



EKTU JOURNAL OF
ENGINEERING
SCIENCES



EKTU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

№ 1, 2026

ISSN (Print): 3134-8009
ISSN (Online): 3134-8017

1-том, 1-нөмір, наурыз, 2026.
Том 1, № 1, март 2026.
Vol. 1, Issue 1, March 2026.

EKTU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES



Жылына 4 рет шығады
Выходит 4 раза в год
Published 4 times a year

Өскемен, 2026
Усть-Каменогорск, 2026
Ust-Kamenogorsk, 2026

Бас редакторы
Ғабдысәліқ Риза, PhD

Редакция алқасы:

Бас редактордың орынбасары:
Тоғұзова М.М., PhD

Редакциялық алқа мүшелері:

Войчик Вольдемар, т.ғ.д. (Польша)
Выжва С.А., г.ғ.д., профессор (Украина)
Мамяченков С.В., т.ғ.д., профессор (Ресей)
Стрычек Ярослав, профессор, доктор Хаб. (Польша)
Чарыков Н.А., х.ғ.д., профессор (Ресей)
Логанина В.И., т.ғ.д., профессор (Ресей)
Крак Ю.В., т.ғ.д., профессор (Украина)
Бессмертный И.А., т.ғ.д., профессор (Ресей)
Бакыт Ғ.Б., PhD, қауымд. проф. (Қазақстан)
Әбішев Қ.Қ., PhD, қауымд. проф. (Қазақстан)
Төлебекова Ә.С., PhD, профессор (Қазақстан)
Суреш Алапати, PhD, профессор (Корея)

Главный редактор

Ғабдысалық Риза, PhD

Редакционная коллегия:

Заместитель главного редактора:

Тогузова М.М., PhD

Члены редакционной коллегии:

Войчик Вольдемар, д.т.н. (Польша)

Выжва С.А., д.г.н., профессор (Украина)

Мамяченков С.В., д.т.н., профессор (Россия)

Стрычек Ярослав, профессор, доктор Хаб. (Польша)

Чарыков Н.А., д.х.н., профессор (Россия)

Логанина В.И., д.т.н., профессор (Россия)

Крак Ю.В., д.т.н., профессор (Украина)

Бессмертный И.А., д.т.н., профессор (Россия)

Бакыт Ғ.Б., PhD, ассоц. проф. (Қазақстан)

Абишев Қ.Қ., к.т.н., ассоц. проф. (Қазақстан)

Тулбекова А.С., PhD, профессор (Қазақстан)

Суреш Алапати, PhD, профессор (Корея)

Editor-in-Chief

Riza Gabdyssalyk, PhD

Editorial Board:

Deputy Editor-in-Chief
Marzhan Toguzova, PhD

Editorial Board Members:






Wojcik Voldemar, Doctor of Technical Sciences, Professor (Poland)
Sergey Vyzhva, Doctor of Geological Sciences, Professor (Ukraine)
Sergey Mamyachenkov, Professor, Doctor of Technical Sciences (Russia)
Strychek Yaroslav, Professor, Dr. Hub. (Poland)
Nikolay Charykov, Doctor of Chemical Sciences, Professor (Russia)
Valentina Loganina, Professor, Doctor of Technical Sciences (Russia)
Yuri Krak, Professor, Doctor of Technical Sciences (Ukraine)
Igor Bessmertny, Professor, Doctor of Technical Sciences (Russia)
Bakyt Gabit, PhD, Associate Professor (Kazakhstan)
Kairatolla Abishev, PhD, Associate Professor (Kazakhstan)
Asel Tulebekova, PhD, Professor (Kazakhstan)
Suresh Alapati, Professor, PhD (Korea)

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_1
MPNТИ 68.29.17

ЗЕМЛИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ МАҚСАТЫНДАҒЫ ЖЕРЛЕР: ТЕНДЕНЦИЯЛАР МЕН ПЕРСПЕКТИВАЛАР

AGRICULTURAL LAND: TRENDS AND PROSPECTS

Б.Ж. Ахметов ^{1*}, Ф.А. Шуленбаева ¹, А.С. Кульмаганбетова ¹,
Т.Т. Жагипарова ¹, М.Х. Жанбусинова ¹

¹Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан

*Автор-корреспондент: Ахметов Болат Жумагалиевич, e-mail: zunami89@mail.ru

Ключевые слова:

земельный фонд,
структура угодий,
земельные отношения,
государственное
регулирование,
антропогенное
воздействие,
эрозия почв.

АННОТАЦИЯ

В научной статье рассмотрены современные тенденции и перспективы развития земель сельскохозяйственного назначения. Актуальность темы исследования обусловлена приоритетными задачами государства по рациональному использованию земель аграрного сектора экономики и предотвращению антропогенного влияния на деградацию почв в сельскохозяйственном производстве. Цель научной статьи – изучить состояние ресурсного потенциала земель сельскохозяйственного назначения, выявить основные факторы, влияющие на его развитие в перспективе. В ходе изучения проблем использовались статистические методы анализа количественных и качественных показателей ресурсного потенциала земельных угодий в сельском хозяйстве. Применены методы группировки и анализа данных по сводным отчетам, представленным структурными органами управления земельными ресурсами страны, по материалам законодательных и нормативных актов. Монографический метод использован при изучении теоретических источников по проблемам темы. Выявлено, что законы и нормативы, принятые на уровне государства, являются основными факторами влияния на развитие земельных отношений в сельском хозяйстве на современном этапе перехода от общественной собственности на земельные ресурсы к государственной и частной собственности. Определено, что фактором, снижающим интенсивность использования земельных ресурсов, является антропогенная деятельность, которая приносит экономический и экологический ущерб сельскому хозяйству. К деградации почвы на земельных угодьях приводят изменения климата, колебания атмосферы, наводнения, засуха, ветровая эрозия. В результате исследований выявлено, что для рационального использования природных ресурсов сельскохозяйственного производства, преодоления деградации земель необходимо системное государственное регулирование земельных отношений. Даны практические рекомендации на перспективу.



Түйінді сөздер:

жер қоры,
жердің құрылымы,
жер қатынастары,
мемлекеттік реттеу,
антропогендік әсер,
топырақ эрозиясы.

ТҮЙІНДЕМЕ

Ғылыми мақалада ауылшаруашылығы жерлерін дамытудың қазіргі тенденцияларымен перспективалары қарастырылған. Зерттеу тақырыбының өзектілігі мемлекеттің экономиканың аграрлық секторында жерді ұтымды пайдалану және ауылшаруашылығы өндірісінде топырақтың деградациясына антропогендік әсер етудің алдын алу бойынша бірінші кезектегі міндеттерімен түсіндіріледі. Ғылыми мақаланың мақсаты – ауылшаруашылығы жерлерінің ресурстық әлеуетінің жағдайын зерттеу, оның болашақта дамуына әсер ететін негізгі факторларды анықтау. Проблемаларды зерттеу барысында ауылшаруашылығындағы жердің ресурстық әлеуетінің сандық және сапалық көрсеткіштерін талдау үшін статистикалық әдістер қолданылды. Заңнамалық және нормативтік-құқықтық актілердің материалдары негізінде еліміздегі жерге орналастырудың құрылымды қорғандары ұсынған жиынтық есептердің негізінде деректерді топтау және талдау әдістері қолданылды. Тақырып мәселелері бойынша теориялық дереккөздерді зерттеуде монографиялық әдіс қолданылды. Жер ресурстарына қоғамдық меншіктен мемлекеттік және жеке меншікке өтудің қазіргі кезеңінде ауылшаруашылығында жер қатынастарының дамуына әсер ететін негізгі фактор мемлекеттік деңгейде қабылданған заңдармен нормативтік-құқықтық актілер екені анықталды. Жер ресурстарын пайдаланудың қарқындылығын төмендететін фактор ауылшаруашылығына экономикалық және экологиялық зиян келтіретін антропогендік әрекетекені анықталды. Құрлықтағы топырақтың деградациясына климаттың өзгеруі, атмосфералық ауытқулар, сутасқыны, құрғақшылық және жел эрозиясы ықпал етеді. Зерттеу нәтижесінде ауылшаруашылығы өндірісінде табиғи ресурстарды ұтымды пайдалану және жердің тозуын еңсеру үшін жер қатынастарын жүйелі мемлекеттік реттеу қажет екені анықталды. Болашаққа практикалық ұсыныстар беріледі.

Keywords:

land fund, structure of
lands, land relations, state
regulation, anthropogenic
impact, soil erosion.

ABSTRACT

The scientific article examines modern trends and prospects for the development of agricultural lands. The relevance of the research topic is due to the priority tasks of the state for the rational use of lands in the agricultural sector of the economy and the prevention of anthropogenic impact on soil degradation in agricultural production. The purpose of the scientific article is to study the state of the resource potential of agricultural lands, to identify the main factors influencing its development in the future. In the course of studying the problems, statistical methods of analysis of quantitative and qualitative indicators of the resource potential of agricultural lands were used. The methods of grouping and analyzing data from summary reports submitted by the structural bodies of land management of the country, based on materials of legislative and regulatory acts were applied. The monographic method was used in studying theoretical sources on the problems of the topic. It has been revealed that laws and regulations adopted at the state level are the main factor influencing the development of land relations in agriculture, at the current stage of transition from public ownership of land resources to state and private ownership. It has been determined that the factor reducing the intensity of land resource use is anthropogenic activity, which causes economic and environmental damage to agriculture. Soil degradation on lands is facilitated by climate change, atmospheric fluctuations, floods, drought, wind erosion. The research revealed that for the rational

use of natural resources of agricultural production, overcoming land degradation, systemic state regulation of land relations is necessary. Practical recommendations for the future are given.

ВВЕДЕНИЕ

Целью исследования является изучение современного состояния земельных ресурсов сельскохозяйственного назначения. Для достижения цели необходимо решение следующих вопросов: анализ ресурсного потенциала на современном этапе, выявление основных тенденций и определение факторов, которые формируют основные изменения в структуре и развитии земельных отношений в стране. Основное внимание уделено землям сельскохозяйственного назначения, используемым товаропроизводителями для производства товаров и продуктов.

Выбор темы исследования по изучению проблем формирования и развития земельных отношений в сельскохозяйственном производстве является актуальным в связи с тем, что в стратегических планах агропромышленного комплекса приоритетным выступает решение вопросов вовлечения земель сельскохозяйственного назначения в рыночный оборот (Постановление, 2021). Решение задач аграрной политики государства требует научно обоснованных и методических обоснований и обсуждений, что подтверждает актуальность темы исследования в научной статье.

Основные направления аграрной политики государства потребовали эффективного решения социально-экономических проблем общества, в которых земельные ресурсы выступают в роли производственного потенциала. Особенно важна роль земли в сельском хозяйстве. На землях сельскохозяйственного назначения производится продукция различных отраслей - растениеводства, животноводства, переработки, готовых товаров как для потребления обществом в виде питательных веществ, так и для промышленности в виде сырья. Уровень сельскохозяйственного производства определяется формированием земельных отношений, построенных на установленных нормах и законах взаимодействия между гражданами и юридическими лицами, государственными органами. Содержание и внутренние движущие силы формирования земельных отношений направлены на рациональное и целевое использование земельных участков в зависимости от их расположения на территории региона.

Теоретические основы формирования земельных отношений в условиях рынка глубоко разработаны учеными дальних и ближних зарубежных стран, а также отечественными экспертами в этой научной области. В то же время изучение теоретических и методологических основ научных теорий и концепций ученых-экономистов по вопросам рационального использования земель сельскохозяйственного назначения показало, что с появлением собственности на сельскохозяйственные земли в условиях перехода к рыночным отношениям хозяйствования появились проблемы, требующие дальнейшего изучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В научной статье применялись статистические методы исследования, методы группировки показателей, метод анализа данных. При написании научной статьи использовались материалы сводных аналитических отчетов Комитета по управлению земельными ресурсами Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан, нормативные документы земельных законов, информация бюллетеней, научные публикации и монографии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наличие обширных земельных территорий в Казахстане, на которых преобладают

сельскохозяйственные угодья, используемые для производства продукции и товаров, обеспечивающих жизнедеятельность страны, требует рассмотрения вопросов рационального их использования. В этой связи изучение вопросов повышения экономической эффективности в организации земельных отношений на селе является актуальным.

Огромные территориальные масштабы земельных ресурсов нуждаются в защите и грамотном их использовании. Нельзя допускать ошибок в освоении земель и затем переходить на другие территории, необходимо проводить эффективную политику освоения сельскохозяйственных угодий с учетом запросов местного населения, повышать культуру земледелия регионов, преодолевать проблемы сезонной безработицы на селе, развивать социальную инфраструктуру, туризм и многое другое, проводить востребованную обществом современную аграрную политику государства (Маланьина, 2020).

Отчет Комитета по управлению земельными ресурсами (КУЗР) Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан свидетельствует о том, что общий земельный фонд 272,5 млн га, в том числе используемый государством, составляет 262 930,8 тыс. га. К категории с целевым назначением – земли сельскохозяйственного назначения - относится площадь 116,5 млн га, которая занимает 44,3 % в общей структуре используемого земельного фонда страны. Земли сельскохозяйственного назначения находятся под государственным правовым режимом, который предусматривает ограничения по изъятию и охране, нормативно закреплены условия по сохранению и повышению плодородных свойств почвы (Земельный кодекс, 2003). Показатели сельскохозяйственных угодий представлены в табл. 1.

