure regulators, and filtration (fluid loss) reducers.

Key words: drilling, drilling mud, powdered reagent, rheological properties, metallurgical slag, water recovery.

Утяжеленные буровые растворы на основе отходов металлургических производств для бурения скважин

Аннотация. В работе исследуется буровой раствор на основе модифицированного порошкообразного реагента (ПР), полученного из омыленного гудрона хлопкового масла. Описаны экспериментальные результаты исследования свойств бурового раствора на водной основе с использованием модифицированного ПР. Использование водорастворимого ПР открывает широкую перспективу его применения в качестве экологически чистых аналогов. Установлена возможность применения добавки металлургического шлака для улучшения структурно-реологических, фильтрационных свойств бурового раствора. В связи с этим актуальность данного исследования очевидна потому, что в результате его реализации будут получены экологически безопасные реагенты из отходов растительных масел для регуляторов вязкости и тиксотропной структуры раствора, понизителей фильтрации (водоотдачи).

Ключевые слова: бурение, буровой раствор, порошкообразный реагент, реологические свойства, металлургический шлак, водоотдача.

Кіріспе

Бүгінгі таңда мұнай және газ ұңғымаларын бұрғылау кезінде жаңа химиялық реагенттердің, атап айтқанда су негізіндегі бұрғылау ерітінділері үшін бірнеше функционалды қасиеттері бар реагенттердің отандық шикізатын пайдалану негізінде синтездеудің болашағы үлкен және сұранысқа ие бағыт болып табылады.

Ұңғымаларды салу кезінде бұрғылау ерітінділері маңызды рөл атқарады. Бұрғылау ерітінділерінің қасиеттерін жақсарту үшін оларға ұңғыма окпанының тау-кен-геологиялық жағдайларына, сондай-ақ олардың атмосфераға, топыраққа және жер асты суларына ең аз теріс әсеріне негізделген ұңғымаларды бұрғылау процестерінің технологиялылығын қанағаттандыратын әртүрлі химиялық реагенттер қосылады.

Бұрғылау ерітінділері экологиялық таза және ластаушы заттардың ең аз мөлшерін камтуы керек. Бұл мәселеге үлкен назар аударылады, экологиялық таза, биоыдырайтын бұрғылау ерітінділерінің қоспаларын жасауға бағытталған балама шешімдер зерттелуде. Осылайша, елімізде жүргізіліп жатқан экологиялық саясатқа толық сәйкестік орнатылады. Бұл саясаттың негізгі принциптері келесідей [1–3]:

- технологиялық қызметтің қолданыстағы табиғи экожүйелерге әсерін барынша азайту;
- табиғатты үнемдейтін технологияларды қолдану;
- жұмыстарды орындау кезінде қоршаған ортаға сыртқы және ішкі әсерлерді азайту;
- жұмыстар аяқталған кезде табиғи ортаның құрамдас бөліктерін жаңарту.

Соңғы онжылдықта реагенттерді ұтымды тандау, әдетте, өсімдік негізіндегі бұрғылау ерітінділері үшін уыт-

тылықтың 4 класы барған сайын бәсекеге қабілетті бола бастады, өйткені оларды қолдану арқылы ұңғымаларды бұрғылау және бекіту экономикалық және экологиялық тұрғыдан тиімдірек [4, 5].

Кәсіпшіліктен алынған материалды талдау [6] тау жыныстарының тұрақсыздығының негізгі себебі олардың жуу сұйықтығының сүзгісімен физикалық-химиялық әрекеттесуі екенін көрсетті. Бұрғылау ерітіндісінің сүзгісі жарықтар мен кеуектер арқылы қабатқа терең еніп, тау жыныстарының ісінуіне әкеледі, нәтижесінде үлкен жару күштері пайда болады.

Ұңғымалар қабырғаларының тұрақсыздығымен күресудің ең қолайлы әдісі-су негізіндегі сазды ерітінділерді қолдану технологиясын жетілдіру. Бұрғылау ерітіндісіне функционалды мақсаттағы кешенді реагенттерді қосу тығыздық, шартты тұтқырлық, су беру және статикалық ығысу кернеуінің көрсеткіштерін жақсартады. Бұрғылау ерітіндісінің жоғары су бергіштігі олардың сазды минералдары бар коллекторларда ісінуіне әкеледі және нәтижесінде ұңғыма қабырғаларының тұрақсыздығына және қиындықтарға әкеледі [5, 6].

Бүгінде елімізде СНЕ дайындау үшін кешенді әсер ететін ұнтақты реагенттерді қоспағанда, ерітінді қасиеттерін тұрақтандыруға арналған бірқатар химиялық реагенттер бар. Авторлардың зерттеулері [7] осы салада өсімдік негізіндегі химиялық реагенттерді қолдану бәсекеге қабілетті бола бастағанын көрсетеді, өйткені оларды қолдану арқылы ұңғымаларды бұрғылау экономикалық және экологиялық тұрғыдан тиімдірек.

Түркістан облысында мақта-тоқыма кластері құрылған арнайы экономикалық аймақ жұмыс істейді. 2024 жылдың

деректері бойынша мақта егіс алқабы 111,4 мың га құрайды, мақта майын өндіру көлемі 19,5 мың тоннаға дейін ұлғайтылатын болады¹. Мақта майын өндіру көлемінің өсуіне байланысты мақта гудроны – қалдықтарының (май қышқылдарын дистилляциялау гудроны) жыл сайынғы көлемі ұлғаятын болады.

Ғылыми еңбектерде [4, 8] өсімдік немесе жануарлар майларының, не болмаса олардың қоспаларының соап-токтарынан май қышқылдарын дистилляциялау нәтижесінде пайда болатын жанама өнімдер болып табылатын май кәсіпорындарының гудрондары немесе текше қалдықтары зерттелді.

Госсиполды шайыр негізіндегі бұрғылау ерітінділеріне арналған көпфункционалды ұнтақты реагент алу үшін әзірленген технология [9] мөлшерлеу мен араластырудың, тасымалдаудың технологиялық процестерін оңтайландыруға, бұрғылау ерітінділерін дайындаудың механикаландыру дәрежесін және жеделдігін арттыруға мүмкіндік берді.

Осыған байланысты бұл зерттеудің өзектілігі айқын, өйткені оны жүзеге асыру нәтижесінде ерітіндінің тұтқырлығы мен тиксотропты құрылымын реттегіштер, сүзуді (су бергіштік) төмендеткіштер үшін өсімдік майларының қалдықтарынан экологиялық қауіпсіз химиялық реагенттер алынады. Жергілікті ресурстар негізінде көпфункционалды ұнтақ тәрізді реагенттерді өндіру осы өнімді алу кезінде мемлекеттің шығындарын едәуір арзандатады.

Зерттеу әдістері

Зерттеу үшін материалдар ретінде келесі қоспалар қолданылды:

- Дарбаза кен орнының сазынан алынған бентонит – құрылым тұзуші, реологияны реттеуші және бұрғылау ерітіндісінің су бергіштігін төмендетуші, қабық тұзуші компонент;

- натрикарбоксиметилцеллюлоза (**Na-KMЦ**) – тұтқырлық сипаттамаларын арттыра отырып, бұрғылау ерітіндісінің сүзілуін азайту үшін қолданылады;

- кальцийленген сода – кальций катиондарын тұндыру арқылы судың қаттылығын төмендетуге арналған.

- полиакрилонитрилге негізделген модификацияланған сополимер (ПАН) (натрий гидроксиді қоспасының қатысуымен гидролиз әдісімен алынған) және винилсульфон қышқылы – бұрғылау ерітіндісінің тау жынысы арқылы өту жылдамдығын төмендетуге, ерітіндінің сіңу көлемін азайтуға және саз қабығының жабысқақтығын төмендетуге ықпал етеді [10];

- металлургиялық қож (МШ) – тиімді, суда еритін және экологиялық қауіпсіз компонент, бұрғылау ерітіндісін ауырлатуға, термотұрақтылыққа және сүзу сипаттамаларын төмендетуге арналған.

Модификацияланған ұнтақ тәрізді ерітіндіні ықтимал қолдануды анықтау үшін СНЕ-нің реологиялық параметрлері, сондай-ақ оның сүзу көрсеткіштері зерттелді.

Зертханалық жағдайда ҚР СТ ISO 10416-2012 «Мұнай және газ өнеркәсібі. Бұрғылау ерітінділері. Зертханалық сынақтар» бойынша (20 ± 2) °С температурада аттеста-

циядан өткен өлшеу әдістемелерін қолданумен бұрғылау ерітінділерінің технологиялық параметрлері өлшенді.

Бұрғылау ерітіндісінің тығыздығы тығыздық өлшегіштің көмегімен анықталды. Шартты тұтқырлықты анықтау үшін ВБР-2 вискозиметрі қолданылды. Сүзуді анықтау үшін сүзгі элементіндегі қысымның 0,7 МПа айырмашылығын қамтамасыз ететін сүзу аймағының ауданы ($45,8 \pm 0,6$) см² болатын сүзгі прессі пайдаланылды. Реологиялық қасиеттері коаксиалды өлшеу цилиндрлерімен жабдықталған 8 жылдамдықты айналмалы вискозиметрдің көмегімен анықталды. Ерітіндінің тұрақтылығы ЦС-2 тұрақтылық цилиндрінің көмегімен бағаланды [9].

Саз ұнтағы алдын ала модификацияланып, содан кейін шарлы диірменде ұнтақталды. Модификатор ретінде модификацияланған саз ұнтақтарын өндіруде дәстүрлі түрде пайдаланылатын кальцийнирлі сода қолданылды. Шарлы диірменде ұнтақтау кезінде кальцинирлі содамен өңдеу ерітіндінің орташа өлшенген шығымдылығын арттырады ($9,4 \text{ м}^3/\text{т}$), бұл өзгертілмеген саз ұнтақтарымен салыстырғанда 130% жоғары.

Зертханалық жағдайда сазды суспензия араластырғыштың айналу жылдамдығын (8000 ± 1600) айн/мин 20 минут ішінде қамтамасыз ететін зертханалық араластырғыш қондырғының көмегімен ағын суда модификацияланған саз ұнтағын (МСҰ) еріту арқылы дайындалды. Алынған сазды суспензия саз бөлшектерін толық ылғалдандыру және ісіну үшін бөлме температурасында 24 сағатқа қалдырылды. 24 сағаттан кейін сазды суспензия 60 минут ішінде араластырғыш қондырғыда араластырғыштың (8000 ± 1600) айн/мин айналу жылдамдығымен араластырылды. Осыдан кейін суспензияға полиакрилонитрилге негізделген модификацияланған сополимердің 0,1% енгізілді.

Саз ұнтағы негізінде дайындалған сазды суспензия келесі көрсеткіштерге ие болды: тығыздығы 1050 кг/м³; шартты тұтқырлық – 35 с; рН – 9,6; ЫСК (статикалық ығысу кернеуі) 1/10 – 20/50 мг/см², сүзу қабығы – 4,5 мм. Саз негізіндегі суспензияның су бергіштік мәні жоғары екендігі анықталды, оны тұрақтандырғыштармен өңдеу арқылы азайтуға болатыны анықталды [11].

Бүгінгі таңда бұрғылау кезінде барит пен гематит бұрғылау ерітінділерін ауырлату үшін қолданылады, бірақ гематит өте абразивті және бұрғылау бағанында ұңғымадағы құбыр кеңістігін тарылтатын өсімділер түзе отырып магниттелуі мүмкін, сондықтан оны баритпен алмастырады. Баритті ең жақсы ауырлатқыш деп те атауға болмайды, өйткені оны пайдалану кезінде бұрғылау ерітіндісі мен сүзгідегі қатты фазаның мөлшері максималды болады және қышқылмен өңдеу кезінде азаймайды [10]. Қазіргі уақытта көптеген шетелдік фирмалар целестин концентратын ауырлатқыш ретінде қолдануға көшті, ол абразивтілігі төмен, тығыздығы жоғары және басқа көрсеткіштердің арқасында белгілі ауырлатқыштардан асып түседі. Baker Hughes компаниясымен балама ауырлатқыш материал ұсынылады – марганец тетраоксиді, қызыл-коңыр түсті ұсақ түйіршікті ұнтақ түрінде жеткізіледі [9], минералдың тығыздығы 4,8 г/см³.

¹Түркістан облысының әкімдігі. Түркістан облысында мақта-тоқыма кластерін құру: ресми сайт. 2023. – URL: <https://www.s-cica.org/docs/345090575655592a3771eb.pdf> (қаралған күні: 24.12.2025 г.).

Осыған байланысты бұл зерттеудің өзектілігі айқын, өйткені оны жүзеге асыру нәтижесінде ерітіндінің тұтқырлығы мен тиксотропты құрылымын, сұзу (су бергіштік) төмендеткіштерін реттеу мақсатында өсімдік майларының қалдықтарынан СНЕ үшін экологиялық қауіпсіз химиялық реагенттер алынады. Металлургиялық қож қоспалары бұрғылау ерітінділерін ауырлату үшін белгілі аналогтарды алмастыруға мүмкіндік береді. Алдын ала экономикалық бағалау көрсеткендей, 1 тонна барит концентратының бағасы 111 мың теңгені құрайды, ал металлургиялық қождың құны 6,8 мың теңгені құрайды. Бұл соңғысын экономикалық тұрғыдан тиімді етеді. Жергілікті ресурстар негізінде көпфункционалды ұнтақ тәрізді реагенттерді өндіру осы өнімді алу кезінде мемлекеттің шығындарын едәуір арзандатады.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Осы зерттеу аясында бұрғылау ерітінділерінің қасиеттерін тұрақтандыру және жақсарту үшін әртүрлі қоспалардың әсерін анықтау мақсатында эксперименттер жүргізілді.

Бұрғылау ерітіндісіне ұнтақ тәрізді реагенттен (ҰР) басқа тұрақтандырғыш реагенттер қосылды: полиакрилонитрилге негізделген модификацияланған сополимер, жоғары молекулалы Na-карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), металлургиялық өндірістердің қожы және Дарбаза кен орнының саздарынан бентонит.

Зерттеудің бірінші кезеңінде тығыздығы, тұтқырлығы, су тиімділігі, статикалық ығысу кернеуі, бұрғылау ерітіндісінің рН мөлшері ҰР және МСП құрамынан анықталды.

Зерттеулер бұрғылау ерітіндісіне модификацияланған полиакрилонитрилді сополимер (МСП) қосу арқылы жүргізілді [9]. 1 кестеде полиакрилонитрилге негізделген модификацияланған сополимер концентрациясының бұрғылау ерітіндісінің қасиеттеріне әсері бойынша зерттеу нәтижелері ұсынылған.

Эксперименттік зерттеулердің нәтижелерін талдау МСП концентрациясының оңтайлы аралығы 0,75–1,0% құрайтынын көрсетті.

Зерттеудің екінші кезеңінде тығыздығы, тұтқырлығы, су бергіштігі, статикалық ығысу кернеуі, бұрғылау ерітіндісіндегі ҰР және МСП кешенінің құрамындағы ерітіндінің рН мәндері анықталды.

Нәтижесінде КМЦ төмендегідей көрсеткіштерге ие болды: судың массалық үлесі – 8%; карбоксиметил топтары бойынша алмастыру дәрежесі – 0,82; абсолютті құрғақ техникалық өнімдегі негізгі заттың массалық үлесі – 58,5%; абсолютті құрғақ техникалық өнімге есептегенде суда ерігіштік – 96,5%; Сулы ерітіндінің сутегі көрсеткіші – рН = 11; полимерлену дәрежесі – 600.

Сулы ерітіндінің тығыздығы, тұтқырлығы, ЫСК және су бергіштіктің КМЦ + ҰР концентрациясына тәуелділігін зерттеу нәтижелері бұрғылау ерітіндісіндегі ұнтақ тәрізді реагенттің артуымен тығыздық, тұтқырлық және статикалық ығысу кернеуінің төмендейтінін көрсетеді. Тек су шығымдылығының артуы байқалады. КМЦ артқан сайын тығыздық, тұтқырлық, ЫСК артуы және су берілісінің төмендеуі байқалады. Осы заңдылықтарды ескере отырып, 84–90 аралығындағы КМЦ + ҰР құрамы бар ерітіндіні ең қолайлы деп есептеуге болады.

Бұл рецепттердің ішіндегі ең қолайлысы құрамында 86 бастап 92% дейінгі ұнтақ тәрізді реагент және 8 бастап 14% дейінгі мөлшердегі **Na-КМЦ** болатын қоспалар болып табылады. Жинақ құрамында **Na-КМЦ** 2 бастап 6% дейін тұтқырлық және статикалық ығысу кернеуі 10% дейін болған кезде – бұрғылау ерітіндісі салыстырмалы түрде төмен көрсеткіштерге ие болады және бұрғылау шламының толық шығарылуын қамтамасыз ете алмайды. Жоғарыда көрсетілген концентрацияларда су бергіштігі өте жоғары, бұл бұрғылау ерітіндісінің өткізгіштігін едәуір арттырады және оның шығынын арттырады.

Құрамындағы **Na-КМЦ** мөлшері 6-дан 14%-ға дейін артқан кезде бұрғылау ерітінділерінің барлық технологиялық көрсеткіштері қалыпқа келтіріледі және оларды қалыптан тыс төмен қабаттық қысымды қабаттарды бұрғылау кезінде мұнай-газ ұңғымаларын бұрғылау кезінде

Кесте 1

Полиакрилонитрилге негізделген модификацияланған сополимер концентрациясының бұрғылау ерітіндісінің қасиеттеріне әсері

Table 1

Effect of the concentration of a modified polyacrylonitrile-based copolymer on the properties of drilling mud

Таблица 1

Влияние концентрации модифицированного сополимера на основе полиакрилонитрила на свойства бурового раствора

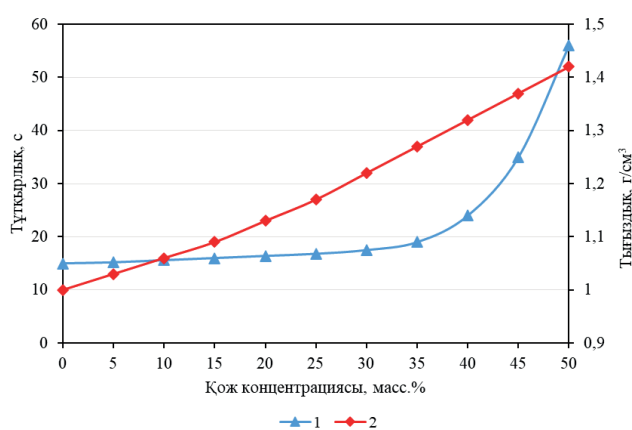
МПС концентрациясы, %	0	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0
Шартты тұтқырлық, с	35,0	37,0	38,0	41,0	43,0	47,0	55,02
Тығыздық, кг/м ³	1050	1053	1055	1055	1060	1060	1065
Су берілісі, см ³ /30 мин	20	15,0	13,5	12,25	11,0	7,5	6,8
Статикалық ығысу кернеуі	1 мин	20	65	66	68	70	76
	10 мин	50	68	70	72	74	79
Фильтрациялық қабық қалыңдығы, мм	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,0
рН	9,6	9,7	9,7	9,8	9,9	10,0	10,0

қолдануға болады. **Na-KМЦ** мөлшерінің одан әрі 14%-дан артық өсуімен, тығыздығы мен БСК жоғарылағанына және су бергіштіктің төмендегеніне қарамастан, тұтқырлық мәндерінің жоғарылауы бұрғылау жылдамдығы мен еңбек өнімділігінің төмендеуіне әкеледі, әсіресе қалыптан тыс төмен қысымды ұңғымаларды бұрғылау кезінде. Демек, бұрғылау жағдайларына байланысты практикалық қолдану үшін жаңадан жасалған ерітінді рецептурасынан қажетті композицияны таңдауға болады деп қорытынды жасауға болады.

Осылайша, төмен қысымды мұнай-газ ұңғымаларын бұрғылау кезінде қолданылатын жеңілдетілген бұрғылау ерітінділерін дайындау үшін жергілікті шикізат пен өндіріс қалдықтарынан алынған КМЦ + ҰР бұрғылау ерітінділерінің құрамы эксперименталды түрде расталды. Бұл әртүрлі геологиялық – техникалық жағдайларда ұңғымаларды бұрғылау үшін бұрғылау ерітіндісінің бөлігі ретінде ұнтақ тәрізді реагентті пайдаланудың тиімділігі туралы біздің болжамдарымызды растайды.

Зерттеудің келесі кезеңі олардың тығыздығы мен ыстыққа төзімділігін арттыру үшін бұрғылау ерітінділерінде ұсақ дисперсті металлургиялық шлактарды қолдану мүмкіндігіне бағытталған.

Тәжірибелерде полиметалл кендерін байыту қалдықтары – «Ачполиметалл» АҚ доломит – барий «қалдықтары» пайдаланылды. Зертханалық жағдайда металлургиялық қождың (МК) химиялық құрамы, шынайы тығыздығы, ауырлату қабілеті, абразивтілігі және суда ерігіштігі көрсеткіштері анықталды. Қалдықтардың химиялық құрамы тұрақтылықпен сипатталады және масс. % ұсынылған: SiO_2 – 4,34–6,0; Al_2O_3 – 0,98–1,2; Fe_2O_3 – 2,86–3,5; CaO – 27,79–29,0; MgO – 14,45–16,3; $BaSO_4$ – 12,7–13,5; FeS_2 – 1,39–1,5; $PbSO_4$ – 0,03–0,05; $PbCO_3$ – 0,09–1,2; PBS – 0,14–0,2; ппп – 35,25–37,0 [11]. Шынайы тығыздық – 2800 кг/м³; ауырлық күші – 34%; абразивтілік – 0,9; суда ерігіштік – 0,2%.



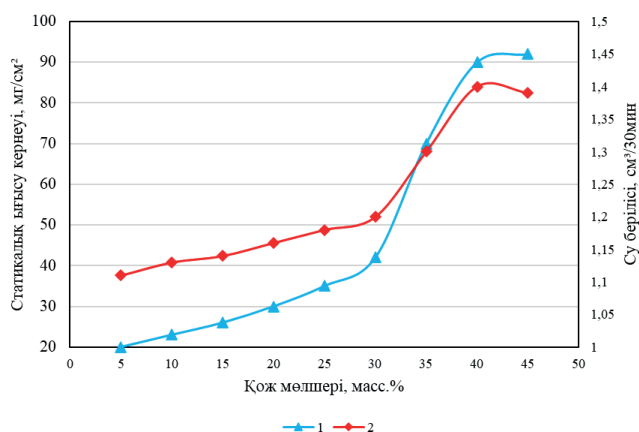
Сурет 1. Тығыздық пен тұтқырлықтың судағы қож концентрациясына тәуелділігі. 1 – тұтқырлық; 2 – тығыздық.

Figure 1. Dependence of density and viscosity on slag concentration in water. 1 – viscosity; 2 – density.

Рис. 1. Зависимость плотности и вязкости от концентрации шлака в воде. 1 – вязкость; 2 – плотность.

Эксперименттік деректерді талдау көрсеткендей, қож суда еріген кезде оның тығыздығы 1007 бастап 1800 кг/м³ дейін артады. Тұтқырлық параметрі 35% концентрацияда аздап артады, содан кейін тұтқырлықтың жоғарылауы байқалады және 50% концентрацияда 60 с параметріне жетеді (сурет 1).

Металлургиялық қождың КМЦ + ҰР бұрғылау ерітінділерінің негізгі технологиялық параметрлеріне әсерін зерттеу (сурет 2, 3).



Сурет 2. Бұрғылау ерітіндісінің КМЦ/ҰР (2/98) қоспасымен металлургиялық қож концентрациясынан тығыздығы мен тұтқырлығының тәуелділігі. 1 – тұтқырлық; 2 – тығыздық.

Figure 2. Dependence of the density and viscosity of drilling mud on the concentration of metallurgical slag with a mixture of CMC/PR (2/98). 1 – viscosity; 2 – density.

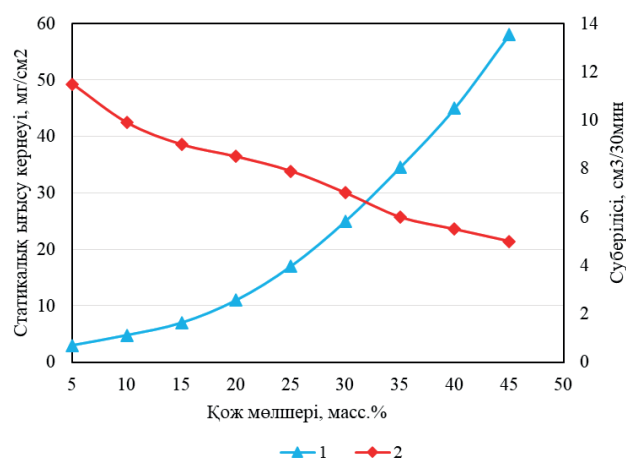
Рис. 2. Зависимость плотности и вязкости бурового раствора от концентрации металлургического шлака со смесью КМЦ/ПР (2/98). 1 – вязкость; 2 – плотность.

Ұнтақ тәрізді реагент ҰР және эксперименттік жолмен алынған тұрақтандырғыш қоспаларға негізделген бұрғылау ерітінділерінің негізгі технологиялық қасиеттерін қарастыра отырып модификацияланған мақта гудроны мен тұрақтандырғыш қоспалар негізіндегі ұнтақ тәрізді реагентті бұрғылау ерітіндісіне енгізу су негізіндегі бұрғылау ерітіндісінің қасиеттеріне оң сапалы өзгерістер әкелетінін көруге болады. Бұл ретте сүзу көрсеткішінің төмендеуіне және құрылымдық-реологиялық қасиеттердің тұрақтануына қол жеткізіледі, бұл мұнай және газ ұңғымаларын бұрғылаудың тау-кен-геологиялық жағдайларын ескере отырып, әрбір нақты жағдай үшін реагент пен қоспаларды таңдауды жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Ұңғымаларды бұрғылау кезінде түрлі қиындықтардың алдын алу және болдырмау мәселелерін жоюға мүмкіндік беретін ұнтақ тәрізді модификацияланған мақта гудроны мен тұрақтандырғыш қоспалар негізінде экологиялық қауіпсіз бұрғылау ерітіндісі алынды.

Ұнтақ тәрізді модификацияланған мақта гудроны мен су негізіндегі бұрғылау ерітіндісіне оң сапалы өзгерістер



Сурет 3. Бұрғылау ерітіндісінің КМЦ/ҰР қоспасымен металлургиялық кож концентрациясынан су бергіштік пен БСК тәуелділігі. 1 – БСК; 2 – су бергіштік.

Figure 3. Dependence of water absorption and SS on the concentration of metallurgical slag with a mixture of CMC/PR of drilling mud. 1 – SSS; 2 – water absorption.

Рис. 3. Зависимость водопоглощения и СНС от концентрации металлургического шлака со смесью КМЦ/ПР бурового раствора. 1 – СНС; 2 – водопоглощение.

әкелетін тұрақтандырғыш қоспалар негізінде бұрғылау ерітіндісінің технологиялық параметрлері зерттелді. Бұрғылау ерітіндісіндегі ұнтақ тәрізді реагенттің пайыздық мөлшерін арттыру тығыздықты, тұтқырлықты және статикалық ығысу кернеуін төмендетеді, су берілісінің ғана артуы байқалады.

Сазды суспензияға 0,1% модификацияланған сополимер енгізген кезде құрылымдық-реологиялық қасиеттер

айтарлықтай өзгермейді, бірақ сұзу көрсеткішінің қажетті төмендеуіне қол жеткізіледі.

Бұрғылау ерітіндісіндегі КМЦ қоспасының концентрациясының жоғарылауымен тығыздық, тұтқырлық, статикалық ығысу кернеуі және су бергіштік төмендейді. КМЦ мөлшерінің 5 бастап 15% дейінгі аралықта өзгеруі бұрғылау ерітінділерінің технологиялық көрсеткіштерін қалыпқа келтіруге және оларды қалыптан тыс төмен қысымды қабаттарды бұрғылау кезінде мұнай-газ ұңғымаларын бұрғылау процесінде қолдануды ұсынуға мүмкіндік береді. Бұрғылау жағдайларына байланысты сіз қажетті композицияны таңдап, практикалық қолдану үшін нақты рецепт ұсына аласыз.

Бұрғылау ерітіндісінің құрылымдық-реологиялық, сұзу қасиеттерін жақсарту үшін 25–40% мөлшерінде металлургиялық кож қоспасын қолдану мүмкіндігі анықталды. Қолданылатын қоспаның салыстырмалы түрде тиімді құны және экологиялық қауіпсіздігі бар.

25–40% мөлшерінде металлургиялық кож негізінде тұрақтандырғыш қоспаны қолдану жөніндегі эксперименттік зерттеулердің нәтижелері бұрғылау ерітінділерінің параметрлерін реттеу және тау-кен-геологиялық жағдайларды ескере отырып, мұнай және газ ұңғымаларын бұрғылауға қойылатын талаптарға сәйкес келу мүмкіндігін көрсетеді.

Бұрғылау ерітіндісінің қасиеттерін бағдарламалық мәндерге толық сәйкестендіру үшін термиялық тұрақтылықты және әзірленген композицияларды қолданудың экономикалық тиімділігін анықтау үшін қосымша бақылау сынақтарын жүргізу қажет.

Алғыс

Зерттеу АР 26195345 «Бұрғылау ерітінділері үшін өсімдік майларының гудрондары негізіндегі уыттылығы төмен кешенді мақсаттағы реагенттерді алу» қаржыландыру жобасы шеңберінде орындалды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Субградтық инженерия үшін күл / кож негізіндегі геополимермен тұрақтандырылған материалды дайындау үшін бұрғылау ерітіндісінің қалдықтарын тиімді пайдалану / Peng Zhang [және т. б.] // *Journal of Environmental Management*. – 2025. – Т. 373. – Б. – 13 (ағылшын тілінде)
2. Nwanekezie M. N., Ogebeide S. E. Өсімдік тұқымының майынан (GmelinaArborea тұқымының майы) мұнай негізіндегі бұрғылау сұйықтықтарын (ерітінділерді) құрастыру // *Chemical and Process Engineering Research*. – 2017. – Т. 50. – Б. 35–46 (ағылшын тілінде)
3. Май қышқылдарының окси-этилденуінің оңтайлы параметрлерін майды тазарту және тазарту жүйесінде деликвификациялау үшін демульгаторларды алу мақсатында зерттеу / V. P. Bondarenko [және т. б.] // *Chimica Oggi – Chemistry Today*. – 2017. – Т. 35. – Б. 72–77 (ағылшын тілінде)
4. Режепов К. Ж., Алимбаева Ш. Б. Госсипол және оның туындылары: синтез, модификациясы және құрылымы // *Өсімдік шикізатының химиясы*. – 2023. – № 1. – Б. 135–143 (орыс тілінде)
5. Gaibnazarov S. B. Өндірісті дамыту перспективалары қайталама ресурстарға негізделген бұрғылау ерітінділеріне арналған қайталама реагенттер негізінде бұрғылау ерітінділеріне арналған реагенттер өндірісін дамыту перспективалары // *Technical science and innovation*. – 2020. – Шығ. 2. – Б. 59–66 (ағылшын тілінде)
6. Бондаренко В. П., Надиров К. С., Голубев В. Г., Садырбаева А. С., Колесников А. С. Мұнай-газ саласына арналған мақта майының модификацияланған гудрондары негізінде кешенді әсер ететін реагенттер: монография. – Шымкент: «Түркенич» ЖК, 2017. – 248 б. (орыс тілінде)
7. Надиров К. С., Бондаренко В. П., Бимбетова Г. Ж. Бұрғылау ерітінділерін дайындау үшін мақта майының модификацияланған гудроны пайдалану // *Мұнай және газ*. – 2016. – № 2. – Б. 45–56 (орыс тілінде)
8. Бұрғылау ерітінділерінің реологиялық қасиеттерін жақсарту үшін композициялық полимерлі материалдарды алу / Ж. К. Артыкова [және т. б.] // *Мұнай және газ*. – 2022. – № 6 (132). – Б. 101–114 (орыс тілінде)

9. Бондаренко В. П., Надиров К. С., Голубев В. Г. Бұрғылау ерітінділері үшін ұнтақ компоненттерін алу технологиясы // Профессор К. М. Тагировтың туғанына 90 жыл толуына арналған «Мұнай-газ саласындағы инновациялық технологиялар» V Халықаралық ғылыми-практикалық конференциясының материалдары. – 2024. – Б. 544–547 (орыс тілінде)
10. Тұрақтандырғыштардың сазды бұрғылау ерітінділерінің технологиялық сипаттамаларына әсері / С. О. Тілеубаев [және т. б.] // Universum: химия және биология: электрон. ғылыми. журнал. – 2021. – № 8 (86). – Б. 66–71 (орыс тілінде)
11. Худякова Т. М., Барбаниягре В. Д., Гаппарова К. М. Қысқа мерзімді жоғары температуралы легирлеу арқылы алынған тез қататын төмен негізді клинкер // «Сібірдің табиғи және зияткерлік ресурстары. СИБРЕСУРС-2016» XVI Халықаралық ғылыми-практикалық конференциясының материалдары. – Кемерово, 2016. – Б. 403–409 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Efficient utilization of waste drilling mud to prepare material stabilized with fly ash/slag based geopolymer for subgrade engineering / Peng Zhang et al. // Journal of Environmental Management. – 2025. – Vol. 373. – P. 13 (in English)
2. Nwanekezie M. N., Ogbeide S. E. Formulation of Oil-Based Drilling Fluids (Muds) From Plant Seed Oil (Gmelina Arborea Seed Oil) // Chemical and Process Engineering Research. – 2017. – Vol. 50. P. 35–46 (in English)
3. Bondarenko V.P., Golubev V.G., Zhantasov M.K., Sadyrbayeva A.S., Nadirova Zh.K., Ainabekov N.B. Examination of optimal parameters of oxy-ethylation of fatty acids with a view to obtaining demulsifiers for deliquescence in the system of skimming and treatment of oil Chimica Oggi – Chemistry Today. – 2017. – Vol. 35. – P. 72–77 (in English)
4. Rejepov K. Zh., Alimbayeva Sh. B. Gossipol i ego proizvodnye: sintez, modifikaciya i struktura [Gossypol and its derivatives: synthesis, modification and structure]. Himiya rastitel'nogo syr'ya [Chemistry of plant raw materials]. – 2023. – No. 1. – P. 135–143 (in Russian)
5. Gaibnazarov S. B. Prospects for the development of production of reagents for drilling solutions based on secondary resources // Technical science and innovation. – 2020. – Vol. 2020. – Issue 2. – P. 59–66 (in English)
6. Bondarenko V. P., Nadirov K. S., Golubev V. G., Sadyrbayeva A. S., Kolesnikov A. S. Reagenty kompleksnogo dejstviya na osnove modifitsirovannyh gudronov hlopkovogo masla dlya neftegazovoj otrasli [Reagents of complex action based on modified cottonseed oil tar for the oil and gas industry]: Monograph. – Shymkent: IP «Turkenich», 2017. – 248 p. (in Russian)
7. Nadirov K. S., Bondarenko V. P., Bimbetova G. Zh. Ispol'zovanie modifitsirovannogo gudrona hlopkovogo masla dlya prigotovleniya burovyyh rastvorov [The use of modified cottonseed oil tar for the preparation of drilling fluids]. Neft' i gaz [Oil and Gas]. – 2016. – No. 2. – P. 45–56 (in Russian)
8. Poluchenie kompozitsionnyh polimernykh materialov dlya uluchsheniya reologicheskikh svoystv burovyyh rastvorov [Obtaining composite polymer materials to improve the rheological properties of drilling fluids] / Zh. K. Artykova et al. Neft' i gaz [Oil and Gas]. – 2022. – No. 6 (132). – P. 101–114 (in Russian)
9. Bondarenko V. P., Nadirov K. S., Golubev V. G. Tekhnologiya polucheniya poroshkoobraznykh komponentov dlya burovyyh rastvorov [Technology of obtaining powdered components for drilling fluids]. In: V MNPК «Innovacionnye tekhnologii v neftegazovoj otrasli» posvyashchennoj 90-letiyu so dnya rozhdeniya professora Tagirova K. M. [V ISPC «Innovative technologies in the oil and gas industry», dedicated to the 90th anniversary of the birth of Professor Tagirov K. M.]. – 2024. – P. 544–547 (in Russian)
10. Vliyanie stabilizatorov na tekhnologicheskie harakteristiki glinistykh burovyyh rastvorov [The effect of stabilizers on the technological characteristics of clay drilling fluids] / S. O. Tileubaev et al. Universum: himiya i biologiya: elektron. nauchn. zhurn. [Universum: chemistry and biology: electron. scientific journal.] – 2021. – No. 8 (86). – P. 66–71 (in Russian)
11. Khudyakova T. M., Barbanyagre V. D., Gapparova K. M. Fast-hardening low-base clinker obtained by short-term high-temperature alloying [Bystrotverdeyushchij nizkoosnovnyy klinker, poluchennyj kratkovremennym vysokotemperaturnym legirovaniem]. In: Materialy XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri SIBRESURS 2016 [Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference «Natural and intellectual resources of Siberia SIBRESURS 2016». – Kemerovo, 2016. – P. 403–409 (in Russian)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эффективное использование отработанного бурового раствора для получения материала, стабилизированного геополимером на основе летучей золы/шлака, для строительства земляного полотна / Peng Zhang [и др.] // Journal of Environmental Management. – 2025. – Т. 373. – С. 13 (на английском языке)
2. Nwanekezie M. N., Ogbeide S. E. Разработка буровых растворов на нефтяной основе из масла семян растений (масло семян Гмелины древовидной) // Chemical and Process Engineering Research. – 2017. – Т. 50. – С. 35–46 (на английском языке)

3. Изучение оптимальных параметров оксигенирования жирных кислот с целью получения деэмульгаторов для разжижения в системе обезвоживания и подготовки нефти / V. P. Bondarenko [и др.] // *Chimica Oggi – Chemistry Today*. – 2017. – Т. 35. – С. 72–77 (на английском языке)
4. Режепов К. Ж., Алимбаева Ш. Б. Госсипол и его производные: синтез, модификация и структура // *Химия растительного сырья*. – 2023. – № 1. – С. 135–143 (на русском языке)
5. Gaibnazarov S. B. Перспективы развития производства перспектив развития производства реагентов для буровых растворов на основе вторичных реагентов для буровых растворов на основе вторичных ресурсов // *Technical science and innovation*. – 2020. – Вып. 2. – С. 59–66 (на английском языке)
6. Бондаренко В. П., Надиров К. С., Голубев В. Г., Садырбаева А. С., Колесников А. С. Реагенты комплексного действия на основе модифицированных гудронов хлопкового масла для нефтегазовой отрасли: монография. – Шымкент: ИП «Туркенич», 2017. – 248 с. (на русском языке)
7. Надиров К. С., Бондаренко В. П., Бимбетова Г. Ж. Использование модифицированного гудрона хлопкового масла для приготовления буровых растворов // *Нефть и газ*. – 2016. № 2. – С. 45–56 (на русском языке)
8. Получение композиционных полимерных материалов для улучшения реологических свойств буровых растворов / Ж. К. Артыкова [и др.] // *Нефть и газ*. – 2022. – № 6 (132). – С. 101–114 (на русском языке)
9. Бондаренко В. П., Надиров К. С., Голубев В. Г. Технология получения порошкообразных компонентов для буровых растворов // *Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения профессора К. М. Тагирова*. – 2024. – С. 544–547 (на русском языке)
10. Влияние стабилизаторов на технологические характеристики глинистых буровых растворов / С. О. Тилеубаев [и др.] // *Universum: химия и биология: электрон. научн. журн*. – 2021. – № 8 (86). – С. 66–71 (на русском языке)
11. Худякова Т. М., Барбанягрэ В. Д., Гаппарова К. М. Быстротвердеющий низкоосновный клинкер, полученный кратковременным высокотемпературным легированием // *Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-2016: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф.* – Кемерово, 2016. – С. 403–409 (на русском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Ерменов С. М., аға оқытушы, «Мұнайгаз ісі» кафедрасы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан), sartmax80@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-8512-1463>

Бондаренко В. П., т. ф. к., доцент, «Мұнайгаз ісі» кафедрасы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан), vbond2011@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-2753-0859>

Голубев В. Г., т. ф. д., профессор, «Мұнайгаз ісі» кафедрасы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан), golubev_50@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7370-3872>

Садырбаева А. С., т. ф. к., профессор, «Мұнайгаз ісі» кафедрасы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан), a.sadyrbaeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6819-388X>

Information about the authors:

Ermenov S. M., Senior Lecturer at the Department of Oil and Gas Engineering, M. Auezov South Kazakhstan University (Shymkent, Kazakhstan)

Bondarenko V. P., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering, M. Auezov South Kazakhstan University (Shymkent, Kazakhstan)

Golubev V. G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Oil and Gas Engineering, M. Auezov South Kazakhstan University (Shymkent, Kazakhstan)

Sadyrbaeva A. S., Ph.D, Associate Professor, Professor of the Department of Oil and Gas Engineering, M. Auezov South Kazakhstan University (Shymkent, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Ерменов С. М., ст. преподаватель кафедры «Нефтегазовое дело», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова (г. Шымкент, Казахстан)

Бондаренко В. П., к. т. н., доцент кафедры «Нефтегазовое дело», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова (г. Шымкент, Казахстан)

Голубев В. Г., д. т. н., профессор, кафедра «Нефтегазовое дело», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова (г. Шымкент, Казахстан)

Садырбаева А. С., к. т. н., ассоциированный профессор, профессор кафедры «Нефтегазовое дело», Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова (г. Шымкент, Казахстан)

Код МРНТИ 31.15.28

А. А. Мельдешов, *А. К. Абишева, М. Р. Жумабаев, Ж. А. Амир
НАО «КазНацЖенПУ» (г. Алматы, Казахстан)

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКООКТАНОВЫХ КОМПОНЕНТОВ БЕНЗИНОВ ИЗ ЛЕГКИХ АЛКАНОВ

Аннотация. Работа посвящена разработке эффективных катализаторов для глубокой переработки нефти и получения высокооктановых компонентов моторных топлив. В качестве носителя использован Кынгракский бентонит, интеркалированный полигидрохсокомплексами алюминия и модифицированный металлами VIII группы. В результате формируется слоисто-столбчатая структура с развитой системой микро- и мезопор, обеспечивающая увеличение удельной поверхности и повышение каталитической активности. Исследовано превращение алканов фракции C_4-C_6 на полученных катализаторах. Установлено влияние содержания модификатора, а также размера и дисперсности частиц активного металла на конверсию и селективность реакций. Показано, что частицы размером 20–60 нм обеспечивают высокую степень превращения, повышенный выход изоалканов и селективность жидких продуктов до 70%.