По данным таблицы 1, в состав пастбищ площадью 82816,6 тыс. га входят улучшенные – 3954,0 тыс. га, и обводненные – 48463,0 тыс. га. На втором месте по размеру площадей находится пашня – 26526,1 тыс. га, эти земли являются наиболее продуктивными и представляют ресурсный потенциал аграрного сектора экономики. Сенокосы занимают 2363,5 тыс. га, в их состав входят улучшенные – 15,4 тыс. га и площади лиманного орошения – 327,5 тыс. га. Залежь составляет 1865,0 тыс. га, многолетние насаждения находятся на площади 61,8 тыс. га.

Таблица 1. Площади сельскохозяйственных угодий
на 1 ноября 2023 года по Казахстану

Наименование угодий	Площадь, всего, тыс. га	Из них на землях сельскохозяйственного назначения, тыс. га	%
Сельскохозяйственные угодья	213 647,5	113 629,0	53,2
из них:			
Пашня, всего	27 089,3	26 526,1	97,9
в том числе: орошаемая	1 815,7	1 660,5	91,5
Многолетние насаждения	148,0	61,8	41,8
Залежь	3 492,5	1 865,0	53,4
Сенокосы, всего	4 886,3	2 363,5	48,4
в том числе:			
улучшенные	41,0	15,4	37,6
лиманного орошения	706,0	327,5	46,4
Пастбища, всего	178 031,4	82 812,6	46,5
в том числе:			
улучшенные	5 679,5	3 954,0	69,6
обводненные	103 748,4	48 463,0	46,7
Несельскохозяйственные угодья	49 283,3	2 818,8	5,7
Итого	262 930,8	116 447,8	44,3
<i>Примечание – составлено авторами на основе (КУЗР, 2023)</i>			

Более половины земель, пригодных для сельскохозяйственного производства, расположены в Северном Казахстане (рис. 1). Это ведущие регионы зернового производства агропромышленного комплекса страны, в которых сосредоточены 65,2% площади пашни. С 2000 по 2023 годы площадь пашни по стране увеличилась на 5,7 млн га за счет освоения оставленных в залежи земель, имеющих качественный состав почвы, с высоким уровнем плодородия.



Рисунок 1. Удельный вес земель сельскохозяйственного назначения в земельных фондах областей, %

Примечание – составлено авторами на основе (КУЗР, 2023)

Тенденции и перспективы земель сельскохозяйственного назначения формируются под воздействием множества факторов: правовых, экономических, экологических, социально-демографических и пр. Рассмотрим из них два направления: правовые, обусловленные государственным регулированием земельных отношений в сельском хозяйстве, и факторы, отражающие экологическое состояние земель, формирующееся антропогенным воздействием.

Земли сельскохозяйственного назначения являются составной частью земельного фонда государства, регулирование земельных отношений относится к административному процессу, потому что распределением земли занимается государство. Законы и нормы, установленные на государственном уровне, регулируют права и действия землепользователей. В настоящее время определяющее значение в регулировании земельных отношений в сельском хозяйстве имеет правовой фактор.

В обществе возникает множество споров и суждений о том, в чьих интересах наиболее эффективно должны регулироваться земельные отношения в сельском хозяйстве (Абдикадирова, 2013). Определено, что целевые интересы по землям формируются, во-первых, у государства, в рамках рационального использования стратегических ресурсов; во-вторых, у тех людей, которые проживают в сельской местности; в-третьих, у инвесторов, желающих выгодно вложить собственный капитал (Алпацкая, 2013).

Стремительные процессы психологического преобразования человечества за последние годы привели к пониманию им того, что использование в сельскохозяйственном производстве природного материала, которыми являются земли сельскохозяйственного назначения, ведет к разрушению окружающей среды, нарушению экологического комфорта, к деградации гумуса почвы, снижению уровня жизнеспособности населения. В общественных кругах европейских стран популярны антропоцентричные идеи о том, что

нужно считаться с мнением каждого человека, поэтому необходимо поддерживать значение и функции регулирования земельных отношений в сельском хозяйстве с учетом интересов местных жителей, проживающих на сельской территории. Такой подход к регулированию земельных отношений будет идеальным при том условии, что сельское население обладает высокой гражданской культурой и заинтересовано в благополучии не только своем, но и всей страны, что сложно получить в реальности на данном этапе. В отношении инвесторов ясно одно, что их интересами движут вопросы прибыли, что ведет к сокращению затрат на сельскохозяйственное производство, что, возможно, тоже будет иметь нежелательные последствия (Чирков, Гармаш, 2021).

В связи с этим наиболее оптимальным решением вопроса является государственное регулирование земельных отношений в сельском хозяйстве, где учитываются интересы страны, а не конкретного субъекта земельного рынка (Ковязин, 2022). Спецификой земель сельскохозяйственного назначения в Казахстане является введение на уровне закона временной отмены продажи в частную собственность. Использование земель сельскохозяйственного назначения проводится на основе арендных отношений (Акимов, 2021). Право на землепользование предоставляется государством в результате конкурсных аукционов и торгов, проводимых акиматами регионов.

Считаем, что при выборе подходов по осуществлению регулирования земельных отношений на селе стоит придерживаться среднего. Государственное регулирование должно осуществляться на основе соблюдения правовых интересов субъектов рынка земель сельскохозяйственного назначения с максимальной выгодой использования территории (Липски, 2023). В таком случае ответственность за выбор правительства, которое будет заниматься земельными проблемами с учетом интересов страны, ложится на самих граждан (Алакоз, 2024). В то же время стоит пересмотреть политику относительно иностранных инвестиций и позволить инвесторам вкладываться в развитие земель сельскохозяйственного назначения с учетом ограничений. «Крайне важная задача – привлечение инвестиций в агропромышленный комплекс, земля – это ключевой элемент инвестиционной привлекательности отрасли», - подчеркнул в своем Послании народу Казахстана Глава государства (Послание Президента РК, 2024).

Приоритетной задачей аграрной политики государства является предотвращение отрицательных воздействий антропогенной деятельности на сельское хозяйство - второго фактора, рассматриваемого в научной статье, который отражает экологическое состояние земель сельскохозяйственного назначения.

Антропогенные процессы промышленного производства приводят к нарушению производственной функции земли в сельском хозяйстве в процессе выполняемых действий механического содержания. Территория нашей страны имеет многообразие полезных ископаемых, используемых человеком. Для их применения в жизни общества проводятся технические разработки, добыча в форме карьеров и шахт, в результате остаются большие территории нарушенных земель, покрытые химическими и техническими отходами промышленного производства, которые снижают их пригодность в сельском хозяйстве. В результате попадания в почву технических и химических отходов промышленного производства земельные ресурсы теряют качество плодородного почвенного покрова. При возделывании на этой территории сельскохозяйственных культур их урожайность не достигает высокого уровня, а качество производимой продукции становится низким. Эти земельные территории теряют экономический эффект сельскохозяйственного производства как для отрасли растениеводства, так и для животноводства.

Анализ воздействия антропогенных процессов промышленного производства показывает, что в 2006 году площадь нарушенных земель составила 99,4 тыс. га, в 2013 году их насчитывалось 247, 2 тыс. га, т.е. в 2,5 раза больше. В число основных категорий,

составляющих площади нарушенных земель, входят территории, занятые промышленностью, транспортом, связью, площади, которые используются для нужд космической деятельности и обороны (Спектор, 2016). В конце 2022 года в республике наблюдается незначительное снижение площади нарушенных земель на 0,4% по отношению к 2013 году, представленное в динамике (табл. 2).

Таблица 2. Динамика изменений площади нарушенных земель

Наименование показателей	годы		изменения, % в 2022 к 2013
	2013	2022	
Нарушенные земли, тыс. га	245,2	246,3	- 0,4
Число предприятий и организаций, имеющих нарушенные земли	3253	2888	- 11

Примечание – составлено авторами на основе (КУЗР, 2022)

Данные таблицы 2 показывают, что в результате проводимых государственных программ преодоления деградации земельных ресурсов количество предприятий и организаций, которые имели нарушенные земли к 2022 году, по отношению к их численности в 2013 году снизилось на 11 %. Несмотря на это, ситуация с промышленными отходами, в том числе с техногенными минеральными образованиями (ТМО), остается неудовлетворительной. К настоящему времени в стране учтено 775 объектов ТМО, в которых накоплено порядка 34 млрд тонн, при этом наблюдается тенденция их ежегодного роста (КУЗР, 2022).

В сложившейся ситуации рекультивация разрушенных земель является одной из государственных задач. На законодательном уровне Министерством сельского хозяйства в 2017 году разработаны процедуры организации проектов рекультивации, которые являются государственной услугой. Цель проектов осуществляется специалистами из разных областей, подготавливается документация, составляются рабочие этапы выполнения, планируется бюджет затрат.

Организация проекта рекультивации нарушенных земель, находящихся в составе земельного участка, предоставленного исполнительным органом области, осуществляется уполномоченным органом по земельным отношениям области. В городе Астане организация проекта рекультивации осуществляется уполномоченным органом по земельным отношениям города по месту расположения нарушенных земель. Рекультивация нарушенных земель, восстановление деградированных земельных угодий проводятся с использованием почвы, снятой при проведении горнодобывающих, геологоразведочных, строительных работ путем ее нанесения на малопродуктивные участки или участки без почвенного покрова (Проект рекультивации земель, 2023).

Увеличивается доля антропогенного загрязнения плодородной почвы в результате потери контроля за внесением удобрений и гербицидов при производстве сельскохозяйственных культур. Для оптимального внесения удобрений и гербицидов необходимы агрохимические обследования посевных площадей, результаты анализа которых отражены в картах плодородия почвы, где показаны участки поля, требующие дополнительных действующих веществ. Недостатки финансирования сельскохозяйственных производителей, экономия затрат на производство, вызванная инфляционными процессами в экономике страны, приводят к тому, что в основном агрохимические исследования плодородного слоя поля не производятся. Внесение действующих веществ сплошным способом, без учета потребности поля, приводит к накоплению избыточного количества удобрений на одних и недостатку их количества на других участках поля.

Нарушение технологии ведения сельскохозяйственного производства также приводит к сокращению запасов органических веществ в почве. Загрязненная почва разрушает окружающую среду, негативно влияет на все формы жизни. Через почву загрязнители попадают в грунтовые воды, накапливаются в растениях при их поливе, передаются сельскохозяйственным животным, которые питаются на загрязненных пастбищах, и через сельскохозяйственные продукты попадают в пищу человека, вызывая хронические заболевания (КУЗР, 2022).

Деградация земель сельскохозяйственного назначения увеличивается под влиянием климатических изменений природы. Наша планета создана и развивается под воздействием галактических изменений космического пространства, подчинена законом физики и математики, непредсказуемые явления природы хаотичны и неравномерны. Планета испытывает техногенные изменения, которые влияют на климатический баланс окружающей среды. Колебания температуры, ветровые эрозии, водные эрозии при наводнениях и подтоплениях, засуха, разрушения покрытия земли, - все эти климатические тенденции в совокупности с антропогенной деятельностью человека в промышленности и в сельском хозяйстве оказывают огромное влияние на интенсивность использования земель сельскохозяйственного назначения. Климатические изменения биосферы разрушают качественный состав гумуса, существенно снижают плодородие почвы на землях сельского хозяйства, являющихся средством производства товаров, продуктов, сырья и многого другого для существования и развития общества.

Экономический, экологический, социальный ущерб общества в результате воздействия климатических изменений в природе характеризуется количеством 90 млн га эродированных и опасных земель, где эродированные земли составляют 29,3 млн га по нашей стране. Удельный вес эродированных площадей от общей площади сельхозугодий по областям представлен на рис. 2.

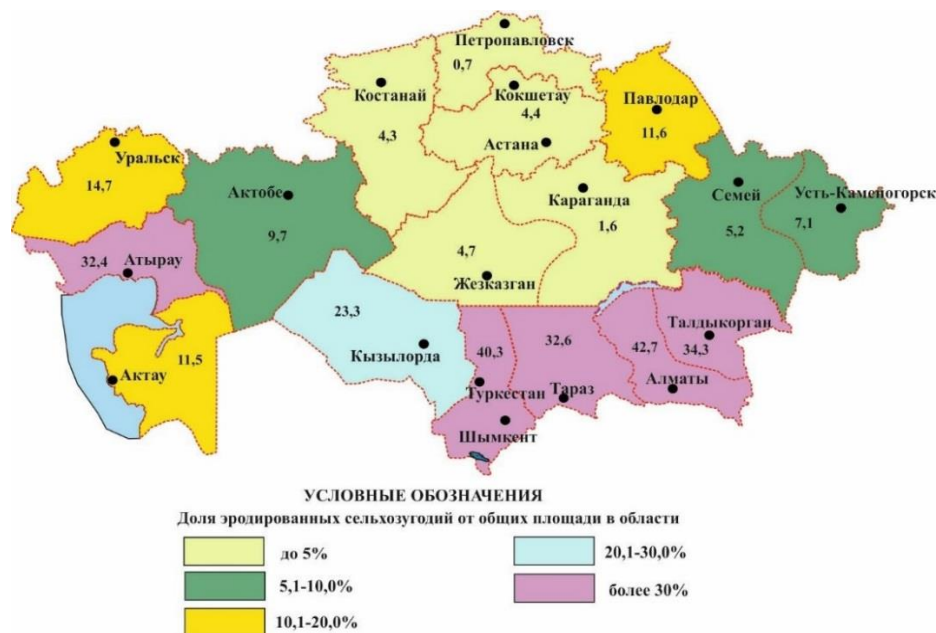


Рисунок 2. Эродированность сельскохозяйственных угодий

Примечание – составлено авторами на основе (КУЗР, 2023)

Анализ рисунка 2 показывает, что области Северного Казахстана имеют наименьший удельный вес эродированных площадей сельскохозяйственных угодий – до 5 % в общем

фонде, до 30 % сельскохозяйственных угодий в Алматинской, Атырауской, Туркестанской и Жетысуской областях.

В настоящее время существует проблема утилизации пестицидов, у которых истек срок использования и которые хранятся в ветхих непригодных складах. Десять процентов из них – это стойкие органические загрязнители. В стране проведена инвентаризация 20 процентов непригодных пестицидов; не утилизируемые ядохимикаты и тара представляют опасность для здоровья людей (КУЗР, 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение современных тенденций земель сельскохозяйственного назначения на основе анализа количественных изменений ресурсов в разрезе областей, исследование процессов государственного регулирования, оказывающих влияние на развитие земельных отношений в сельском хозяйстве, анализ тенденций качественного потенциала плодородной почвы в результате антропогенного воздействия позволяют сделать следующие заключения и выводы по их развитию на перспективу:

1. Государственная регистрация и учет состояния и использования земель сельскохозяйственного назначения проводятся подразделениями МСХ и КУЗР Казахстана. По результатам аналитического анализа за 2023 год выявлено, что категория земель с целевым назначением – земли сельскохозяйственного назначения – занимают площадь 116,5 млн га, что составляет 44,3 % в общей структуре используемого земельного фонда страны, которые являются активным ресурсным потенциалом аграрного сектора экономики. Наибольшую площадь в них занимают пастбища – 82812,6 тыс. га и пашня – 26526,1 тыс. га, требующие их эффективного использования в перспективе.

2. На перспективное развитие земельных отношений в сельском хозяйстве непосредственное влияние оказывает государственное регулирование через законодательные акты и постановления правительства. Для рационального использования земель сельскохозяйственного назначения необходима грамотная аграрная политика государственного регулирования. Кроме того, рекомендуется пересмотреть политику относительно иностранных инвестиций и позволить вкладываться инвесторам в развитие земель сельскохозяйственного назначения с учетом ограничений на право собственности на землю.

3. Для сокращения процессов деградации в результате загрязнения плодородной почвы в сельском хозяйстве антропогенной деятельностью человека необходимо проведение кадастровых исследований в системе государственного учета земельных ресурсов по сбору и регистрации достоверной информации о количественном и качественном состоянии земельных ресурсов.

4. При проведении пространственных исследований в сельскохозяйственном производстве необходимо использование наземных и спутниковых методов мониторинга и зондирования земельных ресурсов.

5. Необходимо разработать системные рекомендации по регионам с учетом местных условий по тем мероприятиям, которые стабилизируют загрязнение земельных ресурсов и снижают уровень антропогенного воздействия на ухудшение состояния почвы для совершенствования качественного потенциала земель сельскохозяйственного назначения – основного средства производства в сельском хозяйстве.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Мы, авторы научной статьи, заявляем об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Выполнение исследования осуществлялось из собственных средств финансирования.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за

методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества научной статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы научной статьи не использовали инструменты искусственного интеллекта (ИИ) в ходе подготовки научной статьи (помощь в написании текста, редактировании, проверка фактов, анализ данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдикадирова, А. (2013). Государственное регулирование и поддержка агропромышленного комплекса Республики Казахстан. Актуальные проблемы экономики, № 3(141), 199–205. // Abdikadirova, A. (2013). Gosudarstvennoe regulirovanie i podderzhka agropromyshlennogo kompleksa Respubliki Kazakhstan [State regulation and support of the agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan]. Aktual'nyye problemy ekonomiki, No. 3(141), 199–205. (In Russ.)
- Акимов, В. В. (2021). Технология кадастровой деятельности: учебное пособие. Нур-Султан: ТОО «Мастер По», 178 с. // Akimov, V. V. (2021). Tekhnologiya kadaastrovoi deyatel'nosti: uchebnoe posobie [Technology of cadastral activity: textbook]. Nur-Sultan: ТОО "Master Po", 178 p. (In Russ.)
- Алакоз, В. В. (2024). Географическое пространственное расширение посевных площадей сельскохозяйственных культур. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель, Т. XIX, № 1, 5–17. // Alakoz, V. V. (2024). Geograficheskoe prostranstvennoe rasshirenie posevnykh ploshchadei sel'skokhozyaistvennykh kul'tur [Geographical spatial expansion of cultivated agricultural areas]. Zemleustroistvo, kadastr i monitoring zemel', Vol. XIX, No. 1, 5–17. (In Russ.)
- Алпакская, Е. Г. (2013). Территориальное планирование: основные подходы. Вестник ЧелГУ, № 3(294), 17–24. // Alpatskaya, E.G. (2013). Territorial'noe planirovanie: osnovnyye podkhody [Territorial planning: basic approaches]. Vestnik ChelGU, No. 3(294), 17–24. (In Russ.)
- В Акмолинской области согласовали 10 проектов по рекультивации земель. // V Akmolinskoi oblasti soglasovali 10 proektov po rekul'tivatsii zemel' [Ten land reclamation projects approved in Akmola region]. Available at: <https://www.kt.kz/rus/economy/vakmolinskojoblastisoglasovali10proektovporekuljtivaciizemelj1153661446.html> (accessed: ...). (In Russ.)
- Земельный кодекс Республики Казахстан. (2003). № 442-II. // Zemel'nyi kodeks Respubliki Kazakhstan [Land Code of the Republic of Kazakhstan]. (2003). No. 442-II. Available at: <http://online.zakon.kz/Document/?docid=1040583>. (In Russ.)
- Ковязин, В. Ф. (2022). Кадастры природных ресурсов: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 104 с. // Kovyazin, V. F. (2022). Kadastry prirodnykh resursov: uchebnoe posobie dlya vuzov [Cadastrs of natural resources: textbook for universities]. 2nd ed. St. Petersburg: Lan', 104 p. (In Russ.)
- Липски, С. А. (2023). Управление объектами земельно-имущественного комплекса и природными ресурсами территорий: учебное пособие для СПО. 2-е изд. Саратов: Профобразование, 262 с. // Lipski, S. A. (2023). Upravlenie ob'ektami zemel'no-imushchestvennogo kompleksa i prirodnyimi resursami territorii [Management of land and property complexes and natural resources of territories]. 2nd ed. Saratov: Profobrazovanie, 262 p. (In Russ.)
- Маланьина, А. А. (2020). Анализ текущей ситуации и перспективы развития рынка земель сельскохозяйственного назначения в Республике Казахстан. Вестник Алтайской

- академии экономики и права, № 12(ч. 2), 71–79. // Malan'ina, A. A. (2020). Analiz tekushchei situatsii i perspektivy razvitiya rynka zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya v Respublike Kazakhstan [Analysis of the current state and development prospects of the agricultural land market in the Republic of Kazakhstan]. Vestnik Altaiskoi akademii ekonomiki i prava, No. 12(Part 2), 71–79. (In Russ.)
- Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана «Справедливый Казахстан: законпорядок, экономический рост, общественный оптимизм». (2024). // Poslanie Glavy gosudarstva Kasym-Zhomarta Tokaeva narodu Kazakhstana "Spravedlivyi Kazakhstan: zakonoporyadok, ekonomicheskii rost, obshchestvennyi optimizm" [Address of the Head of State Kassym-Jomart Tokayev to the people of Kazakhstan "Just Kazakhstan: rule of law, economic growth, and social optimism"]. (2024). Available at: <https://www.akorda.kz/ru/poslanie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-narodu-kazakhstan-181130>. (In Russ.)
- Постановление Правительства Республики Казахстан. (2021). Об утверждении Концепции развития агропромышленного комплекса Республики Казахстан на 2021–2030 годы, № 960. // Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan [Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan]. (2021). On approval of the Concept for development of the agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan for 2021–2030, No. 960. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2100000960>. (In Russ.)
- Спектор, М. Д. (2016). Оценка использования земельных ресурсов: монография. Астана: Фолиант, 300 с. // Spektor, M. D. (2016). Otsenka ispol'zovaniya zemel'nykh resursov: monografiya [Assessment of land resources use]. Astana: Foliant, 300 p. (In Russ.)
- Сводный аналитический отчет. (2022). «О состоянии и использовании земель Республики Казахстан за 2022 год». Астана: МСХ РК; КУЗР, 315 с. // Svodnyi analiticheskii otchet [Consolidated analytical report]. (2022). "On the state and use of lands of the Republic of Kazakhstan for 2022". Astana: Ministry of Agriculture of the RK; KUZR, 315 p. (In Russ.)
- Сводный аналитический отчет. (2023). «О состоянии и использовании земель Республики Казахстан за 2023 год». Астана: МСХ РК; КУЗР, 336 с. // Svodnyi analiticheskii otchet [Consolidated analytical report]. (2023). "On the state and use of lands of the Republic of Kazakhstan for 2023". Astana: Ministry of Agriculture of the RK; KUZR, 336 p. (In Russ.)
- Чирков, К. И., Гармаш, Л. П. (2021). Актуальные проблемы территориального планирования в России. Тенденции развития науки и образования, № 6, 110–112. <https://doi.org/10.18411/lj-06-2021-110> // Chirkov, K. I., Garmash, L. P. (2021). Aktual'nye problemy territorial'nogo planirovaniya v Rossii [Current problems of territorial planning in Russia]. Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya, No. 6, 110–112. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Ахметов Болат Жумағалиұлы – аға оқытушы, PhD докторы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан

Ахметов Болат Жумағалиевич – старший преподаватель, доктор PhD, Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан

Akhmetov Bolat Zhumagaliyevich – Senior Lecturer, PhD, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Astana, Kazakhstan

e-mail: Zunami89@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4646-0558>



Шуленбаева Фая Ахметқызы – кафедра профессоры, экономика ғылымдарының докторы, профессор, Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан

Шуленбаева Фая Ахметовна – профессор кафедрасы, доктор экономикалық наук, профессор, Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан

Shulenbayeva Faya Ahmetovna – Full Professor, Doctor of Economical Science, Full Professor in Economics, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Astana, Kazakhstan

e-mail: fschulen@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3078-0568>



Кульмаганбетова Айсұлу Султанқызы – аға оқытушы, PhD докторы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан

Кульмаганбетова Айсұлу Султановна – старший преподаватель, доктор PhD, Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан

Kulmaganbetova Aisulu Sultanovna – Senior Lecturer, PhD, S.Seifullin Kazakh Agro Technical University, Astana, Kazakhstan

e-mail: aisulu.5@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0815-8905>



Жагипарова Толқын Түлегеновна – бағалау ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан, Астана қ., Қазақстан

Жагипарова Толқын Түлегеновна – магистр наук оценки, старший преподаватель, Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан

Zhagiparova Tolkyun Tulegenovna – Master of Science in Assessment, Senior Lecturer, S.Seifullin Kazakh Agro Technical University, Astana, Kazakhstan

e-mail: Tolkin69@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2099-0811>



Жанбусинова Марзия Хамзеқызы – аға оқытушы, магистр, Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан

Жанбусинова Марзия Хамзеновна – старший преподаватель, магистр, Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан

Zhanbusinova Marzia Khamzenovna – Senior lecturer, Master's degree, S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Astana, Kazakhstan

e-mail: marziya.zhanbusinova@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5622-9053>

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_2

XFTAP 73.31.75

КЛАСТЕРЛЕУ АЛГОРИТМДЕРІН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ТАСЫМАЛДАУ МАРШРУТТАРЫН ҚАЛЫПТАСТЫРУ

ФОРМИРОВАНИЕ РАЗВОЗОЧНЫХ МАРШРУТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

CREATING DELIVERY ROUTES USING CLUSTERING ALGORITHMS

В.Н. Вдовин ¹, А. Х. Машекенова ¹, А.Р. Дуйсен ^{1*}, Suresh Alapati ²

¹«Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КеАҚ, Өскемен қ., Қазақстан

²Kyungsung University, Busan, Korea

*Жауапты автор: Дуйсен Аялым Ринатовна, e-mail: arduisen@mail.ru

Түйінді сөздер:

кластерлеу, тасымалдау маршруттары, k-means алгоритмі, DBSCAN алгоритмі, көлік қызметі аймағы, «тармақтар мен шекаралар әдісі».

ТҮЙІНДЕМЕ

Кластерлеу-жеткізу нүктелерін олардың сипаттамаларына негізделген белгілі бір белгілер бойынша топтастыру арқылы жеткізу нүктелерін топтарға (кластерлерге) алдын ала біріктіру процесі. Нәтижесінде маршрут нүктелердің барлық жиынтығы бойынша емес, әр кластердің ішінде бөлек жоспарланады, бұл тапсырманың күрделілігін айтарлықтай төмендетеді. Зерттеудің мақсаты жеткізу объектілерін кластерлеудің оңтайлы әдісін анықтау және оның көмегімен қаланың сауда желісіне қызмет көрсету кезінде тасымалдау маршруттарын әзірлеу болып табылады. Бұл мақалада DBSCAN және k-means алгоритмдерінің жұмысы қарастырылады. Салыстырмалы талдау DBSCAN жоғары нүктелік тығыздықта тұрақты нәтиже бермейтінін көрсетті, ал k-means әдісі айқын кластерлерді көрсетеді. Кластерлердің оңтайлы саны «шын-тақ» және «силуэт» әдістерімен анықталады. Python бағдарламалау тілінде алгоритмдерді енгізу және кейіннен «тармақтар мен шекаралар әдісі» қолдану автомобильдердің маршруттардағы жүгірісін қысқартуға және дайын өнімді жеткізуге көлік шығындарын азайтуға мүмкіндік береді.