Ключевые слова: глубокая переработка нефти, катализатор, модифицированный бентонит, изомеризация, изооктан, селективность, конверсия.

Жеңіл алкандардан жоғары октанды бензин компоненттерін алу

Аннотация. Жұмыс мұнайды терең өңдеу тиімділігін арттыруға және жоғары октанды компоненттер алуға арналған катализаторлар әзірлеуге бағытталған. Зерттеуде алюминий полигидрохсоқешендерімен модификацияланған және VIII топ металдарымен белсендірілген Кынғырақ бентониті негізіндегі катализаторларда C_4-C_6 алкандарының айналу процестері қарастырылды. Нәтижесінде жоғары меншікті беті бар қабатты-бағаналы кеуекті құрылым қалыптасатыны және оның каталитикалық белсенділікті арттыратыны анықталды. Модификатор мөлшерінің және белсенді металл бөлшектерінің өлшемі мен дисперстілігінің конверсия мен селективтілікке әсері зерттелді. 20–60 нм аралығындағы бөлшектер жоғары тиімділік көрсетіп, изоалкандар шығымын арттырып, сұйық өнімдер бойынша шамамен 70% селективтілікті қамтамасыз етеді.

Түйінді сөздер: мұнайды терең өңдеу, катализатор, модификацияланған бентонит, изомерлеу, изооктан, селективтілік, конверсия.

Obtaining high-octane gasoline components from light alkanes

Abstract. The study focuses on the development of catalysts to enhance deep oil refining and obtain high-octane fuel components. The conversion of C_4-C_6 alkanes was studied over Kyngrak bentonite modified with aluminum polyhydroxy complexes and promoted with Group VIII metals. The modification leads to the formation of a pillared layered structure with developed micro- and mesopores, increasing surface area and catalytic activity. The effects of modifier concentration and active metal particle size and dispersion on conversion and selectivity were examined. It was found that metal particles of 20–60 nm provide high conversion, increased isooctane yield, and liquid product selectivity of about 70%.

Key words: deep oil refining, catalyst, modified bentonite, isooctane, selectivity, conversion.

Введение

Современное развитие транспорта, энергетики и нефтехимической промышленности сопровождается постоянным ростом потребления моторных топлив. Бензин остается одним из основных видов топлива для двигателей внутреннего сгорания, используемых в автомобильном транспорте, авиации и различных промышленных установках. Качество бензина определяется рядом физико-химических характеристик, среди которых ключевое значение имеет октановое число, характеризующее устойчивость топлива к детонации при сгорании в двигателе. Чем выше октановое число, тем выше способность топлива противостоять преждевременному воспламенению и тем стабильнее и эффективнее работает двигатель.

В процессе работы двигателя внутреннего сгорания топливно-воздушная смесь подвергается высокому давлению и температуре. При использовании топлива с низким октановым числом возникает явление детонации (engine knocking) – преждевременное самовоспламенение смеси в цилиндре двигателя. Это приводит к образованию ударных волн, которые могут вызвать серьезные повреждения поршней, цилиндров и клапанного механизма. Поэтому современные высококомпрессионные двигатели требуют применения бензинов с повышенным октановым числом.

На протяжении длительного времени для повышения октанового числа бензинов применялись специальные антидетонационные присадки. Наиболее известной из них являлся тетраэтилсвинец, который широко использовался в нефтеперерабатывающей промышленности в XX веке. Однако использование свинцовых присадок оказалось крайне вредным для окружающей среды и здоровья чело-

века. В результате постепенного отказа от этилированного бензина в большинстве стран мира были получены значительные экологические и социальные выгоды.

Отказ от свинцовых антидетонационных присадок поставил перед нефтеперерабатывающей промышленностью новую задачу – разработку экологически безопасных технологий получения высокооктановых компонентов бензинов. Одним из перспективных направлений является каталитическое преобразование легких алканов, которые образуются в больших количествах при переработке нефти и природного газа. К таким углеводородам относятся метан, этан, пропан и бутан. Несмотря на значительные объемы их добычи, многие из этих компонентов имеют относительно низкую стоимость и не всегда эффективно используются. Их превращение в высокооктановые компоненты бензинов позволяет значительно повысить эффективность использования углеводородного сырья.

Актуальность данной проблемы также обусловлена необходимостью повышения энергетической эффективности двигателей и снижения вредных выбросов. Исследования показывают, что использование бензинов с высоким октановым числом способствует более полному и стабильному сгоранию топлива, что приводит к уменьшению выбросов углеводородов, оксида углерода и углекислого газа.

В условиях современного развития нефтеперерабатывающей промышленности большое значение имеют процессы изомеризации, алкилирования и каталитического реформинга, позволяющие получать высокооктановые изопарафиновые и ароматические углеводороды. Например, в процессе алкилирования изобутан взаимодействует с легкими олефинами (пропиленом и бутиленом), образуя

изопарафины с октановым числом около 98–100, которые являются ценными компонентами бензинов.

Особое внимание в современных исследованиях уделяется также разработке новых катализаторов и методов химической переработки легких алканов. Эти процессы позволяют получать высокооктановые компоненты непосредственно из доступного сырья, повышая экономическую эффективность нефтепереработки и снижая зависимость от дорогостоящих присадок.

Таким образом, разработка и совершенствование технологий получения высокооктановых компонентов бензинов из легких алканов является актуальной научной и технологической задачей. Решение этой проблемы способствует более рациональному использованию углеводородных ресурсов, повышению эффективности двигателей внутреннего сгорания и снижению негативного воздействия транспорта на окружающую среду. В связи с этим исследования в данной области имеют большое значение для развития современной нефтехимической промышленности и энергетики.

Современные тенденции развития нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности направлены на повышение глубины переработки нефти, увеличение выхода моторных топлив высокого качества и ужесточение экологических характеристик бензинов. Одним из ключевых показателей качества бензина является октановое число, определяющее его детонационную стойкость. В условиях ограниченных ресурсов ароматических углеводородов и ужесточения экологических требований особую актуальность приобретает разработка эффективных методов получения высокооктановых компонентов из доступного и дешевого углеводородного сырья – легких алканов фракции C_4 – C_6 .

Легкие n -алканы (n -бутан, n -пентан, n -гексан), входящие в состав попутных и нефтезаводских газов, обладают сравнительно низким октановым числом, однако при изомеризации способны превращаться в разветвленные изомеры, отличающиеся высокой детонационной стойкостью. Таким образом, каталитическая изомеризация легких алканов представляет собой перспективное направление получения высокооктановых компонентов бензинов без существенного увеличения содержания ароматических соединений. Эффективность процессов изомеризации во многом определяется природой катализатора, его кислотно-основными и структурными характеристиками, дисперсностью и природой активной металлической фазы. В последние годы значительный интерес вызывают модифицированные слоистые алюмосиликаты, в частности бентониты, структура которых может быть целенаправленно изменена путем интеркалирования полигидроксокомплексами металлов с образованием слоисто-столбчатых (pillared) структур. Такая модификация обеспечивает увеличение межслоевого расстояния, формирование развитой пористой структуры и повышение термостабильности носителя, что создает благоприятные условия для формирования высокодисперсной металлической фазы.

Особое значение имеет использование металлов VIII группы в качестве активных центров гидрирования-дегидрирования, обеспечивающих протекание изомеризаци-

онных превращений по бифункциональному механизму. При этом размер частиц нанесенного металла существенно влияет на каталитическую активность и селективность процесса, что обуславливает необходимость комплексного исследования влияния дисперсности металлической фазы на превращение C_4 – C_6 алканов.

Методы исследования и результаты

В работе исследованы процессы каталитического превращения легких алканов состава C_4 – C_6 в присутствии модифицированных бентонитовых катализаторов, содержащих металлы VIII группы периодической системы. В качестве основы катализаторов использовали природный бентонит, подвергнутый предварительной подготовке, включавшей сушку, измельчение и термическую обработку.

Модификацию бентонита осуществляли методом ионного обмена с использованием полигидроксокомплексов металлов. В межслоевое пространство алюмосиликата вводили олигомерные гидроксокаатионы, обеспечивающие формирование слоисто-столбчатой структуры. После проведения ионного обмена образцы подвергали сушке и прокаливанию для фиксации модифицирующих компонентов и стабилизации пористой структуры материала.

На следующем этапе на поверхность модифицированного носителя наносили активные компоненты – металлы VIII группы, обеспечивающие каталитическую активность в реакциях превращения углеводородов. Полученные катализаторы исследовали с применением физико-химических методов анализа для определения структуры, текстурных характеристик и состояния активных центров. Каталитические испытания проводили в проточном реакторе в условиях повышенных температур. В качестве сырья использовали легкие алканы состава C_4 – C_6 . Анализ состава исходных веществ и продуктов реакции осуществляли методом газовой хроматографии. Оценку эффективности катализаторов проводили по показателям конверсии исходных углеводородов, селективности образования ароматических соединений и выходу алкилбензинов.

Установлено, что модификация бентонита полигидроксокомплексами металлов приводит к существенному изменению структуры алюмосиликата. После термической обработки формировалась слоисто-столбчатая структура с развитой системой пор и увеличенной удельной поверхностью по сравнению с исходным природным материалом. Введение металлов VIII группы способствовало повышению каталитической активности полученных материалов в реакциях превращения легких алканов. Исследования показали, что в присутствии модифицированных катализаторов происходят процессы дегидрирования, циклизации и ароматизации углеводородов с образованием ароматических соединений, преимущественно алкилбензинов.

Наиболее высокие показатели активности наблюдались для катализаторов, обладающих развитой пористой структурой и равномерным распределением активных металлических центров. Установлено, что увеличение доступно-

сти активных центров способствует росту конверсии исходных алканов и повышению селективности образования высокооктановых компонентов бензина.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения модифицированных бентонитовых катализаторов для процессов переработки легких углеводородов нефтяного и газового происхождения. Разработанные каталитические системы могут быть использованы для получения высокооктановых компонентов моторных топлив и ценных нефтехимических продуктов.

В качестве модифицирующего агента в данной работе были использованы гидроксокомплексы хлорида алюминия. Получение гидроксокомплексов проводили путем постепенного добавления раствора гидроксида алюминия к раствору хлорида алюминия при температуре 363 К при постоянном перемешивании. Процесс осуществлялся в условиях контролируемой кислотности среды при значении pH около 3 [1, 2], что обеспечивало образование устойчивых полигидроксокомплексов алюминия. Полученные гидроксокомплексы затем использовали для модификации структуры бентонитовых глин, что позволяло получать каталитические системы с улучшенными текстурными и каталитическими характеристиками.

Восстановление катализаторов и исследование процессов превращения алканов C_4 – C_6 проводили на лабораторной установке проточного типа с неподвижным слоем катализатора, предложенной исследователями Шполянским и Лихачевым [3]. Данная установка широко применяется для изучения каталитических процессов переработки углеводородов, поскольку позволяет проводить эксперименты в контролируемых условиях и получать достоверные данные о каталитической активности исследуемых материалов. Схема установки превращения легких углеводородов приведена на рис. 1.

Схема лабораторной установки каталитического превращения легких углеводородов включает три основные функциональные части. Первая часть установки предназначена для подачи исходной газовой смеси и включает баллоны со сжатыми газами, такими как азот и водород, а также систему дозированной подачи жидких компонентов и воздуха. Использование азота позволяет создавать инертную среду и предотвращать нежелательные побочные реакции, а водород применяется для восстановления катализаторов перед проведением каталитических экспериментов.

Вторая часть установки представляет собой реакционный блок, состоящий из реактора и трубчатой печи. Реактор содержит неподвижный слой катализатора, через который пропускается реакционная смесь углеводородов. Трубчатая печь обеспечивает поддержание необходимой температуры реакции и позволяет проводить процессы каталитического превращения в широком диапазоне температур. Контроль температуры осуществляется с помощью термопар и регулирующих устройств.

Третья часть установки предназначена для сбора и анализа продуктов реакции. Она включает приемник конденсата, в котором собираются жидкие продукты превращения, и газометр для измерения объема образующихся газообразных продуктов.

При изменении концентрации полгроксокомплекса с 1,0 до 18,0 ммоль/г базального отражения изменяется от 13,0 до 19,0 (Å). При этом зависимость степени раздвижений пакетов от количества введенного гидроксокомплекса имеет экстремальный характер. Так, для образцов, модифицированных введением полигидроксокомплексами алюминия в количестве ~ 10 ммоль/г наблюдается максимальное значение межслоевого расстояния равной 19,0 (Å).

На основании данных рентгенового анализа можно заключить о том, что при введении в состав Кынгракского бентонита полигидрооксокатиона алюминия происходит раздвижение пакетов бентонита, о чем свидетельствует изменения первого базального отражения (d_{001}) с (Å) (таблица 1).

Таблица 1

Адсорбция и некоторые физико-химические характеристики Кынгракского бентонита после модифицирования

Кесте 1

Модификациядан кейінгі Кынграк бентонитінің адсорбциясы және кейбір физика-химиялық сипаттамалары

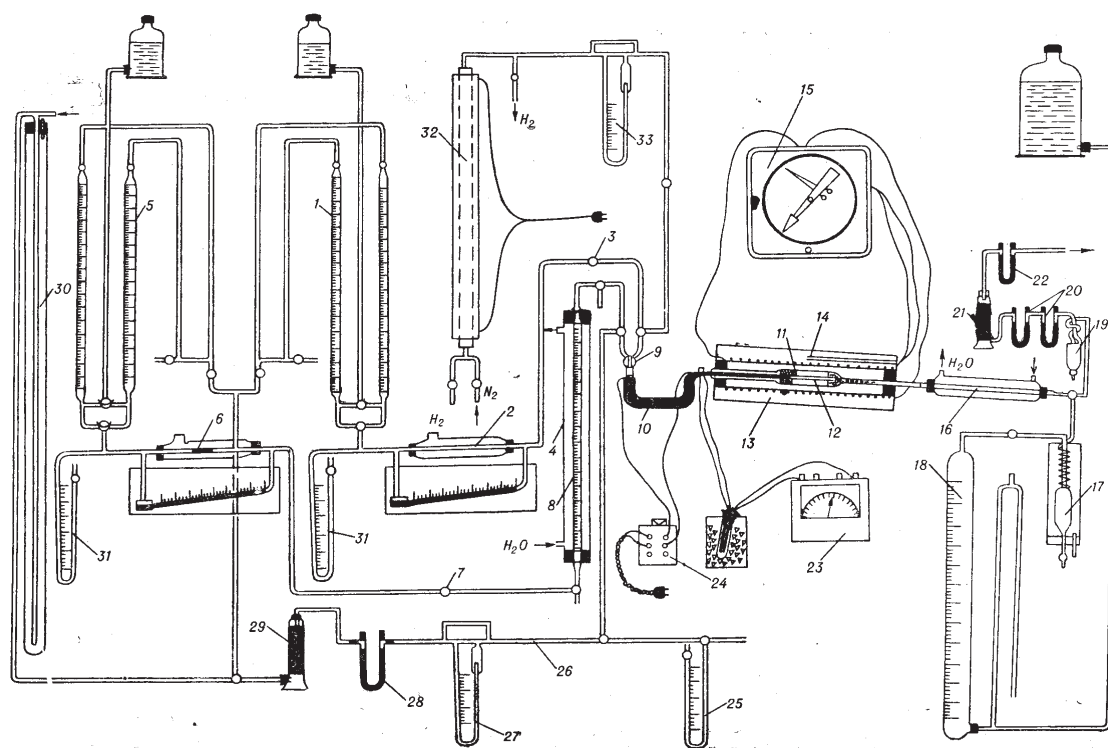
Table 1

Adsorption and some physicochemical characteristics of Kyngrak bentonite after modification

№ образца	$C_{ПГК}$ моль/г	pH системы	d_{001} , (Å)	$S_{уд}$, м ² /г
1	-	9,5	9,0	70
2	1,0	3,0	13,0	200
3	2,0	2,9	14,0	210
4	4,0	2,8	15,0	220
5	6,0	2,7	15,0	240
6	8,0	2,7	16,0	250
7	10,0	2,6	16,0	260
8	12,0	2,6	18,0	280
9	14,0	2,5	18,0	300
10	16,0	2,4	19,0	310
11	18,0	2,3	19,0	310
12	20,0	2,3	17,0	310
13	22,0	2,2	15,0	300
14	24,0	2,2	14,0	300

Из таблицы 1 следует, что с увеличением концентрации ПГК Al (III) вызывает понижение pH системы, которое означает уменьшение концентрации гидроксил ионов.

В следующей серии опытов изучали превращения C_4 – C_6 алканов на катализаторах восстановленных различной скоростью восстановления, т. е. представляло интерес влияние размера частиц активного металла на превращение n-алканов. Результаты экспериментальных данных сведены в таблицы 2–4.