Ключевые слова:

кластеризация, развозочные маршруты, алгоритм k-means, алгоритм DBSCAN, зона транспортного обслуживания, «метод ветвей и границ».

АННОТАЦИЯ

Кластеризация представляет собой процесс предварительного объединения точек доставки в группы (кластеры), путём группировки точек по определённым признакам, основываясь на их характеристиках. В результате, маршрут планируется не по всей совокупности точек, а отдельно внутри каждого кластера, что существенно снижает сложность задачи. Целью исследования является определение оптимального метода кластеризации объектов доставки и разработка с его помощью развозочных маршрутов при обслуживании торговой сети города. В данной статье рассмотрена работа алгоритмов DBSCAN и k-means. Сравнительный анализ показал, что DBSCAN не



обеспечивает устойчивого результата при высокой плотности точек, тогда как метод k-means формирует четкие кластеры. Оптимальное количество кластеров определено методами «локтя» и «силуэта». Реализация алгоритмов на языке программирования Python и последующее использование «метода ветвей и границ» позволяют сократить пробег автомобилей на маршрутах и снизить транспортные расходы на доставку готовой продукции.

Keywords:

clustering, delivery routes, k-means algorithm, DBSCAN algorithm, transport service area, "Branch-and-bound (BnB)" method.

ABSTRACT

Clustering is the process of organizing delivery points into groups (clusters) by certain attributes based on their characteristics. As a result, the route is planned not by the whole set of points, but in parts within each cluster, which significantly reduces the complexity of the problem. The aim of the study is to identify the optimal clustering method of delivery objects and use it to create delivery routes for the city's retail network.

In this article, the work of the DBSCAN and k-means algorithms is considered. A comparative analysis showed that DBSCAN does not provide a stable result with a high density of points, whereas the k-means method demonstrates clear clusters. The optimal number of clusters is determined by the "elbow" and "silhouette" methods. The implementation of algorithms in the Python programming language and the subsequent use of the "Branch-and-bound" method will reduce the mileage of cars on routes and reduce transportation costs for the delivery of finished products.

КІРІСПЕ

Тасымалдауды жоспарлаудың негізгі кезеңдерінің бірі – маршруттарды құруға дейін жүзеге асырылатын жеткізу нысандарын кластерлеу болып табылады. Кластерлеу әдістерін қолдану тарату маршруттарын қалыптастыру мәселесін тиімді шешуге мүмкіндік береді. Тауарларды жеткізудің ұтымды маршруттарын әзірлеу мәселесі қаланың сауда желісіне қызмет көрсету кезінде ерекше өзектілікке ие. Бұл – ондаған, тіпті жүздеген жеткізу нүктелері, көлік паркінің шектеулі мүмкіндіктері, шарттық міндеттемелердің уақытылы орындалуы сияқты факторлармен байланысты. Ұтымды маршруттарды қалыптастыру көлік шығындарын қысқартуға және тауарды уақтылы жеткізуді қамтамасыз етуге мүмкіндік береді (Бочкарев А.А., Клочков В.Н., 2008; Овсянникова Г.А., Шошин Д.А., 2014; Mokhammad R. және т.б., 2021).

Зерттеу нысаны ретінде нан-тоқаш өнімдерін өндіретін және оларды қаланың 460 сауда нүктесіне меншікті көлік құралдарымен жеткізетін кәсіпорын таңдап алынды. Жеткізу нүктелерінің саны аз болған жағдайда оңтайлы маршрутты қалыптастыру міндеті салыстырмалы түрде оңай шешіледі. Алайда нүктелер саны артқан сайын, оларды айналып өту мүмкін комбинацияларының айтарлықтай көбеюіне байланысты бұл міндет едәуір күрделене түседі. Кластерлеу әдістерін қолдану жеткізу нүктелерін географиялық жақындығы белгісі бойынша топтастыру арқылы аталған мәселені тиімді шешуге мүмкіндік береді. Нәтижесінде маршрут барлық нүктелер жиынтығы бойынша емес, әрбір кластер шегінде жеке жоспарланады, бұл есептің күрделілігін айтарлықтай төмендетеді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Оңтайлы маршруттарды әзірлеу автомобильдік тасымалдауды жоспарлаудың маңызды міндеті болып табылады. Бұл көлік шығындарының өнімді өткізу өзіндік құнында елеулі үлеске ие болуымен түсіндіріледі. Ұтымды маршруттарды құру

мәселесін маршрутизация шешеді, соның нәтижесінде кәсіпорынның көлік шығындары қысқарып, клиенттерге қызмет көрсету сапасы артады. Тасымалдауды жоспарлаудың негізгі кезеңдерінің бірі – маршруттарды құруға дейін жүзеге асырылатын жеткізу нысандарын кластерлеу болып табылады. Практикалық міндеттердің көпшілігінде көлік паркінің біркелкі жүктелуін және жалпы жеткізу уақытының қысқаруын қамтамасыз ету үшін тұтынушыларды әртүрлі маршруттар бойынша теңгерімді бөлу қажет.

Деректерді кластерлеудің бес негізгі математикалық әдісі талданды. Әрбір әдіс өнімді жеткізудің сауда нүктелерін кластерлеуге қолдану мүмкіндігі тұрғысынан қарастырылды (Aravind c. R., 2023; Тюрин а. Г., Зуев И. О., 2014; Семенов Ю. Н., Семенова О. С., 2016). Спектрлік және агломеративті кластерлеу алгоритмдері, сондай-ақ гаусс қоспалары моделі биологияда және әлеуметтік ғылымдарда тиімдірек қолданылатындықтан, әрі қарайғы зерттеу үшін екі алгоритм таңдалды: k-means (немесе k-орташа) және DBSCAN – Density-based spatial clustering of applications with noise (Апельцин Л., 2023).

Кластерлеуге деректерді дайындау, оның ішінде деректерді тазалау және географиялық координаталарды алу 2GIS әрі көмегімен жүзеге асырылды. Бұл кіріс деректерінің жеткілікті жоғары дәлдігін қамтамасыз етуге мүмкіндік берді, ол кластерлік алгоритмдердің дұрыс жұмыс істеуінің және кейінгі маршрутизацияның негізгі шарты болып табылады.

DBSCAN алгоритмі арқылы кластерлерді қалыптастыру кезінде k-distance plot графигін пайдалана отырып екі параметр анықталды: кластер радиусы және кластердегі нүктелердің ең аз саны.

K-MEANS алгоритмін қолдану барысында алдымен табиғи географиялық кедергілерді (ертiс және үлбi өзeндерi) ескеру үшiн нүктелер қызмет көрсету аймақтары бойынша сегменттелдi. Кейiн «локоть әдiсi» (elbow method) және «силуэт әдiсi» (silhouette method) арқылы кластерлердiң оңтайлы саны анықталды.

«Локоть әдісі» әртүрлі k мәндері үшін кластерлеу жүргізіп, кластерлер санына байланысты кластерішілік дисперсияның жиынтық мәнінің графигін құруды көздейді. Кластерішілік дисперсия (немесе объектілер мен олардың центроидтары арасындағы қашықтықтардың квадраттарының қосындысы) кластерлердің жинақтылық деңгейін көрсетеді: дисперсия неғұрлым төмен болса, кластерлер соғұрлым «реттелген» және «біртекті» болады.

«Силуэт әдісі» объектілердің кластерлерге қаншалықты жақсы бөлінетінін бағалайды. Силуэт коэффициенті неғұрлым жоғары болса, объект өз кластеріне соғұрлым жақсы сәйкес келеді.

Python бағдарламалау тілінде код әзірленді, бұл процесті автоматтандыруға және шешімнің ауқымдылығын (масштабталуын) қамтамасыз етуге мүмкіндік берді.

Маршрутизацияның соңғы кезеңі маршрут бойындағы сауда нүктелерін аралау ретін анықтау болып табылады. Бұл міндетті шешу үшін жоғары дәлдігімен танымал «тармақтар мен шектер әдісі» (branch and bound) таңдалды. Осы әдіс бойынша барлық есептеулер ms excel ортасында жүргізілді. Симметриялық матрицаны пайдалану және маршрут ұзындысының жергілікті төменгі шектерін есептеу арқылы тұтынушыларға қызмет көрсетудің оңтайлы кезектілігі анықталды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Иерархиялық емес шешімді табу қажет болған және кластерлер саны алдын ала белгісіз жағдайда нүктелердің тығыздығына негізделген, шуылдарды ескеретін кеңістіктік кластерлеу алгоритмін қолдану орынды. Бұл алгоритм ағылшын тілінде density-based spatial clustering of applications with noise деп аталады және қысқаша dbscan ретінде белгілі.

Алгоритм нүктелердің үш түрін ажыратады: негізгі (ядролық), шекаралық және шуылдық нүктелер. Негізгі (ядролық) нүктелер – осы нүктеден қолжетімді барлық нүктелермен бірге кластерді қалыптастырады. p нүктесі негізгі болып саналады, егер ε -окрестігінде кемінде minpts (minpts) нүкте орналасса ($U_\varepsilon(x) = \{u \in U: \rho(x, u) \leq \varepsilon\}$).

Бұл жағдайда $|u_\varepsilon(x)| \geq \text{minpts}$ шарты орындалып, аталған нүктелер p нүктесінен тікелей жетімді болып табылады. q нүктесі (шекаралық) p нүктесінен тікелей жетімді деп есептеледі, егер ол p нүктесінен ε -ден аспайтын қашықтықта орналасса. q нүктесі p нүктесінен жетімді болып табылады, егер p_1, p_2, \dots, p_n нүктелерінен тұратын жол бар болып, мұнда $p_1 = p$ және $p_n = q$, ал әрбір p_{i+1} нүктесі p_i нүктесінен тікелей жетімді болса (кугаевских а. В., 2022).

Epsilon (*eps*, ε) параметрі окрестік радиусын білдіреді, ал *minpoints* (*min_samples*) – кластердегі нүктелердің ең аз санын көрсетеді.

Кәсіпорын қызмет көрсететін сауда нүктелерін кластерлеу үшін python бағдарламалау тілінде DBSCAN алгоритмін қолдана отырып код әзірленді (1-сурет).

```
import pandas as pd
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.cluster import DBSCAN
from sklearn.neighbors import NearestNeighbors
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.metrics import silhouette_score

file_path = "final_merged_with_route.csv"
df = pd.read_csv(file_path)

df = df.dropna(subset=['Longitude', 'Latitude', 'Отгружено количество', 'Возврат количество', 'Всего вес, кг'])

features = df[['Longitude', 'Latitude', 'Отгружено количество', 'Возврат количество', 'Всего вес, кг']]

scaler = StandardScaler()
features_scaled = scaler.fit_transform(features)

neighbors = NearestNeighbors(n_neighbors=10)
neighbors_fit = neighbors.fit(features_scaled)
distances, indices = neighbors_fit.kneighbors(features_scaled)

distances = sorted(distances[:, 3], reverse=True)
plt.plot(distances)
plt.title('K-distance plot')
plt.xlabel('Points')
plt.ylabel('Distance to 4th nearest neighbor')
plt.show()

dbscan = DBSCAN(eps=0.7, min_samples=15)
df['Cluster_DBSCAN'] = dbscan.fit_predict(features_scaled)

print(f"Количество кластеров: {len(set(df['Cluster_DBSCAN']))} - (1 if -1 in df['Cluster_DBSCAN'].values else 0)")
print(f"Количество точек с шумом: {(df['Cluster_DBSCAN'] == -1).sum()}")

silhouette = silhouette_score(features_scaled, df['Cluster_DBSCAN'])
print(f"Silhouette Score: {silhouette}")

plt.scatter(df['Longitude'], df['Latitude'], c=df['Cluster_DBSCAN'], cmap='viridis')
plt.xlabel('Longitude')
plt.ylabel('Latitude')
plt.title('DBSCAN Clustering of Delivery Points')
plt.colorbar(label='cluster')
plt.show()
display(df.head())
```

1-сурет. DBSCAN алгоритмінің коды (*eps* = 0,7; *min_samples* = 15 кезінде)

Ескерту – Python бағдарламасында автор құрастырған

Код жазу кітапханаларды импорттаудан басталады. DBSCAN алгоритміне деректер келесі құралдар арқылы енгізілді:

Pandas – кестелік деректерді өңдеуге арналған бағдарламалық кітапхана;

StandardScaler – деректерді стандарттайды (орташа мәнді нөлге, стандарттық ауытқуды бірге келтіру);

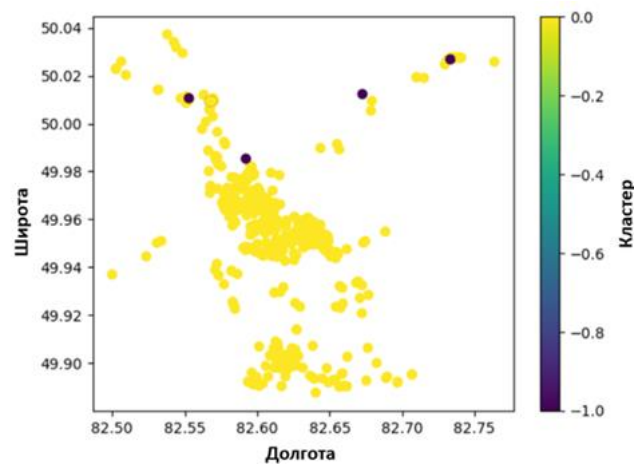
Matplotlib.pyplot – кластерлерді визуализациялауға арналған;

Silhouette_score (силуэт коэффициенті) – кластерлеу сапасын бағалау метрикасы.

Одан әрі сауда нүктелері туралы ақпаратты қамтитын csv-файл жүктеліп, кластерлеу жүргізілетін белгілер таңдап алынды. Белгілерді масштабтау DBSCAN алгоритмінің дұрыс жұмыс істеуі үшін қажет, себебі ол деректер шкаласына сезімтал. Кейін алгоритм үшін $min_samples = 10$ және $eps = 2$ параметрлері орнатылып, кластерлер мен шуылдық нүктелер санын есептеу командалары енгізілді. Шуылдық нүктелер «-1» белгісімен анықталады.

Кластерлеу сапасын бағалау үшін мәні -1 мен 1 аралығында өзгертін силуэт коэффициенті (*silhouette score*) қолданылды. 1-ге жақын мән кластерлердің айқын бөлінгенін көрсетсе, 0-ге жақын мән олардың бір-бірімен қабаттасуын білдіреді, ал теріс мән ықтимал қателіктің бар екенін көрсетеді. Соңғы кезеңде кластерлер *longitude* және *latitude* координаталары бойынша визуализацияланды. Кодтың соңғы жолында кластерлеуден кейінгі датафреймнің алғашқы бес жолы көрсетілді.

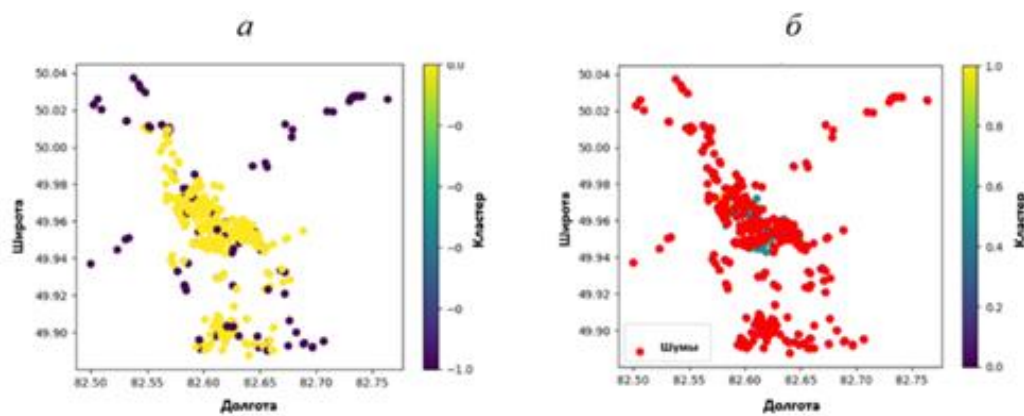
DBSCAN алгоритмі 7 шуылдық нүктесі бар 1 кластерді қалыптастырды (2-сурет). Кластердің силуэт коэффициенті 0,81-ге тең.



2-сурет. DBSCAN алгоритмін іске асыру

Ескерту – Python бағдарламасында автор құрастырған

Аталған параметр мәндері кластерлерді қалыптастырмағандықтан, келесі итерацияларда кластер радиусы мен минималды нүктелер саны кездейсоқ таңдалды (3-сурет).



3-сурет. DBSCAN алгоритмінің қайталап іске асырылуы:

(а) $eps = 0,7$; $min_samples = 15$ (б) $eps = 0,3$; $min_samples = 15$

Ескерту – Python бағдарламасында автор құрастырған.

Эксперимент барысында алгоритмге әртүрлі *eps* және *min_samples* мәндері берілді, алайда ешқайсысы нәтиже берген жоқ; айқын кластерлер қалыптаспады, олардың саны анықталған жоқ, көптеген нүктелер шуылдық ретінде белгіленді. Сол себепті, зерттеу нысаны үшін DBSCAN алгоритмін әрі қарай қолдану тиімсіз деп танылды.

Келесі кезеңде k-means алгоритмі іске асырылды. Бұл әдіс кластерлердегі нүктелердің орталықтарынан квадраттық ауытқулардың жалпы сомасын минимизациялауға бағытталған (Дюран Б., Оделл П., 1977; Ершов К.С., Романова Т.Н., 2016).

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2, \quad (1)$$

мұндағы:

k – кластерлер саны;

S_i – алынған i -ші кластер, $i = 1, 2, \dots, k$;

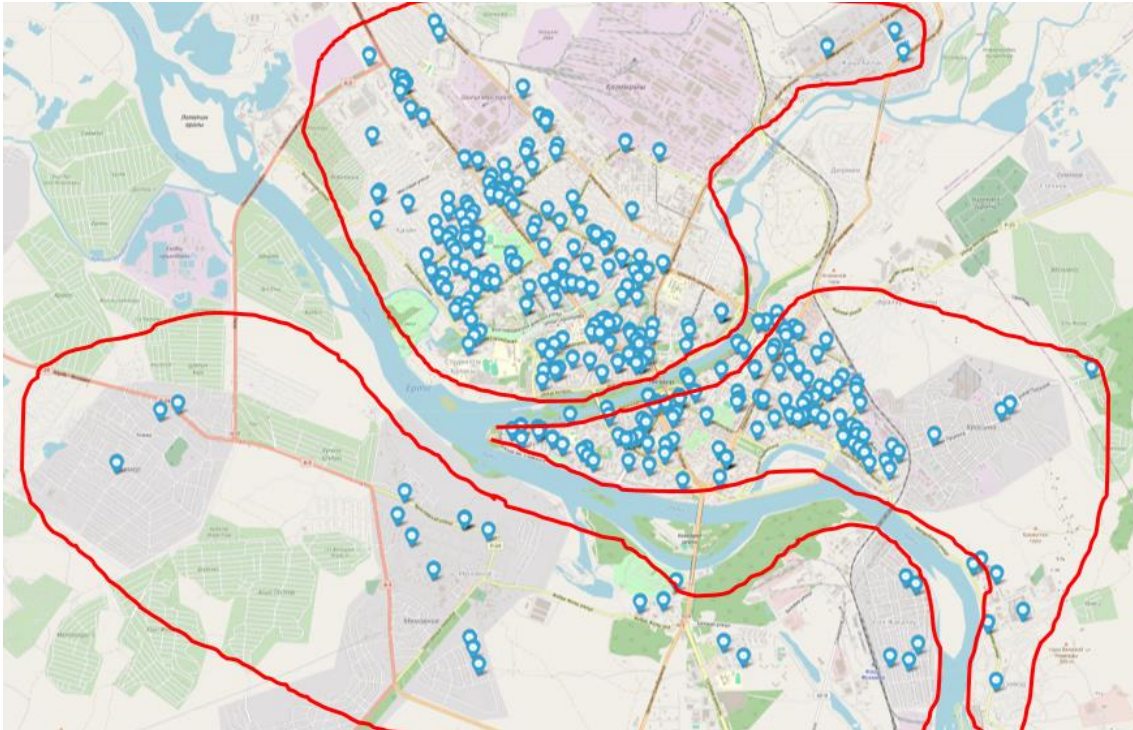
μ_i – S_i кластеріндегі x_j векторларының массалық орталығы.

Осы жағдайда метрика ретінде евклид қашықтығы қолданылды:

$$\text{dist}(x, x') = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2} \quad (2)$$

мұндағы: $(x_i - x'_i)$ – Евклид кеңістігінің бастапқы нүктесінен (исходной точки) шыққан векторлар; n – n өлшемді кеңістік.

K-MEANS алгоритмі үшін міндетті кезеңдердің бірі – нүктелерді қызмет көрсету аймақтары бойынша сегменттеу. Мұндай бөлу қаланың табиғи географиялық кедергілерін ескеруге мүмкіндік береді. Осы жағдайда аймақтардың шекарасы ретінде Ертіс және Үлбі өзендері алынды. Үш секторға бөлу – Жоғарғы (Үлбі аудан), Оң жақ (Октябрьский аймағы) және Сол жақ (КШТ) – жеткізу сауда нүктелерінің кластерлерін қалыптастыруды жеңілдетті (4-сурет).



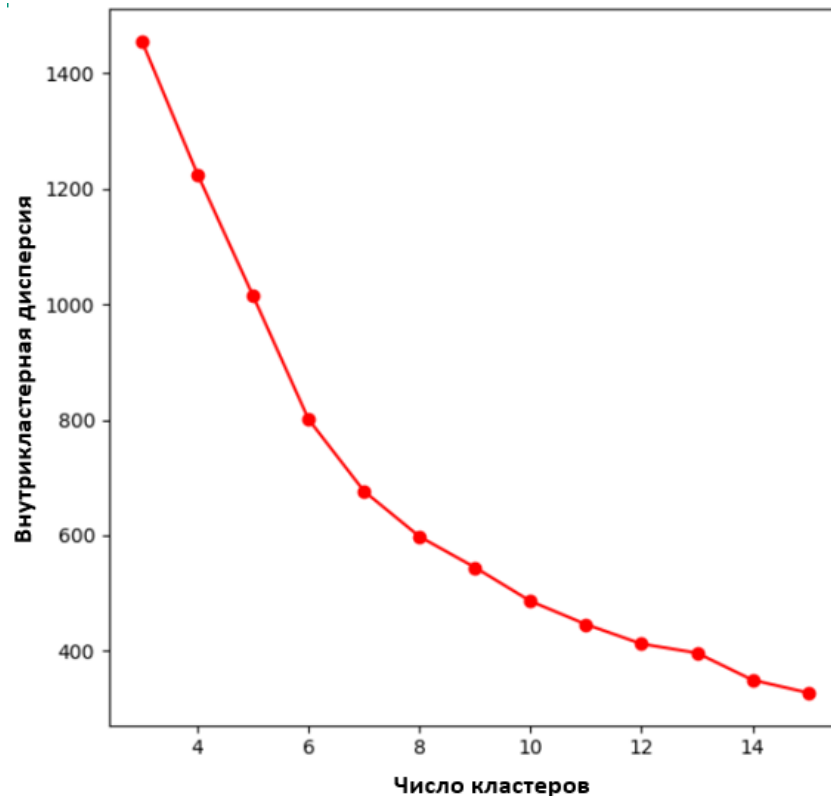
4-сурет. Нүктелерді қызмет көрсету аймақтары бойынша сегментациялау
Ескерту – 2GIS API негізінде автор құрастырған

Қызмет көрсету аймақтарының шекараларын анықтағаннан кейін кластерлер санын белгілеуге болады. Санды немесе кәсіпорын қызметкерлері анықтаған маршруттар саны немесе қолда бар көлік құралдарының саны негізінде өздігінен белгілейді, немесе кластерлер санын анықтау әдістерін қолдануға болады, мысалы, elbow method («локоть әдісі») және silhouette method («силуэт әдісі»).

«Локоть әдісі» әртүрлі k мәндері үшін кластерлеу жүргізіп, кластерлер санына байланысты кластерішілік дисперсияның (inertia) жиынтық мәнін көрсететін график құруға негізделген. Кластерішілік дисперсия (немесе объектілер мен олардың центроидтары арасындағы қашықтық квадраттарының қосындысы) кластерлердің қаншалықты жинақталғанын көрсетеді. Дисперсия неғұрлым төмен болса, кластерлер соғұрлым «реттелген» және «біртекті» болады.

Әдіс келесі кезеңдерді қамтиды:

- k -means алгоритмін әртүрлі k мәндері үшін іске қосу, мысалы, 1-ден 10-ға дейін;
- әрбір k мәні үшін кластерішілік дисперсияны есептеу;
- график құру: X осінде k мәндері, Y осінде – сәйкес кластерішілік дисперсия мәндері;
- графиктегі «локоть» нүктесін табу: бұл нүкте кластерлер санын арттырған кезде кластерішілік дисперсияның айтарлықтай төмендемеуі байқалатын сәт (5-сурет).