1, 5 – градуированные бюретки с водой; 2, 6 – дифманометры для замера расхода жидких продуктов; 3, 7 – краны для регулировки подачи воды и углеводорода; 4 – водяной холодильник; 8 – градуированная бюретка; 9 – головка испарителя с капиллярами; 10 – испаритель; 11 – реактор кварцевый; 12 – карман для термопары, регистрирующей температуру в реакционной зоне; 13 – электрическая печь; 14 – термопара; 15 – терморегулятор ЭПД-12; 16 – водяной холодильник; 17 – приемник для углеводородов; 18 – цилиндрический газометр; 19 – приемник для воды во время регенерации; 20 – U-образные трубки с хлористым кальцием; 21 – колонка с окисью алюминия; 22 – U-образная трубка с аскаритом; 23 – гальванометр; 24 – ЛАТР для регулировки температуры в испарителе; 25 – ртутный манометр; 26 – воздушная линия; 27 – реометр для замера расхода воздуха; 28 – U-образная трубка с гранулированным едким калием; 29 – колонка с активированным углем для очистки воздуха от загрязнений; 30 – моностаб; 31 – ртутный манометр; 32 – электрическая печь для очистки азота от кислорода; 33 – реометр для замера расхода азота и других газов

1, 5 – сумен толтырылған градуирленген бюреткалар; 2, 6 – сұйық өнімдердің шығынын өлшеуге арналған дифференциалды манометрлер; 3, 7 – су мен көмірсутекті беру мөлшерін реттеуге арналған қрандар; 4 – суытқыш-конденсатор; 8 – градуирленген бюретка; 9 – капиллярлары бар буландырғыш басы; 10 – буландырғыш; 11 – кварцты реактор; 12 – реакциялық аймақтағы температураны тіркейтін термोजұпқа арналған қалташа; 13 – электр пеші; 14 – термोजұп; 15 – ЭПД-12 термореттегіші; 16 – суытқыш-конденсатор; 17 – көмірсутектерді жинауға арналған қабылдағыш; 18 – цилиндрлі газометр; 19 – регенерация кезінде суды жинауға арналған қабылдағыш; 20 – кальций хлоридімен толтырылған U-тәрізді түтіктер; 21 – алюминий оксидімен толтырылған колонка; 22 – аскаритпен толтырылған U-тәрізді түтік; 23 – гальванометр; 24 – буландырғыштағы температураны реттеуге арналған ЛАТР (зертханалық автотрансформатор); 25 – сынапты манометр; 26 – ауа желісі; 27 – ауа шығынын өлшеуге арналған реометр; 28 – түйіршіктелген күйдіргіш калиймен толтырылған U-тәрізді түтік; 29 – ауаны ластағыштардан тазартуға арналған белсендірілген көмірлі колонка; 30 – моностаб; 31 – сынапты манометр; 32 – азотты оттектен тазартуға арналған электр пеші; 33 – азот пен басқа газдардың шығынын өлшеуге арналған реометр

1, 5 – graduated burettes filled with water; 2, 6 – differential manometers for measuring the flow rate of liquid products; 3, 7 – valves for regulating the supply of water and hydrocarbons; 4 – water condenser; 8 – graduated burette; 9 – evaporator head with capillaries; 10 – evaporator; 11 – quartz reactor; 12 – thermocouple well for monitoring the temperature in the reaction zone; 13 – electric furnace; 14 – thermocouple; 15 – EPD-12 temperature controller; 16 – water condenser; 17 – hydrocarbon receiver; 18 – cylindrical gasometer; 19 – water receiver used during regeneration; 20 – U-shaped tubes filled with calcium chloride; 21 – alumina column; 22 – U-shaped tube filled with Ascarite; 23 – galvanometer; 24 – variable autotransformer (Variac) for temperature control in the evaporator; 25 – mercury manometer; 26 – air supply line; 27 – rotameter for measuring air flow rate; 28 – U-shaped tube filled with granular caustic potash; 29 – activated carbon column for purifying air from contaminants; 30 – monostat; 31 – mercury manometer; 32 – electric furnace for removing oxygen from nitrogen; 33 – rotameter for measuring the flow rates of nitrogen and other gases

Рис. 1. Схема установки превращения легких углеводородов.
Сурет 1. Жеңіл көмірсутекті конверсиялық қондырғының схемасы.
Figure 1. Scheme of the light hydrocarbon conversion plant.

Таблица 2

Влияние средних размеров частиц металла на выход жидких углеводородов изостроения

Кесте 2

Металл бөлшектерінің орташа мөлшерінің изокұрылымның сұйық көмірсутектерінің шығымына әсері

Table 2

The influence of the average size of metal particles on the yield of liquid hydrocarbons of the isostructure

Катализатор	d, (Å)	Конверсия, %	$S_{\text{жидк.}}, \%$	Состав жидкого продукта, масс. %	
				изооктан	другие
1,0% Rh/КБОК	15–20	50	60	30	70
	20–30	60	70	40	60
	40–60	66	70	40	60
	70–90	64	50	30	70
	90–120	55	40	25	75
1,0% Ru/ КБОК	15–20	45	50	20	80
	25–40	56	65	40	60
	50–80	60	60	35	65
	90–110	60	40	25	75
	120–140	50	30	20	80
1,0% Pd/ КБОК	10–20	20	30	40	60
	20–30	27	40	50	50
	40–60	30	35	40	60
	70–80	35	20	30	70
	90–110	30	10	20	80
1,0% Pt/ КБОК	10–20	20	25	35	65
	20–30	26	30	45	55
	50–60	30	30	40	60
	70–90	30	25	35	65
	90–120	25	20	20	80

Таблица 3

Влияние средних размеров частиц металла на выход жидких алканов изостроения

Кесте 3

Металл бөлшектерінің орташа өлшемдерінің изокұрылымдағы сұйық алкандардың шығымына әсері

Table 3

The influence of average metal particle sizes on the yield of liquid alkanes of isostructure

Катализатор	d, (Å)	Конверсия, %	$S_{\text{жидк.}}, \%$	Состав жидких продуктов, % масс.		
				изооктан	изопентан	другие
1,0% Rh/КБОК	10–20	65	60	40	20	40
	20–30	80	70	55	30	15
	40–60	80	60	60	30	10
	70–90	80	55	40	25	35
	90–120	75	45	35	20	45
1,0% Ru/ КБОК	15–20	60	50	40	30	30
	25–40	70	65	50	35	15
	50–80	75	70	50	30	20
	90–110	80	40	40	30	30
	120–140	70	35	35	25	40
1,0% Pd/ КБОК	10–20	26	40	15	20	65
	20–30	36	50	20	30	50
	40–60	40	50	20	30	50
	70–80	40	30	10	20	70
	90–110	35	20	10	15	75
1,0% Pt/ КБОК	20–30	32	40	30	40	30
	50–60	34	40	20	40	40
	70–90	33	30	15	30	55
	90–120	30	25	15	20	65

Таблица 4

Влияние средних размеров частиц металла на выход жидких алканов изостроения

Кесте 4

Металл бөлшектерінің орташа мөлшерінің изокұрылымның сұйық алкандарының шығымына әсері

Table 4

The influence of the average size of metal particles on the yield of liquid alkanes of the isostructure

Катализатор	d, (Å)	Конверсия, %	S _{жидк.} , %	Состав жидких продуктов, % масс.		
				изооктан	изопентан	другие
1,0% Rh/КБОК	10–20	60	50	40	10	50
	20–30	75	70	50	20	30
	40–60	80	70	50	30	20
	70–90	80	50	45	20	35
	90–120	70	45	30	15	55
1,0% Ru/ КБОК	15–20	50	45	30	15	55
	25–40	60	50	35	25	40
	50–80	70	60	40	30	30
	90–110	75	40	40	30	30
	120–140	65	35	30	20	50
1,0% Pd/ КБОК	10–20	25	30	10	20	70
	20–30	34	45	15	30	55
	40–60	36	40	15	40	45
	70–80	36	30	15	40	55
	90–110	34	15	10	15	75
1,0% Pt/ КБОК	10–20	20	30	15	25	60
	20–30	30	50	20	35	45
	50–60	34	50	20	45	35
	70–90	35	40	15	40	45
	90–120	30	35	12	18	70

Из данных таблиц 2–4 следует, что конверсия н-алкана проходит через максимум. Оптимальным средним размером частиц является 20–60 Å. На 1,0% Rh/КБОК при среднем размере частиц 20–30 Å конверсия н-бутана, н-пентана и н-гексана составляет 56,0; 70,0 и 80,0% масс. соответственно. При этом, селективность по образованию жидких продуктов приблизительно остается постоянной 70%. Выход изооктана возрастает от н-бутана к н-гексану и изменяется от 40 до 55% масс.

С укрупнением диаметра частиц конверсия н-алканов также проходит через максимум [4–6]. На 1,0% Rh/КБОК наибольшая конверсия н-бутана наблюдается при среднем размере частиц 20–90 Å и составляет 60–64% масс. При среднем размере частиц родия 90–120 Å, конверсия н-бутана составляет 55% масс., т. е. идет уменьшение превращения н-бутана. В случае н-пентана при среднем размере частиц родия 20–90 Å, конверсия углеводорода составляет 75–80% и дальнейшее укрупнение средних размеров частиц 90–120 Å приводит к уменьшению конверсии до 70% масс.

В [7–10] отмечается, что удельная каталитическая активность (УКА) определяется химическим составом ката-

лизатора и УКА постоянна для частиц металла с размером ≥ 30 Å. Для кристаллов меньше 30 Å наблюдаются отклонения как в сторону увеличения УКА, так и ее уменьшения.

Заключение

На основании результатов рентгеноструктурного анализа установлено, что введение в состав Кынгракского бентонита полигидроксокаатионов алюминия приводит к существенным изменениям его кристаллической структуры. В частности, наблюдается раздвижение межслоевых пакетов бентонита, что подтверждается изменением положения первого базального отражения (*d001*). Данный эффект свидетельствует о формировании интеркалированной, а в дальнейшем и слоисто-столбчатой структуры материала, сопровождающейся увеличением межслоевого расстояния. Подобные структурные преобразования способствуют формированию развитой пористой структуры и увеличению удельной поверхности катализатора, что является важным фактором повышения его каталитической активности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чоркендорф И., Наймантсведрайт Х. Современный катализ и химическая кинетика: научное издание. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2013. – 504 с. (на русском языке)

2. Кравцов А. В., Ивашкина Е. Н., Юрьев Е. М. Теоретические основы каталитических процессов переработки нефти и газа: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 144 с. (на русском языке)
3. Gonsior N. Ионные жидкости. Современный метод синтеза, полимеризации, характеристики и применения. – Дюссельдорф, 2010. – 152 с. (на английском языке)
4. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Исследование каталитической активности иммобилизованных ионных жидкостей в реакции изомеризации *n*-гексана // Технологии нефти и газа. – 2015. – № 1. – С. 33–37 (на русском языке)
5. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Исследование превращений углеводородов C5-C6 в реакции изомеризации в присутствии катализаторов на основе иммобилизованной ионной жидкости // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – Ч. 5. – С. 935–939 (на русском языке)
6. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Изомеризация легкой бензиновой фракции на иммобилизованной ионной жидкости // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2015. – № 4. – С. 25–28 (на русском языке)
7. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Каталитические свойства нанесенных ионных жидкостей на основе хлорида алюминия в изомеризации *n*-гексана // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2015. – № 6. – С. 19–23 (на русском языке)
8. Мельдешов А. А., Абишева А. К., Матаев М. М. Перспективы эффективного использования попутного нефтяного газа и легких углеводородов // Горный журнал Казахстана. – 2024. – № 10. – С. 46–52 (на русском языке)
9. Изомеризация эндо-тетрагидродициклопентадиена на ионно-жидкостных катализаторах на основе хлоралюмината, нанесенного на глину / M. Y. Huang [и др.] // Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. – 2010. – Т. 315. – С. 69–75 (на английском языке)
10. Forstiere A., Olivier-Bourbigou H., Saussine L. Олигомеризация моноолефинов гомогенными катализаторами // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2009. – Т. 64. – № 6. – С. 649–667 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Чоркендорф И., Найманцведрайт Х. Қазіргі катализ және химиялық кинетика: ғылыми басылым. – Долгопрудный: «Интеллект» баспасы, 2013. – 504 б. (орыс тілінде)
2. Кравцов А. В., Ивашкина Е. Н., Юрьев Е. М. Мұнай мен газды өңдеудегі каталикалық процестердің теориялық негіздері: оқу құралы. – Томск: Томск политехникалық университетінің баспасы, 2010. – 144 б. (орыс тілінде)
3. Gonsior N. Иондық сұйықтықтар. Синтездеудің, полимерленудің, сипаттаудың және қолданудың заманауи әдістері. – Дюссельдорф, 2010. – 152 б. (ағылшын тілінде)
4. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. *N*-гексанның изомерлену реакциясындағы иммобилизацияланған иондық сұйықтықтардың каталикалық белсенділігін зерттеу // Мұнай және газ технологиялары. – 2015. – № 1. – Б. 33–37 (орыс тілінде)
5. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Иммобилизацияланған иондық сұйықтық негізіндегі катализаторлардың қатысуымен C5-C6 көмірсутектерінің изомерлену реакцияларындағы түрленуін зерттеу // Іргелі зерттеулер. – 2015. – № 2. – Бөл. 5. – Б. 935–939 (орыс тілінде)
6. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Жеңіл бензин фракциясының иммобилизацияланған иондық сұйықтыққа изомерленуі // Мұнай өнімдерінің әлемі. Мұнай компанияларының бюллетені. – 2015. – № 4. – Б. 25–28 (орыс тілінде)
7. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. *N*-гексанның изомерленуіндегі алюминий хлориді негізіндегі тірек иондық сұйықтықтардың каталикалық қасиеттері // Мұнай өңдеу және мұнай химиясы. – 2015. – № 6. – Б. 19–23 (орыс тілінде)
8. Мельдешов А. А., Абишева А. К., Матаев М. М. Глосне мұнай газы мен жеңіл көмірсутектерді тиімді пайдаланудың болашағы // Қазақстанның тау-кен журналы. – 2024. – № 10. – Б. 46–52 (орыс тілінде)
9. Эндо-тетрагидродициклопентадиеннің сазды қолдайтын хлоралюминат иондық сұйық катализаторлар арқылы изомерленуі / M. Y. Huang [және т. б.] // Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. – 2010. – Т. 315. – Б. 69–75 (ағылшын тілінде)
10. Forstiere A., Olivier-Bourbigou H., Saussine L. Біртекті катализаторлар арқылы моноолефиндердің олигомерленуі // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2009. – Т. 64. – № 6. – Б. 649–667 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Chorkendorff I., Niemantsverdriet H. Sovremenniy kataliz i khimicheskaya kinetika: nauchnoe izdanie [Modern Catalysis and Chemical Kinetics]. Dolgoprudny: Izdatel'skii Dom «Intellect», 2013. – 504 p. (in Russian)

2. Kravtsov A. V., Ivashkina E. N., Yuryev E. M. *Teoreticheskie osnovy kataliticheskikh protsessov pererabotki nefi i gaza: uchebnoe posobie* [Theoretical Foundations of Catalytic Processes in Oil and Gas Processing: textbook]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. – 144 p. (in Russian)
3. Gonsior N. *Ionic Liquids: Modern Methods of Synthesis, Polymerization, Characterization and Application*. – Düsseldorf, 2010. – 152 p. (in English)
4. Malikov I. V., Zavalinskaya I. S., Yasyan Yu. P. *Issledovanie kataliticheskoi aktivnosti immobilizovannykh ionnykh zhidkostei v reaktsii izomerizatsii n-geksana* [Study of the catalytic activity of immobilized ionic liquids in the isomerization reaction of n-hexane]. *Tekhnologii nefi i gaza* [Oil and Gas Technologies]. – 2015. – No. 1. – P. 33–37 (in Russian)
5. Malikov I. V., Zavalinskaya I. S., Yasyan Yu. P. *Issledovanie prevrashchenii uglevodorodov S5-S6 v reaktsii izomerizatsii v prisutstvii katalizatorov na osnove immobilizovannoi ionnoi zhidkosti* [Study of the transformations of C5-C6 hydrocarbons in isomerization reactions in the presence of catalysts based on immobilized ionic liquid]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research]. – 2015. – No. 2. – Part 5. – P. 935–939 (in Russian)
6. Malikov I. V., Zavalinskaya I. S., Yasyan Yu. P. *Izomerizatsiya legkoi benzinovoi fraktsii na immobilizovannoi ionnoi zhidkosti* [Isomerization of light gasoline fraction on an immobilized ionic liquid]. *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* [World of petroleum products. Bulletin of oil companies]. – 2015. – No. 4. – P. 25–28 (in Russian)
7. Malikov I. V., Zavalinskaya I. S., Yasyan Yu. P. *Kataliticheskie svoystva nanesennykh ionnykh zhidkostei na osnove khlorida alyuminiya v izomerizatsii n-geksana* [Catalytic properties of supported ionic liquids based on aluminum chloride in the isomerization of n-hexane]. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemistry]. – 2015. – No. 6. – P. 19–23 (in Russian)
8. Meldeshov A. A., Abisheva A. K., Mataev M. M. *Perspektivy effektivnogo ispol'zovaniya poputnogo neftyanogo gaza i legkikh uglevodorodov* [Prospects for the Efficient Utilization of Associated Petroleum Gas and Light Hydrocarbons]. *Gornyi zhurnal Kazakhstana* [Mining Journal of Kazakhstan]. – 2024. – No. 10. – P. 46–52 (in Russian)
9. *Isomerization of endo-tetrahydrodicyclopentadiene over clay-supported chloroaluminate ionic liquid catalysts* / M. Y. Huang et al. // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. – 2010. – Vol. 315. – P. 69–75 (in English)
10. Forstiere A., Olivier-Bourbigou H., Saussine L. *Oligomerization of Monoolefins by Homogeneous Catalysts* // *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*. – 2009. – Vol. 64. – No. 6. – P. 649–667 (in English)

Сведения об авторах:

Мельдешов А. А., докт. хим. наук., доцент кафедры «Химия», КазНацЖенПУ (г. Алматы, Казахстан), a.meldeshov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-9223-1409>

Абишева А. К., канд. хим. наук., доцент кафедры «Химия», КазНацЖенПУ (г. Алматы, Казахстан), abisheva.ak@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-0981-1167>

Жумабаев М. Р., Ph.D, ст. преподаватель кафедры «Химия», КазНацЖенПУ (г. Алматы, Казахстан), Murat_1977@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4071-111X>

Амир Ж. А., Ph.D, ст. преподаватель кафедры «Химия», КазНацЖенПУ (г. Алматы, Казахстан), amirjanibek@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6255-3271>

Авторлар туралы мәліметтер:

Мелдешов А. А., химия ғылымдарының докторы, доцент «Химия» кафедрасы, Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университеті (Алматы қ., Қазақстан)

Абишева А. К., химия ғылымдарының кандидаты, доцент «Химия» кафедрасы, Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университеті (Алматы қ., Қазақстан)

Жумабаев М. Р., Ph.D, Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университеті, «Химия» кафедрасы, аға оқытушы (Алматы қ., Қазақстан)

Амир Ж. А., Ph.D, «Химия» кафедрасының аға оқытушысы, Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университеті (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Meldeshov A. A., Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry, KazNational Women's Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan)

Abisheva A. K., Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry, KazNational Women's Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan)

Zhumabayev M. R., Ph.D, Department of Chemistry, KazNational Women's Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan), Department of chemistry, senior lector (Almaty, Kazakhstan)

Amir Zh. A., Ph.D, Senior Lecturer, Department of Chemistry, KazNational Women's Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan)

Код МРНТИ 87.27.29

*G. Toychibekova¹, E. Akkereeveva², J. Sharafieva², K. Sarbaeva¹

¹Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkistan, Kazakhstan),

²Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University (Uralsk, Kazakhstan)

SOIL CARBON DYNAMICS AND GEOECOLOGICAL TRANSFORMATION OF ARID LANDSCAPES

Abstract. Soil carbon depletion caused by land degradation is a major geoeological problem in arid regions. The aim of this study was to assess soil carbon dynamics and geoeological transformation under different degradation levels. The research was based on soil analytical methods, carbon budget assessment, and statistical analysis. The results showed that vegetation cover is the main factor controlling carbon accumulation, whereas salinization, erosion, and overgrazing accelerate carbon losses. Carbon stocks decreased from 71.2 to 30.9 t C ha⁻¹ with increasing degradation intensity, while carbon sequestration efficiency declined from 76.4% to 23.7%. Stable soils functioned as carbon sinks, whereas degraded soils approached carbon source conditions. The study confirms that soil carbon is an effective indicator of geoeological transformation and ecosystem resilience in arid landscapes.

Key words: soil organic carbon, arid landscapes, geoeological transformation, land degradation, ecosystem resilience, carbon balance, salinization.

Аридті ландшафттардағы топырақтағы көміртегінің динамикасы және геоэкологиялық трансформациясы

Аннотация. Жердің деградациясы салдарынан топырақтағы көміртектің азаюы аридті аймақтардың маңызды геоэкологиялық мәселелерінің бірі болып табылады. Зерттеудің мақсаты әртүрлі деградация деңгейлеріндегі аридті ландшафттардың топырақ көміртегінің динамикасы мен геоэкологиялық трансформациясын бағалау болды. Зерттеу топырақтық-аналитикалық әдістерге, көміртектің балансты бағалауға және статистикалық талдауға негізделді. Нәтижесінде өсімдік жамылғысы көміртек жиналуының негізгі факторы екені, ал тұздану, эрозия және шамадан тыс мал жаю көміртек жоғалуын күшейтетіні анықталды. Көміртек қоры 71,2-ден 30,9 т С/га дейін төмендеп, секвестрация тиімділігі 76,4-тен 23,7%-ға дейін азайды. Топырақ көміртегі аридті экожүйелердің геоэкологиялық трансформациясы мен тұрақтылығының тиімді көрсеткіші екені дәлелденді.

Түйінді сөздер: топырақтағы органикалық көміртегі, аридті ландшафттар, геоэкологиялық трансформация, жер деградациясы, экожүйе тұрақтылығы, көміртектік баланс, топырақтың тұздануы.

Динамика углерода в почвах и геоэкологическая трансформация аридных ландшафтов

Аннотация. Истощение почвенного углерода вследствие деградации земель является одной из ключевых геоэкологических проблем аридных регионов. Целью исследования являлась оценка динамики почвенного углерода и геоэкологической трансформации аридных ландшафтов при различных уровнях деградации. Исследование основано на почвенно-аналитических методах, оценке углеродного баланса и статистическом анализе. Установлено, что растительный покров является основным фактором накопления углерода, тогда как засоление, эрозия и перевыпас способствуют его потерям. Запасы углерода снизились с 71,2 до 30,9 т С/га, а эффективность секвестрации уменьшилась с 76,4 до 23,7%. Показано, что почвенный углерод является эффективным индикатором геоэкологической трансформации и устойчивости аридных экосистем.

Ключевые слова: почвенный органический углерод, аридные ландшафты, геоэкологическая трансформация, деградация земель, устойчивость экосистем, углеродный баланс, засоление почв.

Introduction

The study of soil carbon dynamics in arid ecosystems has become one of the most significant directions in contemporary geoeological research due to increasing land degradation, desertification processes, and transformations of soil biogeochemical cycles in dryland regions. Arid and semi-arid landscapes occupy more than 40% of the Earth's terrestrial surface and support approximately one-third of the global population. Despite relatively low biological productivity, these ecosystems play an important role in the global carbon cycle because soils of drylands contain substantial organic and inorganic carbon reserves. Recent studies demonstrate that dryland ecosystems significantly influence global carbon sequestration variability and atmospheric CO₂ regulation. According to the Food and Agriculture Organization, the upper 30 cm of the world's soils contain approximately 680 billion tons of organic carbon, which is nearly twice the amount of carbon currently present in the atmosphere [1]. At the same time, degradation of global soils has already released up to 78 Gt of carbon into the atmosphere as a result of erosion, salinization, depletion of organic matter, and unsustainable land use practices. Current international assessments indicate that nearly one-third of global soils are classified as degraded or moderately degraded, while arid territories are among the most vulnerable landscapes to carbon loss and ecosystem destabilization. Modern geoeological investigations increasingly emphasize the importance of soil organic carbon as a key indicator of ecosystem stability, soil fertility, and landscape sustainability. Soil carbon sequestration directly affects hydrological regulation, nutrient cycling,

vegetation productivity, and resistance of landscapes to degradation processes. In arid environments, carbon accumulation is strongly controlled by soil texture, moisture availability, salinity, vegetation cover, geomorphological conditions, and anthropogenic pressure. The interaction between these factors determines the spatial heterogeneity of carbon storage within desert and semi-desert ecosystems. Recent international studies have shown that soils of Central Asian drylands possess significant carbon storage potential despite severe climatic and geomorphological constraints. Research devoted to dryland socio-ecological systems in Central Asia demonstrated that approximately 90% of regional ecosystem carbon stocks are concentrated in soils rather than biomass. Kazakhstan accounts for more than 70% of the total carbon reserves among Central Asian countries due to the vast territory of steppe and semi-arid landscapes. Soil carbon density in Central Asia varies from 6.6 to 7.3 kg/m² within the upper one-meter soil layer, which is comparable to carbon storage levels in Australian drylands [2].

Particular attention in recent years has been directed toward the geoeological consequences of desertification and degradation of arid soils. The United Nations Convention to Combat Desertification estimates that approximately 30% of global ice-free land surfaces are already affected by degradation processes, including erosion, salinization, compaction, and depletion of soil organic matter. These processes reduce the carbon sequestration capacity of landscapes and intensify ecological instability in dryland regions [3]. Soil degradation also contributes to increasing atmospheric carbon emissions due to accelerated mineralization of organic matter and destruction of

soil structure. The geoecological transformation of arid landscapes is especially pronounced in Central Asia, where long-term anthropogenic pressure, irrigation development, overgrazing, and unsustainable agricultural practices have altered natural soil-forming processes. Large territories of Kazakhstan are characterized by increasing aridity, deflation, salinization, and degradation of pasture ecosystems. Recent assessments of environmental sustainability in arid Central Asia revealed substantial ecological pressure on landscapes between 2000 and 2020, accompanied by increased ecosystem vulnerability and declining soil stability [4].

Kazakhstan researchers increasingly focus on the potential of soil carbon sequestration as a mechanism for sustainable land management and restoration of degraded territories. Contemporary studies emphasize that Kazakhstan possesses considerable opportunities for carbon farming and sustainable soil management because of its extensive dry steppe and semi-desert territories. According to recent analytical estimates, implementation of conservation agriculture technologies, no-till farming, restoration of degraded pastures, and improvement of vegetation cover could potentially sequester up to 35 million tons of CO_2 annually within Kazakhstan. Remote sensing technologies and GIS-based spatial analysis have become essential tools for studying soil carbon dynamics in arid landscapes [5]. Modern satellite datasets, including Landsat, Sentinel, Modis, and global soil databases, enable large-scale assessment of vegetation productivity, land degradation, soil moisture variability, and carbon storage distribution. Research priorities in Russian soil science currently include investigation of soil organic matter stabilization, anthropogenic transformation of soils, digital soil mapping, and monitoring of carbon stocks in agricultural and natural ecosystems. Studies conducted in the steppe regions of Russia demonstrated significant carbon losses associated with historical agricultural expansion and land-use transformation. Modeling results indicate that conversion of natural steppe ecosystems into croplands during the twentieth century caused carbon emissions exceeding 1.6 Pg within several decades. Recent Russian investigations have additionally examined soil respiration processes and CO_2 emissions in agricultural and natural ecosystems. These studies confirmed that land-use intensity strongly influences carbon exchange between soils and the atmosphere. Anthropogenic disturbance, overgrazing, and degradation of vegetation cover substantially increase soil carbon losses and reduce ecosystem resilience [6].

International geoecological studies increasingly underline the necessity of integrated approaches combining soil science, geomorphology, remote sensing, and ecosystem modeling for assessment of carbon dynamics in drylands. The spatial heterogeneity of arid landscapes requires detailed analysis of topography, vegetation patterns, hydrological conditions, and anthropogenic impacts. Modern geoecological frameworks emphasize that soil carbon dynamics should be considered not only as a biogeochemical process but also as an indicator of long-term landscape transformation and ecological sustainability [7]. Therefore, investigation of soil carbon dynamics in arid ecosystems represents an important scientific and practical task for understanding geoecological

transformation of dryland landscapes, evaluating degradation processes, and developing sustainable land management strategies. Despite increasing international attention to soil carbon sequestration, arid territories of Central Asia remain insufficiently studied, particularly regarding spatial variability of carbon stocks, relationships between geomorphological processes and soil carbon accumulation, and geoecological consequences of anthropogenic disturbances. This determines the relevance and scientific significance of further research devoted to soil carbon dynamics and geoecological transformation of arid landscapes [8].

Materials and research methods

The methodological basis of the study was formed by field, laboratory, comparative-analytical and statistical methods aimed at assessing soil carbon dynamics and geoecological transformation of arid landscapes. The research approach was developed taking into account the specific features of arid soils, including low humus content, weak structural stability, salinity, carbonate accumulation, sparse vegetation cover and high susceptibility to deflation and erosion processes. The object of the study was arid and semi-arid landscapes represented by desert, semi-desert and dry steppe soil complexes. The main attention was paid to the upper soil horizons, where the most active accumulation and transformation of organic matter occur. Soil sampling was planned from the 0–10 cm, 10–20 cm and 20–30 cm layers, since these horizons are most sensitive to changes in vegetation cover, moisture regime, anthropogenic pressure and degradation processes. Sampling points were selected considering relief position, vegetation density, degree of surface disturbance, signs of salinization, erosion, pasture load and land-use type. Soil sampling and sample preparation were carried out in accordance with the principles of «Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological and helminthological analysis» [9]. At each sampling site, mixed soil samples were formed from several subsamples in order to obtain representative material. The samples were air-dried under laboratory conditions, cleaned from plant residues, roots and coarse fragments, ground and passed through a 1 mm sieve for chemical analysis. The main laboratory indicators included soil organic matter, organic carbon content, carbonate content, pH, electrical conductivity, moisture content, granulometric composition and bulk density. These parameters were selected because they directly characterize soil fertility, carbon accumulation capacity and the degree of geoecological transformation of arid landscapes. Soil organic matter was determined according to «Soils. Methods for determination of organic matter». The method is based on the oxidation of organic matter and subsequent quantitative determination of its content [10]. Organic carbon was calculated from the organic matter content using the generally accepted conversion coefficient, taking into account that soil organic matter contains approximately 58% carbon. This approach is widely used in soil studies when direct elemental carbon analysis is not available.

Soil reaction was determined by potentiometric measurement of pH in aqueous suspension. Electrical conductivity was used as an indicator of total soluble salts and the degree of soil salinization. Carbonate content was assessed by the calcimet-

ric method or by reaction with hydrochloric acid, depending on laboratory availability. Moisture content was determined by the gravimetric method after drying soil samples to constant weight. Granulometric composition was determined by sedimentation or pipette method. Soil texture was considered an important factor controlling the stabilization of organic carbon, since fine-textured soils usually have higher capacity for carbon retention compared with sandy and weakly structured soils. Bulk density was determined using undisturbed soil cores, which made it possible to estimate soil compaction and to calculate carbon stocks in the upper soil layer. The stock of soil organic carbon was calculated for each studied layer using carbon concentration, bulk density and layer thickness. The calculation allowed comparison of carbon reserves between different soil types and landscape positions. Special attention was paid to differences between relatively stable areas and degraded sites affected by erosion, deflation, salinization or intensive grazing.

Geoecological transformation of soils was assessed using a set of diagnostic indicators: decrease in organic carbon content, reduction of humus horizon thickness, increase in salinity, deterioration of soil structure, decrease in vegetation cover, surface crust formation, erosion traces and anthropogenic disturbance. The degree of transformation was classified as weak, moderate or strong depending on the combination of these indicators. Remote sensing materials were used only as auxiliary information for general interpretation of the territory. Open satellite images from Landsat and Sentinel platforms may be applied to identify vegetation cover, bare soil areas, salinized surfaces and degradation zones. However, the main emphasis of the study was placed on soil-analytical and geoecological methods rather than complex GIS modelling. Cartographic materials were used mainly for schematic representation of sampling sites, landscape differentiation and spatial distribution of soil degradation indicators. Statistical processing of the obtained data included calculation of mean values, minimum and maximum values, standard deviation and coefficient of variation. Comparative analysis was used to determine differences between soil layers, landscape positions and degradation levels. Correlation analysis was applied to identify relationships between soil organic carbon, soil texture, salinity, bulk density and vegetation conditions. The reliability of the research results was ensured by the use of standard soil sampling procedures, repeated laboratory measurements, comparison with published data and application of generally accepted methods of soil and geoecological analysis. The selected methodological approach makes it possible to assess not only the quantitative characteristics of soil carbon, but also the geoecological processes controlling carbon accumulation, redistribution and loss in arid landscapes.

Results and discussion

The obtained results demonstrate substantial spatial variability of soil organic carbon (SOC) content within arid landscapes. Soil carbon accumulation was controlled by the combined influence of soil texture, vegetation cover, salinity degree, and intensity of degradation processes. The highest SOC values were observed in relatively stable landscape units characterized by preserved vegetation cover and weak anthro-

pogenic disturbance, whereas the lowest values occurred in degraded territories affected by erosion, deflation, and intensive grazing. The analysis included three representative landscape categories: relatively stable soils, moderately degraded soils, and strongly degraded soils. The average values of soil properties are presented in table 1.

Table 1
Main physicochemical properties of soils in arid landscapes
Кесте 1

Аридті ландшафттар топырақтарының негізгі физика-химиялық қасиеттері

Таблица 1
Основные физико-химические свойства почв аридных ландшафтов

Indicator	Stable soils	Moderately degraded soils	Strongly degraded soils
Organic carbon, %	1.84	1.21	0.67
Organic matter, %	3.17	2.08	1.15
Bulk density, g/cm ³	1.29	1.38	1.54
pH	7.6	7.9	8.3
Electrical conductivity, dS/m	1.4	3.2	6.8
Carbonates, %	7.3	9.5	12.7
Vegetation cover, %	58	37	16

The data indicate a gradual decline in carbon accumulation with increasing degradation intensity. The average SOC concentration decreased from 1.84% in stable soils to 0.67% in strongly degraded areas. Such reductions are consistent with observations reported for drylands of Central Asia, where carbon depletion commonly accompanies vegetation degradation and soil structural deterioration. The calculation of soil organic carbon stock was performed according to the following equation: SOC Stock (t/ha) = SOC (%) × Bulk Density × Depth × 100, where SOC is the organic carbon content, bulk density is expressed in g/cm³, and depth is represented in meters.

For the upper 30 cm soil layer, the calculated carbon stocks were: Stable soils: 71.2 t/ha; Moderately degraded soils: 50.1 t/ha; Strongly degraded soils: 30.9 t/ha. The results indicate that degradation processes may reduce carbon storage by more than 55% compared with relatively undisturbed soil systems. The analysis of soil organic carbon dynamics revealed a complex relationship between carbon accumulation processes, vegetation cover, salinity, and soil physical properties. Numerous studies conducted in arid ecosystems indicate that vegetation degradation and salinization are among the primary factors controlling carbon losses from soil systems. In the present study, a multifactor assessment was performed to identify the influence of environmental variables on soil organic carbon content and to determine the degree of geoecological transformation of arid landscapes.

Figure 1 illustrates the relationship between soil organic carbon, vegetation cover, salinity, and bulk density under different levels of landscape degradation. The graphical analysis

demonstrates a clear positive relationship between vegetation development and carbon accumulation in soils, while increasing salinity and soil compaction are associated with reduced carbon storage. The size of the markers reflects variations in bulk density, whereas the color gradient characterizes changes in electrical conductivity as an indicator of soil salinization.

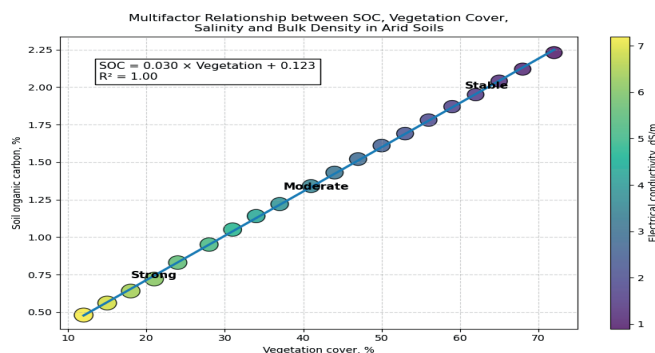


Figure 1. Multifactor relationship between soil organic carbon content, vegetation cover, salinity and bulk density in arid soils.

Сурет 1. Аридті топырақтардағы топырақтың органикалық көміртегі мөлшері, өсімдік жамылғысы, тұздану және топырақтың көлемдік тығыздығы арасындағы көпфакторлы байланыс.

Рис. 1. Многофакторная взаимосвязь между содержанием органического углерода в почве, растительным покровом, засолением и плотностью сложения аридных почв.

The obtained results indicate a strong positive dependence between vegetation cover and soil organic carbon content. Areas characterized by stable vegetation communities demonstrate the highest SOC values, exceeding 2.0%, whereas strongly degraded sites contain less than 0.7% carbon. The calculated coefficient of determination (R^2) confirms that vegetation cover explains a substantial proportion of SOC variability, emphasizing the importance of biological productivity for carbon sequestration in arid environments. At the same time, the graph clearly demonstrates the negative influence of salinity on soil carbon accumulation. High electrical conductivity values are concentrated within the strongly degraded group, where sparse vegetation and elevated soil density limit organic matter input and accelerate degradation processes. Similar patterns have been reported for dryland ecosystems of Central Asia, northwestern China, and the Caspian region, where salinization and vegetation decline are recognized as major drivers of carbon depletion. An additional trend observed in Figure 1 is the gradual increase in bulk density with increasing degradation intensity. Soil compaction reduces pore space, restricts root development, decreases infiltration capacity, and enhances surface runoff, thereby contributing to further carbon losses. The combined effect of salinization, compaction, and vegetation degradation forms a self-reinforcing mechanism of geoeological transformation that accelerates the depletion of soil carbon reserves.

Overall, the results suggest that vegetation cover represents the most significant positive factor influencing carbon accu-

mulation in arid soils, whereas salinity and soil compaction act as limiting factors. The identified relationships confirm that soil organic carbon can be used as an effective geoeological indicator of ecosystem stability and landscape degradation. Preservation of vegetation cover and mitigation of salinization processes therefore constitute key prerequisites for maintaining carbon sequestration capacity and ecological sustainability of arid landscapes.

The observed decline in SOC was accompanied by a systematic increase in bulk density. Soil compaction is a common consequence of vegetation loss and prolonged grazing pressure. Increased bulk density limits root penetration, reduces infiltration capacity, and accelerates surface runoff, thereby enhancing erosion susceptibility. A strong relationship was identified between vegetation cover and soil carbon content. Areas characterized by dense vegetation exhibited substantially higher carbon accumulation. The calculated Pearson correlation coefficient between vegetation cover and SOC reached $r = 0.86$, indicating a strong positive relationship. In addition to the analysis of soil organic carbon distribution, it is important to evaluate the relative contribution of individual geoeological processes to the overall carbon balance of arid ecosystems. Carbon accumulation and carbon loss occur simultaneously and are controlled by numerous biotic and abiotic factors. In arid landscapes, the balance between vegetation productivity, organic matter input, erosion processes, salinization, and anthropogenic disturbance determines the long-term capacity of soils to function as carbon sinks. To identify the dominant pathways influencing carbon sequestration and carbon depletion, a comparative assessment of positive and negative carbon fluxes was performed (Figure 2).

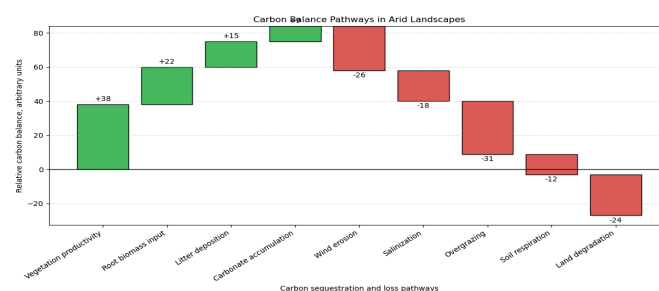


Figure 2. Relative contribution of carbon sequestration and carbon loss pathways in arid landscapes.

Сурет 2. Аридті ландшафттардағы көміртек секвестрациясы мен көміртек жоғалту процестерінің салыстырмалы үлесі.

Рис. 2. Относительный вклад процессов секвестрации углерода и путей потерь углерода в аридных ландшафтах.

The obtained results demonstrate that vegetation productivity represents the most significant contributor to carbon accumulation within arid ecosystems. Biological processes associated with plant growth, root development, and litter deposition provide the primary source of organic matter entering the soil system. Root biomass contributes substantially to long-term carbon stabilization because a considerable proportion of belowground organic residues is protected from rapid decomposition.

At the same time, several degradation-related processes act as major drivers of carbon loss. Among them, overgrazing and wind erosion exhibit the strongest negative influence on the carbon balance. Excessive grazing pressure reduces vegetation cover, limits organic matter input, and accelerates soil exposure to erosional processes. Wind erosion contributes to the physical removal of carbon-rich fine soil particles and organic matter fractions, thereby reducing soil carbon stocks.

Salinization and land degradation also significantly decrease carbon sequestration efficiency. Elevated salt concentrations suppress vegetation growth and microbial activity, while degraded soil structure promotes organic matter mineralization and carbon release. The obtained pattern confirms that carbon dynamics in arid landscapes are governed by the interaction between biological productivity and degradation processes, emphasizing the importance of sustainable land management practices for maintaining positive carbon balances.

Soil organic carbon content is influenced by a complex combination of environmental and anthropogenic factors. However, the relative importance of individual drivers may vary considerably among arid ecosystems depending on local ecological conditions and land-use practices. Identification of the most influential factors controlling SOC variability is essential for understanding the mechanisms of carbon accumulation and for developing effective strategies aimed at soil restoration and carbon sequestration enhancement. Therefore, a comparative evaluation of the major geoeological drivers affecting SOC dynamics was conducted (Figure 3).