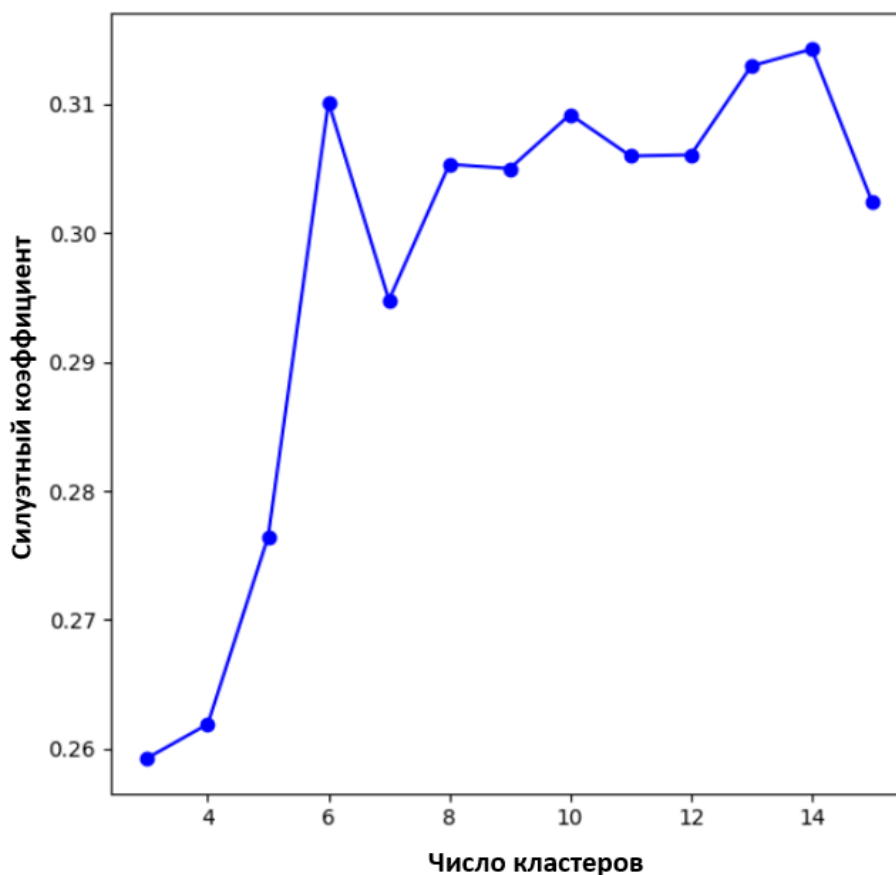
5-сурет. Кластерлер санын «локоть әдісі» арқылы анықтау

Ескерту – автор құрастырған

График мәліметтеріне сүйенсек, оңтайлы кластер саны 6...9 аралығында орналасады. Алты кластер үшін кластерішілік дисперсия 800,7, жеті кластер үшін – 676,4, сегіз кластер үшін – 597,9, тоғыз кластер үшін – 544,5 тең.

«Силуэт әдісі» объектілердің кластерлерге қаншалықты жақсы бөлінетінін бағалайды. Силуэт коэффициенті неғұрлым жоғары болса, объект өз кластеріне соғұрлым жақсы сәйкес келеді.

6-суретте 6, 8, 9...14 кластер үшін силуэт мәні шамалы өзгеріп, 0,30 – 0,31 аралығында қалатыны көрінеді.



6-сурет. Кластерлер санын «силуэт әдісі» арқылы анықтау

Ескерту – автор құрастырған

Кәсіпорынның сауда нүктелерін k-means алгоритмі арқылы кластерлеу үшін Python тілінде код та жасалды (5-сурет). Төменде әзірленген кодтың сипаттамасы және кластерлеу нәтижелері графиктерде көрсетілген.

DBSCAN алгоритмінде болғандай, кітапханаларды импорттау келесі құралдар арқылы жүзеге асырылады: Pandas – кестелік деректерді өңдеу; matplotlib.pyplot – кластерлерді визуализациялау; silhouette_score – кластерлеу сапасын бағалау метрикасы.

Сондай-ақ, сауда нүктелері туралы ақпаратты қамтитын CSV-файл жүктеліп, белгілер масштабталады.

«Локоть» және «силуэт» әдістерінің нәтижелеріне сүйене отырып, алгоритмге кластерлер саны $k = 9$ деп берілді. Кластерлеу сапасын бағалау үшін silhouette score мәні енгізілді.

Одан кейін inertia командасы қолданылады – кластерішілік дисперсия есептеледі, ол «локоть әдісінде» қолданылады, сонымен қатар координаталар бойынша кластерлер графигі салынады.

Inertia енгізілген соң кластерлердің оңтайлы санын анықтау үшін график құрылады. Кодтың соңында датафрейм CSV-файлға сақталады.

Эксперименттік есептеулер әртүрлі кластерлер саны үшін жүргізілді (6-дан 10-ға дейін).

```
import pandas as pd
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
import matplotlib.pyplot as plt
import folium
from sklearn.metrics import silhouette_score

file_path = "final_merged_with_route.csv"
df = pd.read_csv(file_path)

df = df.dropna(subset=['Longitude', 'Latitude', 'Отгружено количество', 'Возврат количество', 'Всего вес, кг'])

features = df[['Longitude', 'Latitude', 'Отгружено количество', 'Возврат количество', 'Всего вес, кг']]

scaler = StandardScaler()
features_scaled = scaler.fit_transform(features)

kmeans = KMeans(n_clusters=7, random_state=42)
df['Cluster'] = kmeans.fit_predict(features_scaled)

silhouette = silhouette_score(features_scaled, df['Cluster'])
print(f"Silhouette Score: {silhouette:.4f}")

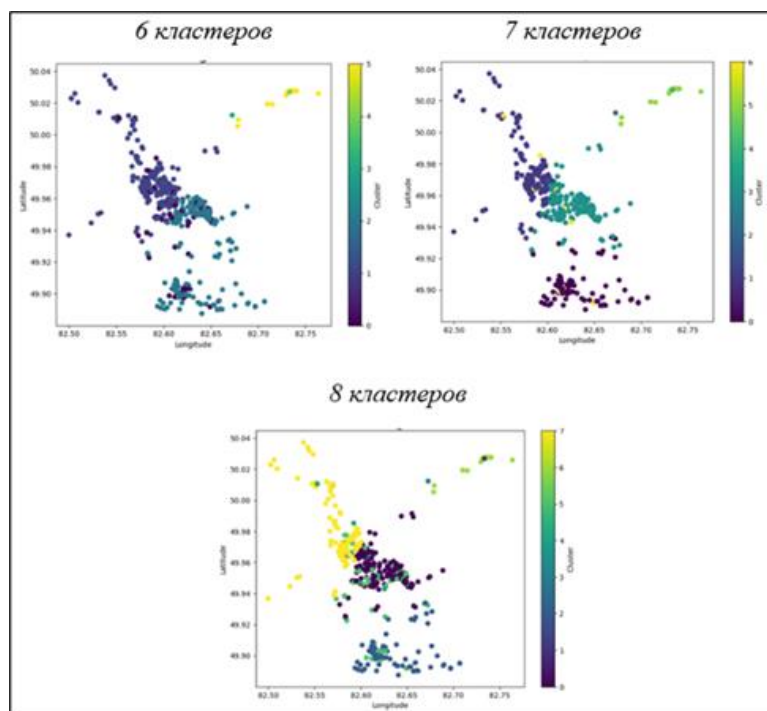
plt.scatter(df['Longitude'], df['Latitude'], c=df['Cluster'], cmap='viridis')
plt.xlabel('Longitude')
plt.ylabel('Latitude')
plt.title('K-means Clustering of Delivery Points')
plt.colorbar(label='Cluster')
plt.show()

df.to_csv("final_merged_with_clusters.csv", index=False)
```

5-сурет. k-means алгоритміне арналған код

Ескерту – Python бағдарламасында автор құрастырған

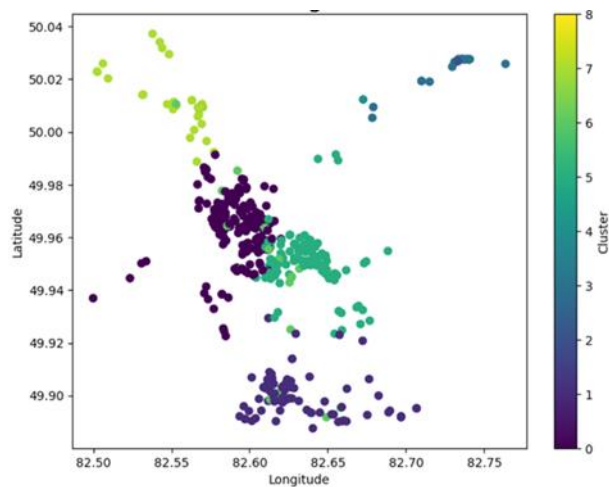
6–8 кластер қолданылған жағдайда (6-сурет) кластерлер арасындағы шекаралар айқын емес, кластерлер бір-біріне «қабаттасып» көрінеді.



6-сурет. Алгоритмді 6, 7, 8 кластермен іске асыру

Ескерту – Python бағдарламасында автор құрастырған

Нүктелерді бөлудің егжей-тегжейлілігі кластерлер саны 9 болған кезде байқалады (7-сурет). Силуэт коэффициенті 0,305-ке тең, ал кластерішілік дисперсия 544,47 құрайды.

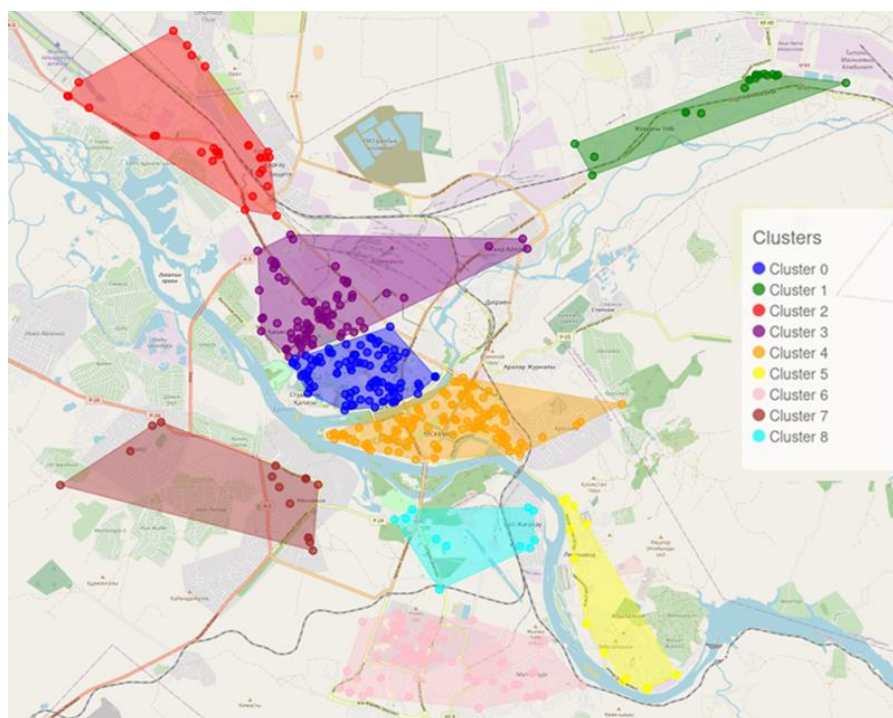


7-сурет. Алгоритмді 9 кластермен іске асыру

Ескерту – Python бағдарламасында автор құрастырған

Тоғыз кластер қолданылған жағдайда топтар арасындағы шекаралар айқын көрінеді, объектілердің тығыз орналасқан аймақтары бір-бірінен бөлінген және аралас аймақтар саны азайтылған.

k-means алгоритмі 9 ішкі жиынтықты қалыптастырды: Жоғарғы секторда – 4 кластер, Оң жақ секторда – 2 кластер, Сол жақ секторда – 3 кластер. Кластерлеу нәтижесі 8-суретте көрсетілген.



8-сурет. k-means алгоритмімен 9 кластерге бөлудің нәтижесі

Ескерту – 2GIS API негізінде автор құрастырған

Тасымалдау маршруттарды қалыптастырудың соңғы кезеңі – маршрут бойындағы сауда нүктелерін аралау ретін анықтау болып табылады. Бұл міндетті шешу үшін «тармақтар мен шектер әдісі» (branch and bound) қолданылды. Әдіс симметриялық матрицаны пайдалануды және маршрут ұзындығының жергілікті төменгі шектерін есептеуді қамтиды (Домке Э. Р., 2014; Павлов Л. А., 2020; Галяутдинов Р. Р., 2023). Осы әдісті қолдану арқылы сауда нүктелерін аралаудың оңтайлы кезектілігі анықталды, бұл маршрут бойынша орташа жүру қашықтығын 13 %-ға қысқартуға мүмкіндік берді және дайын өнімді жеткізудегі көлік шығындарын азайтуға жағдай жасады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу барысында екі кластерлеу алгоритмі үшін python тілінде кодтар әзірленді. Эксперимент барысында dbscan алгоритміне әртүрлі кластер радиусы (eps параметрі) және негізгі нүктені анықтау үшін қажетті ең аз нүктелер саны (min_samples параметрі) мәндері берілді, бірақ ешқайсысы нәтиже бермеді: айқын кластерлер қалыптаспады, олардың саны анықталған жоқ. Сол себепті, бұл алгоритм жеткізу маршруттары бойынша тығыз орналасқан нүктелерді біріктіруде жеткілікті тиімді емес деп танылды.