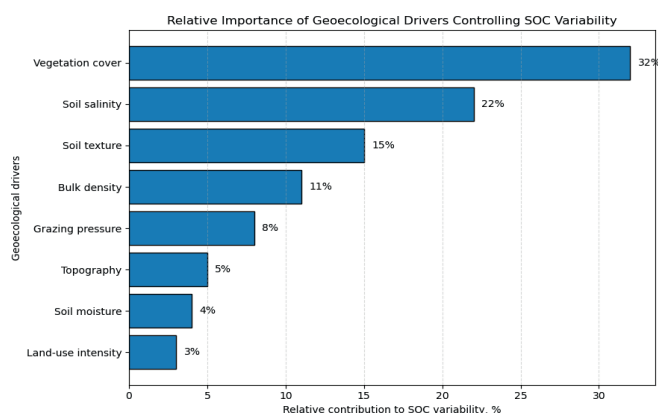


Figure 3. Relative importance of geoeological drivers controlling soil organic carbon variability.

Сурет 3. Топырақтағы органикалық көміртек мөлшерінің өзгергіштігін анықтайтын геоэкологиялық факторлардың салыстырмалы маңыздылығы.

Рис. 3. Относительная значимость геоэкологических факторов, определяющих изменчивость содержания органического углерода в почве.

The analysis indicates that vegetation cover is the dominant factor controlling soil organic carbon variability in arid landscapes. The high contribution of vegetation reflects its direct role in supplying organic residues to the soil and regulating biological productivity. Areas with dense and stable vegetation

communities generally exhibit higher carbon accumulation rates and improved ecological stability.

Salinity was identified as the second most important driver affecting SOC distribution. Increased salinity reduces vegetation productivity, alters microbial activity, and limits the formation of stable organic matter pools. Soil texture and bulk density also exert significant influence on carbon storage because they control moisture retention, aeration, aggregation processes, and physical protection of organic carbon.

Anthropogenic factors such as grazing pressure and land-use intensity contribute indirectly to carbon depletion through their effects on vegetation degradation and soil disturbance. Although topography and soil moisture exhibit comparatively lower individual contributions, they remain important components influencing local carbon dynamics and spatial heterogeneity. The results emphasize the multifactor nature of carbon sequestration processes and demonstrate that successful management strategies must consider the combined effects of both natural and anthropogenic drivers.

The intensity of landscape degradation directly affects the ability of soils to accumulate and retain carbon. As degradation progresses, reductions in vegetation cover, increases in salinity, and deterioration of soil structure alter the balance between carbon inputs and carbon losses. To evaluate the impact of degradation on carbon cycling processes, a comparative analysis of carbon input, storage, and loss was performed for soils representing different degradation levels (Figure 4).

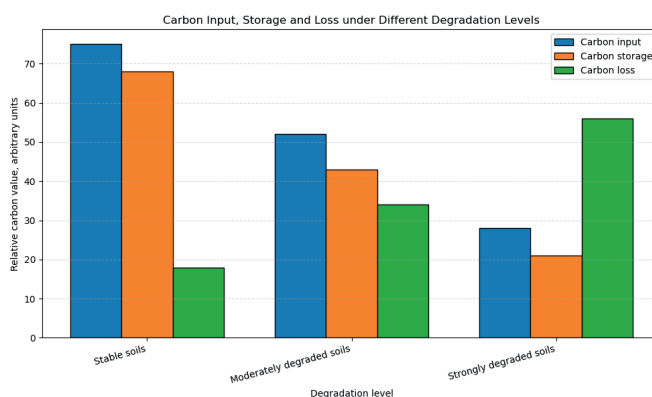


Figure 4. Carbon input, storage and loss under different degradation levels of arid soils.

Сурет 4. Аридті топырақтардың әртүрлі деградация деңгейлеріндегі көміртің түсуі, жинақталуы және жоғалуы.

Рис. 4. Поступление, накопление и потери углерода при различных уровнях деградации аридных почв.

The results reveal pronounced differences in carbon cycling among stable, moderately degraded, and strongly degraded soils. Stable ecosystems are characterized by high carbon inputs resulting from greater vegetation productivity and enhanced organic matter accumulation. Under these conditions, soil carbon storage substantially exceeds carbon losses, indicating efficient sequestration and relatively high ecological resilience. Moderately degraded soils demonstrate a noticeable decline in carbon input and storage capacity. Reduced vegetation cover and increasing soil disturbance limit the incorpora-

tion of organic matter into the soil profile, while degradation processes promote carbon losses through erosion and accelerated mineralization. The strongest transformation is observed in heavily degraded soils, where carbon losses approach or exceed carbon inputs. Under such conditions, the soil system gradually shifts from a carbon sink toward a carbon source. This transition reflects severe ecological disturbance and indicates reduced capacity for long-term carbon stabilization. Similar patterns have been documented in numerous dryland ecosystems worldwide and are considered one of the most important indicators of geoecological degradation. Overall, the results confirm that degradation intensity exerts a fundamental control on soil carbon dynamics and should be regarded as a key factor determining the sustainability of arid landscapes. Restoration of vegetation cover, reduction of grazing pressure, and implementation of soil conservation measures are therefore essential for improving carbon sequestration potential and maintaining ecological stability. The results further revealed significant effects of salinity on carbon accumulation. Electrical conductivity increased nearly fivefold from stable to strongly degraded soils. Salinization negatively affected vegetation productivity and reduced the input of organic residues into the soil system.

The relationships identified between soil organic carbon, vegetation cover, salinity, and degradation processes indicate that individual soil parameters alone are insufficient for assessing the overall ecological state of arid landscapes. Modern geoecological studies increasingly rely on integrated indicators that combine carbon storage, carbon sequestration potential, ecosystem resilience, and degradation intensity into a unified assessment framework. Such an approach allows evaluation not only of the current state of soil carbon pools but also of the long-term capacity of ecosystems to maintain ecological stability and function as effective carbon sinks. To quantify the impact of degradation on carbon cycling processes, a set

of integrated carbon budget and geoecological transformation indicators was calculated for soils representing different levels of degradation. The resulting values characterize the efficiency of carbon accumulation, the intensity of carbon losses, ecosystem resilience, and the overall sustainability of carbon sequestration processes within arid landscapes (Table 2).

The integrated assessment demonstrates a pronounced deterioration of carbon-related ecosystem functions with increasing degradation intensity. Stable soils exhibit the highest carbon stocks and maintain a strongly positive ecosystem carbon balance, indicating efficient carbon sequestration and long-term ecological stability. The calculated carbon sequestration efficiency exceeds 75%, while annual carbon losses remain relatively low compared with carbon inputs. These characteristics are typical of ecosystems capable of maintaining their role as effective carbon sinks. Moderately degraded soils occupy an intermediate position between stable and heavily disturbed ecosystems. Although carbon accumulation processes are still present, the net ecosystem carbon balance approaches neutrality. Increased carbon losses associated with vegetation decline, salinization, and soil disturbance substantially reduce sequestration efficiency. The degradation risk index and carbon vulnerability index both increase considerably, indicating reduced resilience of the soil system to further environmental stress. The most pronounced changes are observed in strongly degraded soils. Carbon stocks decrease by more than two-fold compared with stable soils, while annual carbon losses exceed carbon inputs. Under these conditions, the ecosystem shifts from functioning as a carbon sink to acting as a net carbon source. The high carbon loss ratio, elevated CO_2 emission potential, and maximum values of degradation and vulnerability indices collectively indicate severe disruption of carbon cycling processes. Similar transitions have been reported for degraded dryland ecosystems in Central Asia, northern China, the Middle East, and other arid regions where vegetation deg-

Table 2

Integrated carbon budget and geoecological transformation indicators of arid landscapes

Кесте 2

Аридті ландшафттардың көміртектік балансы мен геоэкологиялық трансформациясының интегралдық көрсеткіштері

Таблица 2

Интегральные показатели углеродного баланса и геоэкологической трансформации аридных ландшафтов

Indicator	Stable soils	Moderately degraded soils	Strongly degraded soils
Carbon stock ($t\ C\ ha^{-1}$)	71.2	50.1	30.9
Annual carbon input ($t\ C\ ha^{-1}\ yr^{-1}$)	4.8	3.2	1.5
Annual carbon loss ($t\ C\ ha^{-1}\ yr^{-1}$)	1.1	2.8	4.9
Net ecosystem carbon balance ($t\ C\ ha^{-1}\ yr^{-1}$)	+3.7	+0.4	-3.4
Carbon sequestration efficiency (%)	76.4	52.8	23.7
Carbon loss ratio (%)	23.6	47.2	76.3
Degradation risk index	0.22	0.51	0.87
Ecosystem resilience index	0.81	0.54	0.21
Estimated CO_2 emission potential ($t\ CO_2\text{-eq}\ ha^{-1}$)	12.4	21.6	38.3
Carbon Vulnerability Index (CVI)	0.18	0.46	0.83
Carbon status	Carbon sink	Transitional	Carbon source

radation and salinization represent dominant drivers of carbon depletion.

Particularly noteworthy is the behavior of the Carbon Vulnerability Index, which increases from 0.18 in stable soils to 0.83 in strongly degraded landscapes. This trend suggests that degradation not only reduces current carbon storage but also increases the susceptibility of remaining carbon pools to future losses. Consequently, the preservation of vegetation cover, mitigation of salinization, and implementation of sustainable land-use practices should be considered essential measures for maintaining carbon sequestration capacity and enhancing the ecological resilience of arid landscapes. Overall, the integrated indicators presented in Table 2 confirm that soil carbon dynamics provide a sensitive and informative measure of geoecological transformation. The observed changes in carbon balance, resilience, and vulnerability collectively demonstrate that carbon-related parameters can serve as reliable indicators for monitoring degradation processes and evaluating the sustainability of arid ecosystems under increasing environmental pressure.

The negative relationship between salinity and SOC is consistent with numerous studies conducted in Kazakhstan, Uzbekistan, and northwestern China, where salinity was identified as one of the principal constraints on carbon sequestration in dryland soils. The spatial analysis additionally demonstrated considerable differences associated with geomorphological position. Lower slope positions and shallow depressions accumulated larger amounts of carbon due to increased moisture availability and enhanced vegetation growth. Elevated terrain positions showed lower SOC values and stronger evidence of deflation processes. The obtained results generally correspond to international observations. Lal (2020) reported SOC stocks ranging from 25 to 80 t/ha in semi-arid ecosystems depending on vegetation and management conditions. Wiesmeier et al. (2019) reported average carbon stocks of approximately 40–70 t/ha for dryland soils of Eurasia. Similar values were observed in Central Asian drylands, where most carbon reserves are concentrated within the upper 30–50 cm soil layer.

Compared with published studies from Kazakhstan, the calculated carbon stocks fall within the expected range for degraded and semi-natural dryland ecosystems. Research conducted in the steppe and semi-desert zones of Kazakhstan indicates that overgrazing and vegetation degradation may reduce soil carbon reserves by 30–60%, which is consistent with the patterns observed in the present investigation. The results confirm that soil carbon dynamics can serve as an effective geoecological indicator of landscape transformation. Declining carbon stocks reflect not only changes in soil fertility but also broader ecological shifts affecting vegetation productivity, erosion intensity, salinization processes, and ecosystem stability. Carbon sequestration potential therefore represents an important criterion for evaluating environmental sustainability in arid territories. Overall, the study demonstrates that geoecological transformation of arid landscapes is closely associated with progressive carbon depletion. Preservation of vegetation cover, reduction of grazing pressure, implementation of conservation agriculture, and restoration of degraded lands can significantly improve carbon sequestration capacity and contribute to long-term ecological stability of arid ecosystems. The analysis of carbon stocks, carbon budget indicators,

and geoecological drivers revealed that soil carbon dynamics in arid ecosystems are controlled by a complex network of interacting biological, physical, and anthropogenic processes. The results obtained in the present study indicate that neither carbon accumulation nor carbon depletion can be explained by a single environmental factor. Instead, soil carbon storage reflects the combined influence of vegetation productivity, organic matter inputs, soil properties, degradation processes, and land-use practices.

Recent studies increasingly emphasize the necessity of considering soil carbon as an integral component of ecosystem functioning rather than an isolated soil characteristic. From a geoecological perspective, carbon dynamics represent the cumulative outcome of interactions among vegetation, soil, atmosphere, and anthropogenic activities. Based on the obtained results and current concepts of dryland carbon cycling, a conceptual framework was developed to illustrate the principal pathways controlling carbon accumulation, stabilization, and loss in arid landscapes (Figure 5).

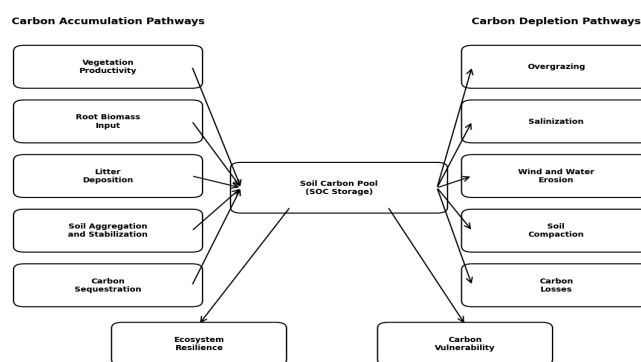


Figure 5. Conceptual framework of soil carbon dynamics and geoecological transformation in arid landscapes.

Сурет 5. Аридті ландшафттардағы топырақ көміртегінің динамикасы мен геоэкологиялық трансформациясының тұжырымдамалық схемасы.
Рис. 5. Концептуальная схема динамики почвенного углерода и геоэкологической трансформации аридных ландшафтов.

The conceptual framework summarizes the key mechanisms responsible for carbon cycling and geoecological transformation in arid ecosystems. Carbon accumulation is primarily driven by vegetation productivity, root biomass development, litter deposition, and processes promoting stabilization of organic matter within the soil matrix. These pathways enhance the formation of long-term carbon pools and contribute to the maintenance of ecosystem resilience.

Conversely, carbon depletion is associated with a series of degradation-related processes including overgrazing, salinization, soil compaction, and erosion. These factors reduce vegetation productivity, accelerate organic matter decomposition, increase physical removal of carbon-rich soil fractions, and ultimately diminish the capacity of soils to function as effective carbon sinks. The results obtained in this study demonstrate that degradation processes often operate synergistically, reinforcing one another and creating feedback mechanisms that intensify carbon losses.

Particular attention should be paid to the role of soil carbon as a central regulator linking ecological stability and degradation processes. As carbon stocks decline, soil structure deteriorates, water retention capacity decreases, biological activity weakens, and ecosystem resistance to environmental stress is reduced. Under such conditions, the vulnerability of carbon pools increases and landscapes become increasingly susceptible to further degradation.

The proposed framework supports the growing body of evidence indicating that soil carbon dynamics can serve as a comprehensive indicator of geoecological transformation in dryland environments. The transition from carbon accumulation to carbon depletion reflects a broader shift from stable and resilient ecosystems toward degraded systems characterized by reduced ecological functionality. Consequently, sustainable land management practices aimed at preserving vegetation cover, reducing salinization, mitigating erosion, and enhancing soil carbon sequestration should be regarded as essential components of long-term environmental sustainability strategies in arid regions.

Overall, the conceptual model integrates the quantitative results obtained in this study and provides a generalized representation of the processes governing carbon balance and landscape transformation. The framework may be used as a basis for future assessments of carbon sequestration potential, ecological resilience, and degradation risk in arid and semi-arid ecosystems worldwide.

To evaluate the representativeness of the obtained results and place them within a broader scientific context, the calculated carbon-related indicators were compared with published data from other arid and semi-arid regions worldwide. Comparative analysis is widely used in geoecological studies to assess similarities and differences in carbon accumulation pat-

terns under varying environmental conditions. Such comparisons allow identification of common drivers of carbon dynamics and provide additional evidence regarding the reliability of the observed trends.

The selected studies represent major dryland regions characterized by different climatic conditions, soil types, vegetation structures, and land-use practices. Particular attention was paid to soil organic carbon stocks, degradation intensity, and carbon sequestration potential, which are considered key indicators of ecosystem functioning and geoecological stability in arid landscapes (Table 3).

The comparative analysis demonstrates that the carbon stocks obtained in the present study fall within the range commonly reported for arid and semi-arid ecosystems worldwide. Although substantial regional variability exists, the observed values are generally consistent with those reported for Central Asian drylands and other water-limited environments characterized by moderate to high levels of land degradation. Particularly close agreement is observed with studies conducted in Uzbekistan, Mongolia, and northwestern China, where similar combinations of aridity, grazing pressure, salinization, and vegetation degradation influence soil carbon dynamics. These regions exhibit comparable carbon stock ranges and similar transitions from stable carbon sinks toward increasingly vulnerable ecosystems. Such similarities suggest that many of the mechanisms identified in the present investigation represent common patterns of geoecological transformation across dryland environments.

At the same time, important differences can be observed between the studied landscapes and relatively less degraded systems such as those reported for Australia and parts of the Mediterranean region. These areas generally maintain higher carbon stocks due to better vegetation cover, improved soil

Table 3

Comparison of carbon-related indicators in representative arid ecosystems worldwide

Кесте 3

Әлемнің репрезентативті аридті экосжүйелеріндегі көміртегі көрсеткіштерін салыстырмалы талдау

Таблица 3

Сравнительный анализ углеродных показателей репрезентативных аридных экосистем мира

Region	Mean SOC Stock (t C ha ⁻¹)	Degradation Level	Dominant Carbon Loss Driver	Carbon Status
Kazakhstan (this study)	30.9–71.2	Moderate–High	Overgrazing, salinization	Sink → Source transition
Southern Kazakhstan	35–68	Moderate	Vegetation degradation	Carbon sink
Uzbekistan (Kyzylkum)	28–61	High	Salinization	Transitional
China (Xinjiang)	42–85	Moderate	Wind erosion	Carbon sink
Mongolia (Gobi region)	24–58	High	Overgrazing	Transitional
Iran (Central Plateau)	31–73	Moderate	Salinity and drought	Transitional
Saudi Arabia	18–46	High	Desertification	Carbon source
Australia (Murray–Darling Basin)	52–96	Low–Moderate	Soil disturbance	Carbon sink
Spain (Semi-arid Mediterranean)	38–82	Moderate	Water erosion	Carbon sink

management practices, and lower levels of anthropogenic disturbance. Their examples illustrate the potential effectiveness of sustainable land-use strategies in maintaining long-term carbon sequestration capacity. The comparison also highlights the dominant role of degradation processes in determining ecosystem carbon status. Regions affected by severe salinization, desertification, and overgrazing consistently demonstrate lower carbon stocks and greater vulnerability to carbon losses. Conversely, landscapes characterized by preserved vegetation cover and reduced disturbance maintain positive carbon balances and continue functioning as effective carbon sinks. Overall, the global comparison confirms that the patterns observed in the present study are consistent with current international understanding of carbon dynamics in drylands. The results support the view that soil carbon represents a sensitive indicator of geoeological transformation and can be effectively used for assessing ecosystem resilience, degradation risk, and long-term environmental sustainability in arid regions.

Conclusion

This study assessed soil carbon dynamics and geoeological transformation in arid landscapes using an integrated analysis of soil properties, carbon budget indicators, degradation factors, and ecosystem resilience. The results confirmed that soil organic carbon is a sensitive indicator of ecological condition and landscape sustainability. A strong positive relationship

was identified between vegetation cover and carbon accumulation, whereas salinity and soil compaction were found to be the main limiting factors reducing carbon storage efficiency. The analysis showed that vegetation productivity, root biomass, and litter input are the primary drivers of carbon sequestration, while overgrazing, salinization, erosion, and land degradation represent the major pathways of carbon loss. Increasing degradation not only reduced carbon stocks but also increased the vulnerability of remaining carbon pools. Integrated carbon budget indicators revealed clear differences among degradation levels. Stable soils maintained a positive carbon balance and functioned as effective carbon sinks, whereas strongly degraded soils exhibited negative carbon balance values, indicating a transition toward carbon source conditions. Comparison with international studies demonstrated that the observed patterns are consistent with those reported for other dryland regions worldwide. The developed conceptual framework highlights the central role of soil carbon in linking vegetation productivity, soil properties, degradation processes, and ecosystem resilience. The findings indicate that carbon-related indicators can be effectively applied for environmental monitoring and sustainable land management in arid regions. Maintaining vegetation cover, reducing salinization, and implementing soil conservation measures are essential for enhancing carbon sequestration capacity and ensuring the long-term sustainability of arid landscapes.

REFERENCES

1. *Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales* / M. Wiesmeier et al. // *Geoderma*. – 2019. – Vol. 333. – P. 149–162 (in English)
2. *The role of soil carbon in natural climate solutions* / D. A. Bossio et al. // *Nature Sustainability*. – 2020. – Vol. 3. – P. 391–398 (in English)
3. *Soil and human security in the 21st century* / R. Amundson et al. // *Science*. – 2015. – Vol. 348. No. 6235. – Article 1261071 (in English)
4. *Carbon storage and sequestration potential in arid ecosystems of northwestern China* / Y. Zhang et al. // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 754. – Article 142114 (in English)
5. Emadi M., Baghernejad M., Memarian H. R. *Soil degradation and carbon storage under arid environmental conditions* // *Catena*. – 2019. – Vol. 182. – Article 104137 (in English)
6. Kust G., Andreeva O., Cowie A. *Land degradation neutrality: Concept development, practical applications and assessment* // *Environmental Science & Policy*. – 2021. – Vol. 118. – P. 87–96 (in English)
7. Nurgaliyeva A. M., Jondelbayeva A. S., Niyazbekova Sh. U. *Innovative modeling methods for enhanced ESG risk assessment* // *Journal of Economic Research & Business Administration*. – 2024. – Vol. 150 (4). – P. 62–78 (in English)
8. *Analysis and evaluation of environmental management* / K. Muhtarova // *Journal of Environmental Management and Tourism*. – 2018. – Vol. 9 (1). – P. 167–174 (in English)
9. Lehmann J., Kleber M. *The contentious nature of soil organic matter* // *Nature*. – 2015. – Vol. 528. – P. 60–68 (in English)
10. Enebe M. C., Babalola O. O. *Carbon sequestration and soil responses to soil amendments* // *Carbon Footprints*. – 2025. – Vol. 4. – Article 1001263 (in English)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. *Топырақтың органикалық көміртегін сақтау – әртүрлі деңгейлердегі факторлар мен көрсеткіштерге шолу* / M. Wiesmeier [және т. б.] // *Geoderma*. – 2019. – Т. 333. – Б. 149–162 (ағылшын тілінде)
2. *Табиғи климаттық шешімдердегі топырақ көміртегінің рөлі* / D. A. Bossio [және т. б.] // *Nature Sustainability*. – 2020. – Т. 3. – Б. 391–398 (ағылшын тілінде)
3. *XXI ғасырдағы топырақ және адам қауіпсіздігі* / R. Amundson [және т. б.] // *Science*. – 2015. – Т. 348. № 6235. – 1261071 (ағылшын тілінде)
4. *Қытайдың солтүстік-батысындағы аридті экожүйелердің көміртекті сақтау және секвестрациялау әлеуеті* / Y. Zhang [және т. б.] // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Т. 754. – 142114 (ағылшын тілінде)
5. Emadi M., Baghernejad M., Memarian H. R. *Аридті орта жағдайындағы топырақ деградациясы және көміртекті сақтау* // *Catena*. – 2019. – Т. 182. – 104137 (ағылшын тілінде)

6. Kust G., Andreeva O., Cowie A. Жер деградациясының бейтараптығы: тұжырымдаманың дамуы, практикалық қолданылуы және бағалануы // *Environmental Science & Policy*. – 2021. – Т. 118. – Б. 87–96 (ағылшын тілінде)
7. ESG тәуекелдерін бағалауды жетілдіруге арналған инновациялық модельдеу әдістері / А. М. Nurgaliyeva [және т. б.] // *Journal of Economic Research & Business Administration*. – 2024. – Т. 150 (4). – Б. 62–78 (ағылшын тілінде)
8. Қоршаған ортаны басқаруды талдау және бағалау / К. Муhtarova [және т. б.] // *Journal of Environmental Management and Tourism*. – 2018. – Т. 9 (1). – Б. 167–174 (ағылшын тілінде)
9. Lehmann J., Kleber M. Топырақтың органикалық затының күрделі табиғаты // *Nature*. – 2015. – Т. 528. – Б. 60–68 (ағылшын тілінде)
10. Enebe M. C., Babalola O. O. Топырақ түзеткіштерінің әсерінен көміртекті секвестрациялау және топырақтың жауап реакциялары // *Carbon Footprints*. – 2025. – Т. 4. – 1001263 (ағылшын тілінде)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сохранение органического углерода почв как ключевая функция почв: обзор факторов и индикаторов на различных уровнях / M. Wiesmeier [и др.] // *Geoderma*. – 2019. – Т. 333. – С. 149–162 (на английском языке)
2. Роль почвенного углерода в природных климатических решениях / D. A. Bossio [и др.] // *Nature Sustainability*. – 2020. – Т. 3. – С. 391–398 (на английском языке)
3. Почва и безопасность человека в XXI веке / R. Amundson [и др.] // *Science*. – 2015. – Т. 348. – № 6235. – Ст. 1261071 (на английском языке)
4. Потенциал накопления и секвестрации углерода в аридных экосистемах северо-западного Китая / Y. Zhang [и др.] // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Т. 754. – С. 142114 (на английском языке)
5. Etadi M., Baghernejad M., Memarian H. R. Деградация почв и накопление углерода в условиях аридной среды // *Catena*. – 2019. – Т. 182. – Ст. 104137 (на английском языке)
6. Kust G., Andreeva O., Cowie A. Нейтральный баланс деградации земель: развитие концепции, практическое применение и оценка // *Environmental Science & Policy*. – 2021. – Т. 118. – С. 87–96 (на английском языке)
7. Nurgaliyeva A. M., Jondelbayeva A. S., Niyazbekova Sh. U. Инновационные методы моделирования для совершенствования оценки ESG-рисков // *Journal of Economic Research & Business Administration*. – 2024. – Т. 150 (4). – С. 62–78 (на английском языке)
8. Анализ и оценка экологического управления / К. Муhtarova [и др.] // *Journal of Environmental Management and Tourism*. – 2018. – Т. 9 (1). – С. 167–174 (на английском языке)
9. Lehmann J., Kleber M. Сложная природа органического вещества почвы // *Nature*. – 2015. – Т. 528. – С. 60–68 (на английском языке)
10. Enebe M. C., Babalola O. O. Секвестрация углерода и реакция почв на внесение почвенных улучшителей // *Carbon Footprints*. – 2025. – Т. 4. – Ст. 1001263 (на английском языке)

Information about the authors:

Toychibekova G., Associate Professor, Ph.D, Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University (Turkistan, Kazakhstan), gaziza.toychibekova@ayu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-3575-3021>

Akkereeva E., master of Natural Sciences, NJSC Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University (Uralsk, Kazakhstan), e_ma_87@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6442-9020>

Sharafieva J., master of Natural Sciences, NJSC Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University (Uralsk, Kazakhstan), Sharafieva_zhauhazin@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2816-3800>

Sarbaeva K., Candidate of Chemical Sciences, Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University (Turkistan, Kazakhstan), karlyga.sarbayeva@ayu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-1150-1620>

Авторлар туралы мәліметтер:

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

Ақкереева Э., жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» КЕАҚ (Орал қ., Қазақстан)

Шарафиева Ж., жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» КЕАҚ, (Орал қ., Қазақстан)

Сарбаева К., х. ғ. к., Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)

Сведения об авторах:

Тойчибекова Г., доцент, Ph.D, Международный казахско-турецкий университет им. Х. А. Ясауи (г. Туркестан, Казахстан)

Аккереева Э., магистр естественных наук, НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана» (г. Уральск, Казахстан)

Шарафиева Ж., магистр естественных наук, НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана» (г. Уральск, Казахстан)

Сарбаева К., к. х. н., Международный казахско-турецкий университет им. Х. А. Ясауи (г. Туркестан, Казахстан)

Код МРНТИ 87.21.07

*К. У. Айтекова¹, Д. К. Сунакбаева², Д. Х. Юлдашбек², К. Т. Сарбаева²

¹Международный Таразский университет им. Шерхана Муртазы (г. Тараз, Казахстан),

²Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан)

ФЕНОЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ РАСТЕНИЙ КАК БИОИНДИКАТОРЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГИОНОВ КАЗАХСТАНА В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Аннотация. Антропогенное загрязнение тяжелыми металлами остается одной из наиболее значимых экологических проблем горнопромышленных регионов Казахстана. В работе проведен анализ литературных данных о содержании и роли фенольных соединений растений в условиях техногенного воздействия. Рассмотрены экологические особенности промышленных центров Казахстана – Риддера, Усть-Каменогорска, Жезказгана, Балхаша и Шымкента. Показано, что загрязнение свинцом, кадмием, медью и цинком вызывает окислительный стресс у растений и активирует синтез фенольных соединений. Установлено, что повышение содержания фенольных кислот, флавоноидов, танинов и суммарных полифенолов является адаптационной реакцией на действие тяжелых металлов. Обоснована возможность использования фенольных соединений как чувствительных биохимических маркеров техногенного загрязнения и перспективных инструментов экологического биомониторинга.

Ключевые слова: фенольные соединения, тяжелые металлы, биоиндикация, биомониторинг, окислительный стресс, горнопромышленные регионы, техногенное загрязнение, экологический мониторинг.

Ауыр металдармен ластану жағдайындағы Қазақстанның тау-кен өнеркәсібі өңірлерінің экологиялық жағдайының биоиндикаторлары ретіндегі өсімдіктердің фенолдық қосылыстары

Аңдатпа. Ауыр металдармен антропогендік ластану Қазақстанның тау-кен өнеркәсібі дамыған өңірлеріндегі ең маңызды экологиялық мәселелердің бірі болып табылады. Бұл жұмыста техногендік әсер жағдайындағы өсімдіктердің фенолдық қосылыстарының мөлшері мен ролі туралы әдеби деректерге талдау жүргізілді. Қазақстанның өнеркәсіптік орталықтары – Риддер, Өскемен, Жезказған, Балқаш және Шымкент қалаларының экологиялық ерекшеліктері қарастырылды. Қорғасын, кадмий, мыс және мырышпен ластану өсімдіктерде тотығу стрессін туындатып, фенолдық қосылыстардың синтезін белсендіретіні көрсетілді. Фенол қышқылдарының, флавоноидтардың, таниндердің және жалпы полифенолдардың мөлшерінің артуы ауыр металдардың әсеріне бейімделу реакциясы екені анықталды. Фенолдық қосылыстарды техногендік ластанудың сезімтал биохимиялық маркерлері және экологиялық биомониторингтің перспективалы құралдары ретінде пайдалану мүмкіндігі негізделді.

Түйінді сөздер: фенолдық қосылыстар, ауыр металдар, биоиндикация, биомониторинг, тотығу стрессі, тау-кен өнеркәсібі өңірлері, техногендік ластану, экологиялық мониторинг.

Plant phenolic compounds as bioindicators of the environmental condition of mining and industrial regions of Kazakhstan under heavy metal pollution

Abstract. Anthropogenic contamination by heavy metals remains one of the most significant environmental problems in the mining and industrial regions of Kazakhstan. This study presents an analysis of literature data on the content and role of plant phenolic compounds under technogenic impact conditions. The environmental characteristics of the industrial centres of Kazakhstan, including Ridder, Ust-Kamenogorsk, Zhezkazgan, Balkhash, and Shymkent, were examined. It was shown that contamination by lead, cadmium, copper, and zinc induces oxidative stress in plants and activates the synthesis of phenolic compounds. An increase in the content of phenolic acids, flavonoids, tannins, and total polyphenols was found to be an adaptive response to heavy metal exposure. The possibility of using phenolic compounds as sensitive biochemical markers of technogenic pollution and promising tools for environmental biomonitoring is substantiated.

Key words: phenolic compounds, heavy metals, bioindication, biomonitoring, oxidative stress, mining-industrial regions, technogenic pollution, environmental monitoring.

Введение

Горнодобывающая и металлургическая промышленность является одной из ведущих отраслей экономики Республики Казахстан, обеспечивающей значительную часть промышленного производства и экспортного потенциала страны. Вместе с тем интенсивная разработка месторождений полезных ископаемых и деятельность металлургических предприятий сопровождаются существенным антропогенным воздействием на окружающую среду, прежде всего на почвенный и растительный покров. Особую экологическую опасность представляет накопление в природных экосистемах тяжелых металлов, включая свинец (*Pb*), кадмий (*Cd*), медь (*Cu*), цинк (*Zn*), никель (*Ni*) и другие токсичные элементы [1, 2].

В Казахстане проблема загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами особенно актуальна для регионов с развитым горнодобывающим и металлургическим комплексом, таких как Восточно-Казахстанская, Карагандинская, Павлодарская и Улытауская области. Многолетняя эксплуатация полиметаллических месторождений, функционирование обогатительных фабрик и металлургических предприятий привели к формированию зон тех-

ногенного загрязнения, характеризующихся повышенным содержанием токсичных элементов в почвах, растительности и поверхностных водах [3, 4].

Тяжелые металлы относятся к числу наиболее опасных загрязнителей окружающей среды вследствие высокой устойчивости в природных условиях, способности к биологическому накоплению и выраженного токсического воздействия на живые организмы. Попадая в растения, они нарушают минеральное питание, подавляют фотосинтетическую активность, изменяют проницаемость клеточных мембран и вызывают избыточное образование активных форм кислорода. В результате развивается окислительный стресс, который рассматривается как один из основных механизмов токсического действия тяжелых металлов на растительный организм [5, 6].

Для противодействия негативному воздействию токсикантов растения формируют сложную систему защитных реакций, включающую активацию антиоксидантных ферментов и синтез низкомолекулярных защитных соединений. Особое место среди них занимают фенольные соединения – многочисленная группа вторичных метаболитов, включающая фенолкарбоновые кислоты, флавоноиды,

дубильные вещества, антоцианы и другие биологически активные компоненты. Современные исследования показывают, что фенольные вещества играют важную роль в нейтрализации активных форм кислорода, хелатировании ионов тяжелых металлов, стабилизации клеточных мембран и регуляции стресс-индуцированных метаболических процессов [7, 8].

Установлено, что воздействие тяжелых металлов активирует фенилпропаноидный путь метаболизма, ключевым ферментом которого является фенилаланинаммияк-лиаза. Усиление активности данного фермента приводит к накоплению различных групп фенольных соединений, обеспечивающих адаптацию растений к неблагоприятным условиям среды. В последние годы фенольные соединения рассматриваются не только как компоненты антиоксидантной системы, но и как важные сигнальные молекулы, участвующие в регуляции экспрессии генов стрессового ответа и формировании механизмов устойчивости растений к техногенным загрязнителям [9, 10, 11].

Особое внимание современных исследований уделяется использованию биохимических показателей растений для экологического мониторинга. В условиях техногенного загрязнения содержание фенольных соединений демонстрирует высокую чувствительность к изменению экологических факторов и коррелирует с уровнем накопления тяжелых металлов в растительных тканях. В связи с этим фенольные соединения рассматриваются как перспективные биомаркеры состояния окружающей среды, позволяющие проводить раннюю диагностику стрессовых воздействий и оценивать степень антропогенной трансформации экосистем.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных влиянию тяжелых металлов на физиолого-биохимические процессы растений, особенности накопления фенольных соединений у древесных пород, произрастающих в условиях техногенного загрязнения Казахстана, остаются недостаточно изученными. В этой связи исследование содержания фенольных соединений в листьях древесных растений, произрастающих в районах горнодобывающей деятельности, представляет научный и практический интерес для оценки экологического состояния территорий и совершенствования методов биоиндикации окружающей среды.

Материалы и методы

Исследование выполнено на основе анализа современных отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных фенольным соединениям растений, экологическим последствиям горнодобывающей деятельности и биомониторингу загрязненных территорий. Проведен сравнительный анализ литературных данных о содержании и биологической роли фенольных соединений в растениях, произрастающих в условиях техногенного воздействия тяжелых металлов.

Для оценки экологического состояния горнопромышленных регионов Казахстана были обобщены сведения о загрязнении окружающей среды свинцом (*Pb*), кадмием (*Cd*), медью (*Cu*) и цинком (*Zn*), а также данные о физи-

олого-биохимических реакциях растений на воздействие данных поллютантов. При анализе использованы результаты исследований в области физиологии растений, экологической биохимии, биоиндикации и экологического мониторинга.

Проведено сравнение крупнейших горнопромышленных регионов Казахстана, характеризующихся различным уровнем техногенной нагрузки и спецификой загрязнения тяжелыми металлами. Особое внимание уделено изменениям фенольного профиля растений как одному из наиболее чувствительных показателей стрессового воздействия загрязнителей.

Теоретической основой исследования послужила концепция биоиндикаторной роли фенольных соединений, согласно которой воздействие тяжелых металлов вызывает развитие окислительного стресса, активацию фенилпропаноидного пути метаболизма и усиление синтеза фенольных соединений. Накопление данных веществ способствует антиоксидантной защите клеток, связыванию токсичных ионов металлов и может рассматриваться в качестве информативного биохимического маркера техногенного загрязнения (рис. 1).

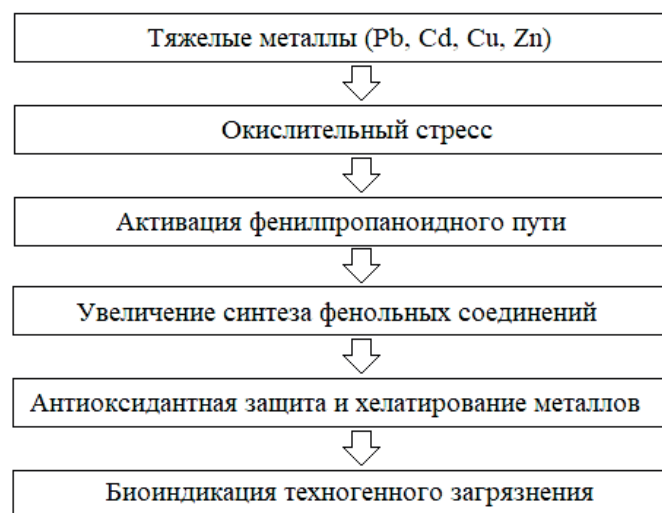


Рис. 1. Биоиндикаторная роль фенольных соединений растений в условиях загрязнения тяжелыми металлами.

Сурет 1. Ауыр металдармен ластану жағдайындағы өсімдіктердің фенолдық қосылыстарының биоиндикаторлық рөлі.

Figure 1. Bioindicator role of plant phenolic compounds under heavy metal pollution.

Для систематизации информации выполнен сравнительный анализ экологического состояния крупнейших горнопромышленных регионов Казахстана (таблица 1).

Таким образом, методологической основой исследования послужил сравнительный анализ литературных данных о реакции растений на загрязнение тяжелыми металлами и оценка возможности использования фенольных соединений в качестве биоиндикаторов экологического состояния горнопромышленных территорий Казахстана.

Таблица 1

Сравнительная характеристика горнопромышленных регионов Казахстана

Кесте 1

Қазақстанның тау-кен өнеркәсібі өңірлерінің салыстырмалы сипаттамасы

Table 1

Comparative characteristics of the mining and industrial regions of Kazakhstan

Регион	Источник загрязнения	Основные металлы	Реакция растений	Роль фенольных соединений
Риддер	Полиметаллические руды	<i>Pb, Zn, Cd, Cu</i>	Окислительный стресс	Рост флавоноидов и фенольных кислот
Усть-Каменогорск	Цветная металлургия	<i>Pb, Cd, Zn, Cu</i>	Накопление металлов	Биохимические маркеры загрязнения
Шымкент	Свинцовое производство	<i>Pb, Cd</i>	Стресс городских экосистем	Рост антиоксидантной активности
Жезказган	Меднорудная промышленность	<i>Cu, Pb, Zn</i>	Нарушение физиологических процессов	Активация синтеза фенолов
Балхаш	Медеплавильное производство	<i>Cu, Zn, Pb, Cd</i>	Техногенная нагрузка	Усиление антиоксидантной защиты

Результаты и обсуждение

Установлено, что в районах добычи и переработки полиметаллических руд наблюдается повышенное накопление *Pb, Cd, Cu* и *Zn* в компонентах экосистем. В ответ на воздействие тяжелых металлов растения активируют фенилпропаноидный путь метаболизма, что приводит к усиленному синтезу фенольных кислот, флавоноидов и других полифенольных соединений. Наиболее выраженные реакции отмечаются в Риддере, Усть-Каменогорске и Шымкенте. Повышение содержания фенольных соединений сопровождается усилением антиоксидантной защиты, стабилизацией клеточных мембран и связыванием токсичных ионов металлов.