K-means алгоритмін қолданудың практикалық маңыздылығы мен тиімділігі көрсетілді. Бұл алгоритм кластер ішіндегі қашықтықты минимизациялады. Барлық кластерлер көлік құралдарының максималды сыйымдылық шегіне – 4000 бірлік өнімге – сәйкес келеді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: авторлар мүдделер қақтығысы жоқ екенін мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: ғылыми мақала авторлары мақаланы жазу барысында жасанды интеллект технологияларын пайдаланбағанын мәлімдейді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Бочкарев, А.А., & Клочков, В.Н. (2008). Методология планирования доставки мелкопартионных грузов в условиях крупного города. Вестник СГТУ, 5–15. // Bochkarev, A. A., & Klochkov, V. N. (2008). Metodologiya planirovaniya dostavki melkopartionnykh gruzov v usloviyakh krupnogo goroda. Vestnik SGTU, 5–15. [Methodology for planning small-lot cargo delivery in a large city] (In Russ.)
- Овсянникова, Г.Л., & Шошин, Д.А. (2014). Организация автомобильных перевозок мелких партий груза на предприятии молокозавода. Молодой ученый, 11, 87–90. // Ovsyannikova, G.L., & Shoshin, D.A. (2014). Organizatsiya avtomobilnykh perevozok melkikh partiy gruzha na predpriyatii molokozavoda. Molodoy uchenyy, 11, 87–90. [Organization of road transportation of small cargo lots at a dairy plant] (In Russ.)
- Aravind, C. R. (2023). Exploring clustering algorithms: Explanation and use cases. Neptune.ai. <https://neptune.ai/blog/clustering-algorithms>
- Mokhammad, R., & Indratno, S. W. (2021). Dynamic items delivery network: Prediction and clustering. Heliyon, 7(8), e07640. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07640>
- Тюрин, А. Г., & Зуев, И. О. (2014). Кластерный анализ: методы и алгоритмы кластеризации. Вестник МГТУ МИРЭА, 2, 86–97. // Tyurin, A.G., & Zuev, I.O. (2014). Klasternyy analiz: metody i algoritmy klasterizatsii. Vestnik MGTU MIREA, 2, 86–97. [Cluster analysis: methods and clustering algorithms] (In Russ.)
- Семенов, Ю. Н., & Семенова, О. С. (2016). Применение методов кластеризации при организации междугородных перевозок грузов. Вестник КузГТУ, 6, 201–204. // Semenov, Yu. N., & Semenova, O. S. (2016). Primenenie metodov klasterizatsii pri organizatsii mezhdugorodnykh perevozok gruzov. Vestnik KuzGTU, 6, 201–204. [Application of clustering methods in organizing intercity freight transportation] (In Russ.)

- Апельцин, Л. (2023). Data Science в действии. Санкт-Петербург: Питер. // Apeltsin, L. (2023). Data Science v deystvii. Saint Petersburg: Piter. [Data Science in action] (In Russ.)
- IT-ресурс Хабр. (2023). Кластеризация в ML: от теоретических основ популярных алгоритмов к их реализации с нуля на Python. <https://habr.com/ru/articles/798331/> // IT-resurs Khabr. (2023). Klasterizatsiya v ML: ot teoreticheskikh osnov populyarnykh algoritmov k ikh realizatsii s nulya na Python. [Clustering in ML: from theoretical foundations of popular algorithms to their implementation from scratch in Python] (In Russ.)
- Кугаевских, А. В., Муромцев, Д. И., & Кирсанова, О. В. (2022). Классические методы машинного обучения: учебное пособие. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО. // Kugaevskikh, A. V., Muromtsev, D. I., & Kirsanova, O. V. (2022). Klassicheskie metody mashinnogo obucheniya: uchebnoe posobie. Saint Petersburg: NRU ITMO. [Classical machine learning methods: study guide] (In Russ.)
- Duran, B., & Odell, P. (1977). Cluster analysis. New York: Springer. // Duran, B., & Odell, P. (1977). Klasternyy analiz. Moscow: Statistika. [Cluster analysis] (In Russ.)
- Ершов, К. С., & Романова, Т. Н. (2016). Анализ и классификация алгоритмов кластеризации. Новые информационные технологии в автоматизированных системах. // Ershov, K. S., & Romanova, T. N. (2016). Analiz i klassifikatsiya algoritmov klasterizatsii. Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh. [Analysis and classification of clustering algorithms] (In Russ.)
- IT-resource GeeksforGeeks. (2025). Elbow method vs. silhouette score: Which is better? <https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/elbow-method-vs-silhouette-score-which-is-better/>
- Домке, Э. Р., & Жесткова, С. А. (2014). Методы оптимизации маршрутных схем развозки грузов автомобильным транспортом: учебное пособие. Пенза: ПГУАС. // Domke, E. R., & Zhestkova, S. A. (2014). Metody optimizatsii marshrutnykh skhem razvozki грузов avtomobilnym transportom. Penza: PGUAS. [Methods for optimizing road freight distribution routes] (In Russ.)
- Павлов, Л. А., & Первова, Н. В. (2020). Структуры и алгоритмы обработки данных (2-е изд.). Санкт-Петербург: Лань. // Pavlov, L. A., & Pervova, N. V. (2020). Struktury i algoritmy obrabotki dannykh (2nd ed.). Saint Petersburg: Lan. [Data structures and processing algorithms] (In Russ.)
- Галютдинов, Р. Р. (2023). Задача коммивояжера — метод ветвей и границ. <https://galyautdinov.ru/post/zadacha-kommivoyazhera> // Galyautdinov, R. R. (2023). Zadacha kommivoyazhera — metod vetvey i granits. [The traveling salesman problem — branch and bound method] (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Вдовин Владимир Николаевич – т.ғ.к., аға оқытушы «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ

Вдовин Владимир Николаевич – к.т.н, старший преподаватель НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева»

Vdovin Vladimir – Cand. of Tech. Sci., Senior Lecturer, NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university»

e-mail: vnvdovin@list.ru ,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8273-0212>



Машекенова Әсия Хасеновна – т.ғ.к., «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ Басқарма мүшесі – академиялық мәселелер жөніндегі проректор

Машекенова Асия Хасеновна – к.т.н., проректор по академическим вопросам НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева»

Mashekenova Asiya – Cand. of Tech. Sci., Member of the Board - Vice-Rector for Academic Affairs NJSC « D. Serikbayev East Kazakhstan technical university»

e-mail: amashekenova@edu.ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3556-3033>



Дүйсен Аяулым Ринатовна – ғылым магистрі «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ

Дүйсен Аяулым Ринатовна – магистр наук НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева»

Duisen Ayaulym – Master of Science NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university»

e-mail: arduisen@mail.ru



Suresh Alapati – Ph.D, Department of Mechatronics Engineering, Busan, South Korea

Suresh Alapati – Ph.D, Department of Mechatronics Engineering, Busan, South Korea

Suresh Alapati – Ph.D, in Mechanical Engineering, Department of Mechatronics Engineering, Busan, South Korea

e-mail: suresh@ks.ac.kr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1438-1954>






https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_3

XFTAP 36.33.01

АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ ЖЕРЛЕРІН БАҚЫЛАУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНДЕГІ ГАЖ ҚҰРАЛДАРЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІ

ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИС-ИНСТРУМЕНТОВ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ ЗЕМЛЯМИ

THE EFFECTIVENESS OF GIS TOOLS IN THE AGRICULTURAL LAND MONITORING AND MANAGEMENT SYSTEM

Ж.М. Жұматаева ^{1*}, Ж.К. Мукалиев ¹, Д.С. Оналбаева ²,
К.Ж. Касымханова ³, С.Р. Турганалиев ¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

³Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Жұматаева Жазира Манарбекқызы, e-mail: Zhazira.Zhumatayeva@kaznu.kz

Түйінді сөздер:

геоақпараттық жүйелер,
ауылшаруашылық
алқаптары, жер
мониторингі, кеңістіктік
талдау, қашықтықтан
зондтау, жерге
орналастыру, ресурстарды
басқару,
жерді қашықтықтан
зондтау.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақала Абай облысы мен Шығыс Қазақстан облысының мысалында ауыл шаруашылығы жерлерін мониторингілеу мен басқарудағы геоақпараттық құралдардың тиімділігін бағалайды. Топографиялық негіз, сандық топырақ карталары және Sentinel-2 спутнигінің деректері бірыңғай геобазаға біріктірілген: шынайы түсті композиттер және нормаланған айырмашылық вегетациялық индексі (NDVI), сондай-ақ ауылшаруашылық жамылғысының тақырыптық картасы. Әдістеме атмосфералық кедергілерді бүркемелеуді, маусымдық композиттерді құруды, жерді пайдалану кластары мен топырақ типтері бойынша NDVI аймақтық статистикасын, сондай-ақ процестің тиімділік критерийлерін (дәлдік, тиімділік, еңбек сыйымдылығы, интероперабельділік) қамтиды. Агростресс аймақтары мен айырмашылықтарын анықтайтын аграрлық ландшафттардың жай-күйінің карталары мен басқару қоймалары алынды «егістік алқаптары» және «жайылымдардың деградациясы». Ғылыми жаңалық цифрлық топырақ карталарын өзектендіру үшін спутниктік индикаторлар мен топырақ зоналығының тәжірибеге бағытталған интеграциясынан тұрады. Практикалық маңыздылығы – жаңартулардың қайталанатын регламентінде және деректердің басқаруда қолдануға дайындығында.

Ключевые слова:

геоинформационные
системы, сельскохозяй-
ственные угодья,

АННОТАЦИЯ

Статья оценивает эффективность геоинформационных инструментов в мониторинге и управлении сельхозземлями на примере Абайской области и Восточно-Казахстанской области.



мониторинг земель,
пространственный анализ,
дистанционное
зондирование,
землеустройство,
управление ресурсами,
дистанционное
зондирование Земли.

Топографическая основа, цифровые почвенные карты и данные со спутника Sentinel-2 объединены в единую геобазу: композиты истинного цвета и индекс нормированной разности вегетации (NDVI), а также тематическая карта сельскохозяйственного покрова. Методология включает маскировку атмосферных барьеров, создание сезонных композитов, региональную статистику NDVI по классам землепользования и типам почв, а также критерии эффективности процесса (точность, эффективность, трудоемкость, интероперабельность). Получены карты состояния и управленческие хранилища аграрных ландшафтов, определяющие зоны агростресса и различия между «пахотные земли» и «деградация пастбищ». Научное открытие заключается в практико-ориентированной интеграции спутниковых индикаторов и почвенной зоны для актуализации цифровых почвенных карт. Практическая значимость заключается в воспроизводимости обновлений и готовности данных к использованию в управлении.

Keywords:

geographic information systems, agricultural lands, land monitoring, spatial analysis, remote sensing, land management, resource management, remote sensing of the Earth.

ABSTRACT

The article evaluates the effectiveness of geoinformation tools in monitoring and managing agricultural lands using the example of the Abai region and the East Kazakhstan region. The topographic base, digital soil maps and data from the Sentinel-2 satellite are combined into a single geobase: true-color composites and the index of normalized vegetation difference (NDVI), as well as a thematic map of agricultural cover. The methodology includes the masking of atmospheric barriers, the creation of seasonal composites, regional NDVI statistics on land use classes and soil types, as well as criteria for the effectiveness of the process (accuracy, efficiency, labor intensity, interoperability). State maps and management repositories of agricultural landscapes have been obtained, defining the zones of agrostress and the differences between "arable land" and "pasture degradation". The scientific discovery consists in the practice-oriented integration of satellite indicators and the soil zone for updating digital soil maps. The practical importance lies in the reproducibility of updates and the availability of data for use in management.

КІРІСПЕ

Жеделдетілген Климаттық ауытқулар және антропогендік жүктеменің артуы ауылшаруашылық жерлерінің өнімділігінің кеңістіктік гетерогенділігін күшейтеді және басқару шешімдерін қабылдауды қиындатады. Спутниктік бақылауларды, топографиялық және топырақ деректерін біріктіретін географиялық ақпараттық жүйелер мониторинг пен жоспарлаудың негізгі құралына айналды, бірақ олардың континентальды климат пен аймақтың жерді пайдалану мозаикасы жағдайында нақты тиімділігі жеткілікті зерттелмеген. Соңғы жылдардағы басылымдар агроландштейндерді картаға түсіру үшін өсімдік индекстері мен оқытылатын классификациялардың әлеуетін көрсетеді, бірақ көбінесе бір маусыммен шектеледі, топырақтың аудандастырылуын нашар ескереді және нәтижелерді басқарушылық қоймаларға жарамды бірыңғай дерекқорға сирек біріктіреді. Демек, гипотеза: спутниктік белгілерді (шынайы түсті Sentinel-2 композиттері және нормаланған айырмашылық вегетациялық индексі), ауылшаруашылық жамылғысының тақырыптық қабатын және цифрлық топырақ карталарын бірлесіп талдау агроландштейндердің жай-күйін бағалаудың объективтілігін арттыруға және қорытындыларды басқару үшін операциялық етуге мүмкіндік береді.

Зерттеудің мақсаты – Абай облысы мен Шығыс Қазақстан облысының мысалында ауыл шаруашылығы жерлерін мониторингілеу және басқару үшін геоақпараттық

құралдар жиынтығының тиімділігін бағалау. Міндеттері: (1) топо-негізді, топырақ полигондарын және спутниктік деректерді бірыңғай геобазаға біріктіру; (2) шынайы түсті композиттер мен NDVI индексі негізінде маусымдық карталарды салу және верификациялау; (3) ауыл шаруашылығы жамылғысының сыныптары мен топырақ түрлері бойынша NDVI аймақтық статистикасын орындау; (4) басқару қоймалары мен өлшемдерін қалыптастыру тиімділік (дәлдік, жеделдік, еңбек сыйымдылығы, интероперабельділік); (5) нәтижелердің мониторингтің жиынтық өнімі ретінде цифрлық топырақ карталарын қалай нақтылайтынын және өзектендіретінін көрсету.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

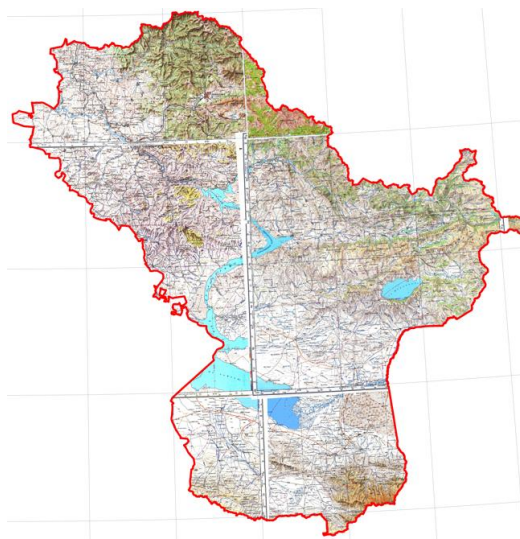
Зерттеу нысандары Абай облысы мен Шығыс Қазақстан облысының (ШҚО) ауыл шаруашылығы алқаптары болып табылады. Екі аумақ та континенттік климатымен ерекшеленеді, бірақ орографиялық құрылымы мен ылғалдылығының айырмашылығын көрсетеді: Абай облысы басым құрғақ үстірттер мен бассейндермен ұсынылған, ал ШҚО биіктік зоналылығы айқын тау бөктеріндегі белдеуді қамтиды. Бұл аймақтарды әдіснамалық тұрғыдан салыстыруға және сонымен бірге агроландштейндердің өнімділігіне әсер ететін факторларға қарама-қайшы етеді.