Горнопромышленные регионы Казахстана характеризуются различными типами техногенного воздействия, однако общим фактором является накопление тяжелых металлов в почвах и растительности (таблица 2).

Анализ литературных данных показывает, что независимо от химической природы загрязнителя воздействие тяжелых металлов сопровождается развитием окислительного стресса и активацией антиоксидантной системы растений. Одним из наиболее устойчивых проявлений данной реакции является повышение содержания фенольных соединений.

Риддерский промышленный узел является одним из старейших центров добычи полиметаллических руд. Основными загрязнителями являются свинец, цинк, кадмий и медь. Воздействие данных элементов сопровождается развитием выраженного окислительного стресса у растений, что приводит к повышению содержания флавоноидов и фенольных кислот.

Усть-Каменогорск представляет собой крупный центр цветной металлургии, где формируются сложные зоны полиметаллического загрязнения. В растениях наблю-

Таблица 2

Влияние тяжелых металлов на физиолого-биохимические показатели растений

Кесте 2

Ауыр металдардың өсімдіктердің физиологиялық-биохимиялық көрсеткіштеріне әсері

Table 2

Effects of heavy metals on the physiological and biochemical parameters of plants

Тяжелый металл	Основное токсическое действие	Реакция растений	Изменение содержания фенольных соединений
<i>Pb</i> (свинец)	Нарушение фотосинтеза, угнетение роста	Развитие окислительного стресса	Значительное увеличение флавоноидов и фенольных кислот
<i>Cd</i> (кадмий)	Повреждение клеточных мембран	Активация антиоксидантной системы	Повышение содержания полифенолов
<i>Cu</i> (медь)	Усиление образования активных форм кислорода	Активация защитного метаболизма	Увеличение синтеза фенольных соединений
<i>Zn</i> (цинк)	Нарушение ферментативной активности при избытке	Метаболическая адаптация	Рост содержания антиоксидантных фенолов

дается усиление синтеза полифенолов, выполняющих функцию антиоксидантной защиты и связывания токсичных металлов.

Шымкентский промышленный регион отличается преобладанием свинцового загрязнения. Исследования показывают, что в условиях высокой концентрации свинца растения увеличивают содержание фенольных соединений, способствующих снижению токсического воздействия металла на клеточные структуры.

В Жезказганском регионе основным источником техногенной нагрузки является меднорудная промышленность. Воздействие меди приводит к активации фенилпропаноидного пути и накоплению соединений фенольной природы, обеспечивающих защиту от свободнорадикального окисления.

Балхашский промышленный узел характеризуется многолетним влиянием медеплавильного производства. Для местной растительности характерно повышение антиоксидантной активности и накопление полифенольных соединений как ответная реакция на загрязнение почв тяжелыми металлами.

Сравнительный анализ показывает, что независимо от специфики загрязнения растения всех исследуемых регионов демонстрируют сходную биохимическую реакцию, выражающуюся в увеличении содержания фенольных соединений. Это свидетельствует о возможности использования данных показателей в качестве универсальных биомаркеров техногенного стресса.

Научное обоснование фенольных соединений как биоиндикаторов

Фенольные соединения обладают рядом свойств, определяющих их высокую диагностическую ценность. Во-первых, они быстро реагируют на изменение экологических условий. Во-вторых, их синтез непосредственно связан с интенсивностью окислительного стресса. В-третьих, многие фенольные соединения способны образовывать устойчивые комплексы с ионами тяжелых металлов, снижая их токсичность (таблица 3).

Повышение содержания фенольных кислот, флавоноидов и танинов рассматривается как адаптационная реакция растений на загрязнение окружающей среды. При этом степень накопления данных соединений коррелирует с уровнем антропогенной нагрузки, что позволяет использовать их в системах экологического мониторинга и оценки экологического риска.

Полученные данные свидетельствуют о том, что различные группы фенольных соединений выполняют взаимодополняющие функции в обеспечении устойчивости растений к техногенному воздействию. Наибольшую диагностическую ценность представляют флавоноиды и суммарное содержание полифенолов (таблица 4).

Фенольные соединения выполняют двойную функцию: участвуют в физиологической адаптации растений и одновременно отражают уровень экологического стресса. Благодаря высокой чувствительности к загрязнению тяжелыми металлами они могут использоваться в системах биоиндикации.

Таблица 3

Основные функции фенольных соединений в условиях техногенного загрязнения

Кесте 3

Техногендік ластану жағдайындағы фенолдық қосылыстардың негізгі қызметтері

Table 3

Main functions of phenolic compounds under technogenic pollution conditions

Группа фенольных соединений	Биологическая функция	Значение для биоиндикации
Фенольные кислоты	Антиоксидантная защита клеток	Индикаторы окислительного стресса
Флавоноиды	Нейтрализация свободных радикалов	Маркеры устойчивости растений
Танины	Связывание ионов металлов	Показатели адаптации к загрязнению
Полифенолы (суммарное содержание)	Комплексная защита клеток	Интегральный показатель экологического стресса

Таблица 4

Сравнительная оценка методов экологического мониторинга

Кесте 4

Экологиялық мониторинг әдістерінің салыстырмалы бағасы

Table 4

Comparative evaluation of environmental monitoring methods

Критерий оценки	Химический анализ почв	Анализ фенольных соединений растений
Оценка факта загрязнения	Высокая	Высокая
Отражение биологического эффекта загрязнения	Ограниченное	Высокое
Выявление ранних стадий стресса	Низкое	Высокое
Оценка адаптационных реакций растений	Отсутствует	Высокая
Возможность биомониторинга	Средняя	Высокая

В отличие от традиционных методов химического контроля, анализ фенольного профиля позволяет вы-

являть ранние стадии воздействия загрязнителей. Для горнопромышленных территорий Казахстана это особенно важно в связи с длительным накоплением поллютантов и необходимостью разработки эффективных программ экологического мониторинга и рекультивации.

Заключение

Проведенный анализ литературных данных показал, что загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами в горнопромышленных регионах Казахстана сопровождается развитием окислительного стресса и значительными изменениями физиолого-биохимического состояния растений. Одной из наиболее устойчивых адаптационных реакций является усиление синтеза фенольных соединений, включая фенольные кислоты, флавоноиды, танины и другие полифенольные компоненты.

Установлено, что накопление фенольных соединений тесно связано с воздействием свинца, кадмия, меди и цинка и отражает степень техногенной нагрузки на экосистемы. Выполняя антиоксидантные, хелатирующие

и защитные функции, данные вещества способствуют повышению устойчивости растений к загрязнению и одновременно могут служить информативными показателями экологического состояния территорий.

Сравнительный анализ горнопромышленных регионов Казахстана показал сходство биохимических реакций растений независимо от специфики источников загрязнения, что подтверждает универсальность фенольных соединений как маркеров техногенного стресса. В отличие от традиционных методов химического контроля, оценка фенольного профиля растений позволяет выявлять ранние стадии негативного воздействия загрязнителей и отражает биологические последствия загрязнения.

Таким образом, фенольные соединения представляют собой перспективные биохимические индикаторы экологического состояния горнопромышленных регионов Казахстана и могут быть рекомендованы для использования в комплексных системах экологического мониторинга, биоиндикации и оценки экологических рисков на техногенно нарушенных территориях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Растения как эффективные биоиндикаторы для мониторинга загрязнения тяжелыми металлами / A. Cakaj [и др.] // *Environmental Research*. – 2024. – Т. 256. – Ст. 119222 (на английском языке)
2. Asiminicesei D.-M., Fertu D. I., Gavrilescu M. Влияние загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами на метаболический профиль лекарственных растений и их терапевтический потенциал / *Plants*. – 2024. – Т. 13 (6). – Ст. 913 (на английском языке)
3. Sunakbaeva D. K. Экологическая роль фенольных соединений и их вклад в биологическую активность растений // *Wah Academia Journal of Health and Nutrition*. – 2026. – Т. 2. – № 1. – С. 1–4 (на турецком языке)
4. Goncharuk E. A., Zagoskina N. V. Тяжелые металлы, их фитотоксичность и роль фенольных антиоксидантов в стрессовых реакциях растений с акцентом на кадмий: обзор / *Molecules*. – 2023. – Т. 28 (9). – Ст. 3921 (на английском языке)
5. Инокуляция устойчивыми к тяжелым металлам бактериями снижает показатели окислительного стресса у шпината (*Spinacia oleracea* L.) / M. Jamil [и др.] // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Т. 24. – Ст. 221 (на английском языке)
6. Фенольные соединения как природные регуляторы стресс-устойчивости растений: комплексный обзор / N. Saini [и др.] // *Physiological and Molecular Plant Pathology*. – 2024. – Т. 133. – Ст. 102383 (на английском языке)
7. Bhadwal Sh., Sharma S., Singh D. Влияние селена и мышьяка на фенольные соединения и антиоксидантную активность риса (*Oryza sativa* L.) // *Chemosphere*. – 2024. – Т. 350. – Ст. 141071 (на английском языке)
8. Altun H., Orcan P. Реакции риса (*Oryza sativa* L.) на экзогенные элиситоры при свинцовом стрессе // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Т. 24. – Ст. 897 (на английском языке)
9. Био- и фиторемедиация: растения и микроорганизмы для восстановления почв, загрязненных тяжелыми металлами / A. Sánchez-Jiménez [и др.] // *Discover Applied Sciences*. – 2022. – Т. 4. – Ст. 59 (на английском языке)
10. Антиоксидантный ответ травянистых растений различных видов на загрязнение тяжелыми металлами / A. S. Petukhov [и др.] // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. – 2024. – Т. 2. – С. 25–36 (на английском языке)
11. Petruľová V., Bačkorová M. Определение фитохимического качества листьев *Vaccinium vitis-idaea* L. и *Vaccinium myrtillus* L. из загрязненных и незагрязненных районов // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2024. – Т. 196. – Ст. 1135 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Өсімдіктер ауыр металдармен ластануды мониторингтеудің тиімді биоиндикаторлары ретінде / A. Cakaj [және т. б.] // *Environmental Research*. – 2024. – Т. 256. – 119222 (ағылшын тілінде)

2. Asiminicesei D.-M., Fertu D. I., Gavrilesco M. Қоршаған ортаның ауыр металдармен ластануының дәрілік өсімдіктердің метаболикалық профилі мен олардың емдік әлеуетіне әсері // *Plants*. – 2024. – Т. 13 (6). – 913 (ағылшын тілінде)
3. Sunakbaeva D. K. Фенолдық қосылыстардың экологиялық рөлі және олардың өсімдіктердің биологиялық белсенділігіне қосқан үлесі // *Wah Academia Journal of Health and Nutrition*. – 2026. – Т. 2. – № 1. – Б. 1–4 (түрік тілінде)
4. Goncharuk E. A., Zagoskina N. V. Ауыр металдар, олардың фитоуыттылығы және өсімдіктердің стресс жағдайындағы фенолдық антиоксиданттарының рөлі: кадмий мысалындағы шолу // *Molecules*. – 2023. – Т. 28 (9). – 3921 (ағылшын тілінде)
5. Ауыр металдарға төзімді бактерияларды енгізу шпинаттағы (*Spinacia oleracea* L.) ауыр металдар тудырған тотығу стрессінің көрсеткіштерін төмендетті / M. Jamil [және т. б.] // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Т. 24. – 221 (ағылшын тілінде)
6. Фенолдық қосылыстар өсімдіктердегі стрессті төмендететін табиғи факторлар ретінде: кешенді шолу / N. Saini [және т. б.] // *Physiological and Molecular Plant Pathology*. – 2024. – Т. 133. – 102383 (ағылшын тілінде)
7. Bhadwal Sh., Sharma S., Singh D. Селен мен мышьяқтың күріш (*Oryza sativa* L.) құрамындағы фенолдық қосылыстар мен антиоксиданттық белсенділікке әсері // *Chemosphere*. – 2024. – Т. 350. – 41071 (ағылшын тілінде)
8. Altun H., Orcan P. Қорғасынмен стресс жағдайындағы күріштің (*Oryza sativa* L.) экзогендік элиситорларға жауап реакциясы // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Т. 24. – 897 (ағылшын тілінде)
9. Био- және фиторемедиация: ауыр металдармен ластанған топырақты қалпына келтірудегі өсімдіктер мен микроорганизмдер / A. Sánchez-Jiménez [және т. б.] // *Discover Applied Sciences*. – 2022. – Т. 4. – 59 (ағылшын тілінде)
10. Әртүрлі шөптесін өсімдіктердің ауыр металдармен ластанған ортаға антиоксиданттық жауабы / A. S. Petukhov [және т. б.] // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. – 2024. – Т. 2. – Б. 25–36 (ағылшын тілінде)
11. Petruřová V., Bařkorová M. Ластанған және ластанбаған аймақтардан жиналған *Vaccinium vitis-idaea* L. және *Vaccinium myrtillus* L. жапырақтарының фитохимиялық сапасын анықтау // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2024. – Т. 196. – 1135 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. *Plants as effective bioindicators for heavy metal pollution monitoring* / A. Cakaj et al. // *Environmental Research*. – 2024. – Vol. 256. – Article 119222 (in English)
2. Asiminicesei D.-M., Fertu D. I., Gavrilesco M. Impact of Heavy Metal Pollution in the Environment on the Metabolic Profile of Medicinal Plants and Their Therapeutic Potential // *Plants*. – 2024. – Vol. 13 (6). – Article 913 (in English)
3. Sunakbaeva D. K. Ecological Roles of Phenolic Compounds and Their Contribution to the Biological Activities of Plants // *Wah Academia Journal of Health and Nutrition*. – 2026. – P. 1 – 4 (in Turkish)
4. Goncharuk E. A., Zagoskina N. V. Heavy Metals, Their Phytotoxicity, and the Role of Phenolic Antioxidants in Plant Stress Responses with Focus on Cadmium: Review // *Molecules*. – 2023. – Vol. 28 (9). – Article 3921 (in English)
5. Inoculation of heavy metal resistant bacteria alleviated heavy metal-induced oxidative stress biomarkers in spinach (*Spinacia oleracea* L.) / M. Jamil et al. // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Vol. 24. – Article 221 (in English)
6. Exploring phenolic compounds as natural stress alleviators in plants- a comprehensive review / N. Saini et al. // *Physiological and Molecular Plant Pathology*. – 2024. – Vol. 133. – Article 102383 (in English)
7. Bhadwal Sh., Sharma S., Singh D. Interactive effects of selenium and arsenic on phenolic constituents and antioxidant activity in rice (*Oryza sativa* L.) // *Chemosphere*. – 2024. – Vol. 350. – Article 141071 (in English)
8. Altun H., Orcan P. Responses to exogenous elicitor treatment in lead-stressed *Oryza sativa* L. // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Vol. 24. – Article 897 (in English)
9. Bio- and phytoremediation: Plants and microbes to the rescue of heavy metal polluted soils / A. Sánchez-Jiménez et al. // *Discover Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 4. – Article 59 (in English)
10. Antioxidative response of herbs of various species to heavy metal environmental pollution / A. S. Petukhov et al. // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. – 2024. – Vol. 2. – P. 25–36 (in English)
11. Petruřová V., Bařkorová M. Determination of phytochemical quality of leaves *Vaccinium vitis-idaea* L. and *Vaccinium myrtillus* L. from the polluted and non-polluted areas // *Environ Monit Assess*. – 2024. – Vol. 196. – Article 1135 (in English)

Сведения об авторах:

Айтекова К. У., к. т. н., ассистент профессора, Международный Таразский университет им. Шерхана Муртазы (г. Тараз, Казахстан), Aytekova1972@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8439-944X>

Сунакбаева Д. К., к. т. н., Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан), 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; <https://orcid.org/0000-0001-9342-7502>

Сарбаева К. Т., к. х. н., Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан), karlyga.sarbayeva@ayu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-1150-1620>

Авторлар туралы мәліметтер:

Айтекова К. У., т. ғ. к., профессордың ассистенті, Шерхан Мұртаза атындағы Халықаралық Тараз университеті (Тараз қ., Қазақстан)

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)

Сарбаева К. Т., х. ғ. к., Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Aitekova K. U., candidate of technical sciences, assistant professor, Sherkhan Murtaza International Taraz University (Taraz, Kazakhstan)

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)

Sarbayeva K. T., candidate of Chemical Sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan)

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ И УСЛОВИЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ в редакцию периодического печатного издания «Горный журнал Казахстана»

1. «Горный журнал Казахстана» принимает к публикации оригинальные статьи научного и научно-технического содержания, отражающие результаты исследовательской и научной деятельности, имеющие рекомендации к практическому применению решаемых вопросов, а также статьи обзорного характера, отвечающие критериям первичной научной публикации (полный перечень рубрик указан на сайте *minmag.kz*).

2. Основные требования к статьям, представленным для публикации в журнале:

- набор статьи производится в текстовом редакторе Word шрифтом Times New Roman 12 кеглем с полуторным интервалом;
- общий объем статьи, включая рисунки, таблицы, метаданные не должен превышать 8 печатных страниц;
- статьи (за исключением обзоров), должны содержать новые научные результаты;
- статья должна соответствовать тематике (см. п. 1), научному уровню журнала;
- статья должна быть оформлена в полном соответствии с требованиями, отраженными в п. 3;
- статья может быть представлена на казахском, русском или английском языке;
- в редакцию представляется окончательный, **тщательно выверенный вариант** статьи, исключающий необходимость постоянных доработок текста на этапах издательского процесса;
- перед отправкой статьи в редакцию журнала авторам необходимо проверить текст на предмет отсутствия плагиата.

3. Структура статьи должна содержать следующие разделы:

- код МРНТИ (ГРНТИ <http://grnti.ru/?p1=52>) – шестизначный;
- название статьи (сокращения не допускаются, не допускается использование аббревиатур и формул; максимальное количество слов 10-12) должно быть информативным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы, предоставляется на казахском, русском и английском языках;
 - инициалы и фамилии авторов; статья должна иметь не более 4 авторов; знаком «*» указывается автор-корреспондент;
 - сведения о каждом авторе (ученая степень, ученое звание, должность, место основной работы, город, страна, контактные данные (адрес электронной почты), ORCID ID) предоставляются на казахском, русском и английском языках;
 - полное название организации (-й), где работают авторы (с указанием ведомственной принадлежности);
 - аннотация в соответствии с требованиями международных баз данных должна достаточно полно раскрывать содержание статьи, включая характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению материалами. Аннотация предоставляется на казахском, русском и английском языках объемом не менее 700 и не более 900 символов;
 - ключевые слова в количестве 6...10 устойчивых словосочетаний, по которым в дальнейшем будет выполняться поиск статьи (сокращения и аббревиатуры не допускаются): ключевые слова отражают специфику темы, объект и результаты исследования и предоставляются на казахском, русском и английском языках;
 - текст статьи, содержащий следующие разделы (введение, методы/исследования, результаты, обсуждение результатов, заключение/ выводы);
 - список использованных источников (10...12), в том числе не менее 3 зарубежных не ранее 2015 года, предоставляется на казахском, русском и английском языках.

РИСУНКИ должны иметь расширение графических редакторов CorelDraw, Photoshop, Illustrator и т. п.). Фотографии должны быть предельно четкими в графическом формате (TIFF, JPEG, CDR) с разрешением не менее 300 dpi. Все буквенные и цифровые обозначения на рисунках необходимо пояснить в основном или подрисуночном текстах. Надписи и другие обозначения на графиках и рисунках должны быть четкими и легко читаемыми. **ПОДПИСИ К РИСУНКАМ и ЗАГОЛОВКИ ТАБЛИЦ ОБЯЗАТЕЛЬНЫ.** Оформляются отдельным блоком на казахском, русском и английском языках.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ следует набирать в формульном редакторе MathTypes Equation или MS Equation, греческие и русские буквы в формулах набирать прямым шрифтом (опция текст), латинские – курсивом. **Обозначения величин и простые формулы в тексте и таблицах набирать как элементы текста** (а не как объекты формульного редактора). Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в последующем изложении. Нумерация формул сквозная.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ составляется в порядке цитирования и оформляется в строгом соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008. Ссылки на литературу в тексте отмечаются по мере их появления порядковыми номерами в квадратных скобках. Список приводится на казахском, русском и английском языках с указанием в скобках оригинала публикации. Образец оформления литературы и транслитерации размещен на сайте *minmag.kz*.

4. Условия приобретения журналов авторами.

С автором(ами) заключается договор о приобретении 10 (десяти) экземпляров журнала согласно установленным расценкам на текущий год, которые он(они) имеют право распространять среди горной общественности. После оплаты статья публикуется в номере журнала согласно очередности.