Барлық аудандар мен геометриялық есептеулер QazTRF-23; веб-ұсыну үшін – EPSG:4326/3857 (1, 2-сурет).



1-сурет. Абай облысының
топографиялық негізі

Ескерту – авторлар құрастырған



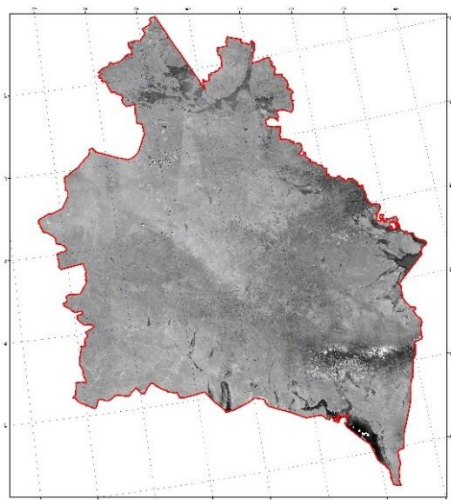
2-сурет. Шығыс Қазақстан облысының
топографиялық негізі

Спутниктік деректер. Sentinel-2 L2A (Copernicus), 10-20 м, екі аймақ үшін де 2025 жылдың 01-30 маусымында бір бақылау терезесі; CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE \leq 40 % кезінде Copernicus Browser арқылы таңдау (3, 4-суреттер). Арналар: B2, B3, B4, B8 және SCL сапа қабаты.

Бір номенклатураға (FAOSOIL, DOMSOIL, PHASE, MSC, AREA_HA) қалыпқа келтірілген екі аймақтың сандық топырақ карталары (вектор). Әкімшілік шекаралар. Жинақтарды біріктіру үшін Абай облысы мен ШҚО аудандарының заманауи шекаралары.

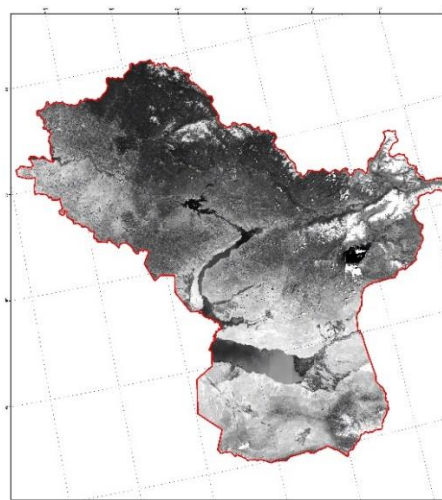
Көріністерді таңдау және SCL маскировкасы екі аймақ үшін де бірдей орындалды. True Color композиттері және NDVI есебі бірдей параметрлермен қалыптасты (медиана,

гистограмманы созу; NDVI формуласы), экспорт — GeoTIFF/COG, 10 м.бұл салыстыру кезінде әдістемелік өзгерістерді болдырмайды (Khanal et al., 2020).

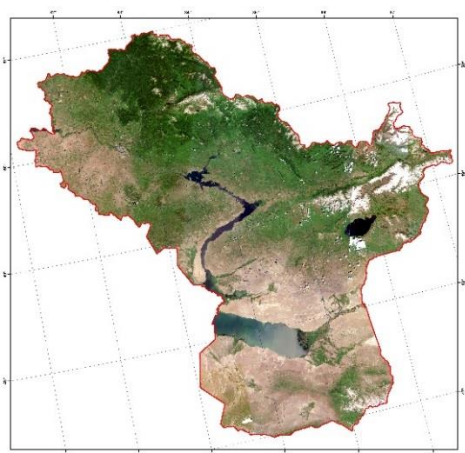


3-сурет. Абай облысының спутниктік деректері Sentinel-2 L2A

Ескерту – авторлар құрастырған

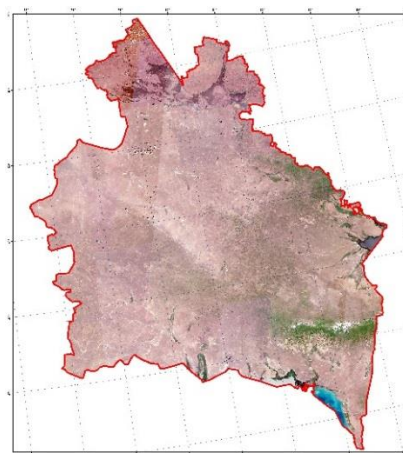


4-сурет. ШҚО-ның спутниктік деректері Sentinel-2 L2A



5-сурет. ШҚО-ның Sentinel-2_L2A_True_Color көрінісі

Ескерту – авторлар құрастырған



6-сурет. Абай облысының Sentinel-2_L2A_True_Color көрінісі

Топырақ деректерін дайындау және қалыпқа келтіру (екі жиынтық үшін). Сканерлеу геореференциясы және векторлау бір хаттама бойынша орындалды ($RMS \leq \pm 1,5$ пикс.; полигонды қосу шегі $\geq 0,5$ га; st_isvalid топологиясы) (Karmakar et al., 2024). Екі аймақтың атрибутикасы ортақ атрибуттары (FAO кодтары, фазалар, механикалық құрам) келтірілген, бұл «топырақ түрі \times жерді пайдалану» кросс-аналитикасын жүргізуге мүмкіндік береді.

NDVI аймақтық статистикасы: (i) Agriculture сыныптары бойынша, (ii) екі облыстың әр ауданының ішінде агрегациясы бар топырақ полигондары бойынша есептелді. Көрсеткіштер: орташа, медиана, SD, Q1-Q3, NDVI үлесі $< 0,35$ және $NDVI > 0,60$. Overlay: soils \times agriculture және admin units бойынша жинақтау (Vtar et al., 2020).

Overlay soils_poly × agriculture_2025 Абай облысы мен ШҚО үшін бөлек орындалды, содан кейін көрсеткіштер бірдей топырақ кластары мен жер типтері деңгейінде салыстырылды (Rafikov et al., 2024).

Бірыңғай маусымдық терезе және бірдей өңдеу параметрлері; үйлесімді Agriculture және FAO аңыздары; «топырақ түрі × жер түрі» бойынша аумақтық нормалау және стратификация; орографиялық позицияны есепке алу (Жайылма/еңіс/су алабы); қажет болған жағдайда параметрлік емес сынақтар (Mann–Whitney, $p < 0,05$).

НӘТИЖЕЛЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Агроландрафттардың жай-күйін жан-жақты талдау және жерді пайдалануды оңтайландыру үшін сандық және сапалық көрсеткіштерді қамтитын интеграцияланған деректер базасын қалыптастыру қажет (Frimpong et al., 2023). Мұндай базаға қойылатын маңызды талап-ақпаратты графикалық (картографиялық) түрде визуализациялау мүмкіндігі.

Бұл мәселелерді шешудің ең тиімді құралы-әртүрлі сипаттағы кеңістіктік деректерді біріктіруге және талдауға мүмкіндік беретін геоақпараттық модель. Осы модельді пайдалану ауыл шаруашылығы алқаптарының бөлінуі, су ресурстарының жай-күйі, жер бедері, сондай-ақ аграрлық Ландшафттардың өнімділігіне әсер ететін басқа да параметрлер туралы мәліметтерді қамтитын егжей-тегжейлі картографиялық материал алуды қамтамасыз етеді (Sun et al., 2022).

Сонымен қатар, геоақпараттық модель кеңістіктік талдау жүргізуге, заңдылықтарды анықтауға, жерді пайдалану сценарийлерін модельдеуге және агроэкологиялық жоспарлау саласында негізделген шешімдер қабылдауға мүмкіндік беретін кең аналитикалық мүмкіндіктерге ие (Saha et al., 2019).

Жер ресурстарын пайдаланудың жай-күйі мен тиімділігін бағалау құралы ретінде модель 1-кестеде көрсетілген логикалық құрылымдалған ақпараттық блоктарды қамтиды.

1-кесте. Логикалық құрылымдалған ақпараттық блок

Кезең	Графикалық	Атрибуттық	Есептеу-аналитикалық
Мақсаты	Аймақты картографиялық моделдеу үшін бастапқы кеңістіктік ақпаратты жинау және жүйелеу	Кеңістіктік талдауға қажет статистикалық, сандық және сапалық сипаттамаларды жинау	Жер ресурстарын пайдалану тиімділігін бағалау және шешім қабылдауды қолдау
Кіріс деректер/ көздер	Спутниктік суреттер; әуе түсірілімдері; геодезиялық және спутниктік позициялау жүйелері; заманауи және мұрағаттық жоспарлы-картографиялық материалдар	Әкімшілік/салалық деректер; жер учаскелері реестрлері; жер сапасы мен көрсеткіштері; далалық тексерістер	Графикалық және атрибуттық қабаттар; индекстер (NDVI, NDWI, MSI т.б.); регламенттік нормалар
Пішімдер мен құралдар	Векторлық (shp, gdb), GRID (растор), TIN (үшбұрышты тұрақты емес желі), аналогтық (қағаз)	Кестелік БҚ (DBMS), CSV/Excel; геодеректер базасы (GDB/PG); метадеректер	ГАТ/ҚЗА әдістері (оверлей, буфер, интерполяция, қайта жіктеу, модель құру); картографиялық диаграммалар
Негізгі әрекеттер	Геодеректерді цифрлау, геореферлеу, проекциялау; векторлау; растор/вектор конверсиясы; базалық қабаттарды дайындау	Деректерді біріктіру (join/relate); тазалау және валидация; кодтау/классификация; метадерек толтыру	Көрсеткіштерді есептеу; салыстыру және интеграция; заңдылықтарды анықтау; картографиялық визуализация

1-кестенің соңы

Кезең	Графикалық	Атрибуттық	Есептеу-аналитикалық
Шығыс/ нәтиже	Ауданның базалық картасы: шекаралар, гидрография, жолдар, ЖЖҚ және т.б. қабаттар	Атрибуттық мәліметтер базасы – әр полигон/объект үшін толық сипаттамалар	Талдау карталары, рейтингтер, есептер, ұсыныстар
Бағалау өлшемдері	Геометриялық дәлдік; проекцияның бірізділігі; қабаттардың толықтығы	Деректердің өзектілігі, сенімділігі; кодтардың сәйкестігі; бос мәндердің үлесі	Модель дәлдігі; сезімталдық/робастылық; визуалдың түсініктілігі; шешімге әсері
<i>Ескерту – авторлар құрастырған</i>			

Аграрлық Ландшафттардың жай-күйін кешенді бағалау және жерді пайдалануды оңтайландыру үшін сандық және сапалық көрсеткіштерді қамтитын кеңістікке бағытталған мәліметтер базасын құру қажет (Sarmah et al., 2018). Мұндай база аграрлық аумақтарды визуализациялауды және кеңістіктік-уақыттық талдауды қамтамасыз етуге қабілетті геоақпараттық модельге біріктірілуі тиіс.

NDVI маусымдық композиттері 01-30.06.2025 үшін вегетациялық белсенділіктің тұрақты градиенттерін анықтайды (Hively et al., 2011). Жоғары мәндер жайылмаларға, приозерные кешендерге және ылғалданған шабындықтарға орайластырылған; төмен мәндер – суайрықтарға, эрозиялық-қауіпті беткейлерге және егістік жерлерді өңдеудің технологиялық фазаларында жалаңаш топырағы бар учаскелерге (Абай облысы мен ШҚО үшін NDVI карталарын қараңыз). Индекстің ауданішілік мозаикасы микрорельефтің, топырақ-гидрологиялық жағдайлардың және Жерді пайдаланудың ағымдағы фазасының үйлесімін көрсетеді.

NDVI — ді True Color-мен сәйкестендіру интерпретацияның дұрыстығын растайды: "жасыл" массивтер NDVI жоғарылаған аймақтармен визуалды түрде сәйкес келеді, ал жалаңаш/әлсіз тартылған беттер төмендейді. Agriculture маскасы ылғалдың жетіспеушілігіне немесе шамадан тыс жүктелуіне байланысты ықтимал агрострессмен (жайылым/шабындық) NDVI (дайындық/жинау кезеңіндегі егістік) төмен мәндерінің технологиялық себептерін бөлуге мүмкіндік береді (Ivlieva et al., 2020). NDVI/Agriculture жұптасқан терезелерінде жайылмаларда NDVI жоғары сыныптарының үлесі басым, ал су айдындарында төменгі және орта сыныптар басым.

Agriculture маскасының астындағы NDVI айырмашылықтарды көрсетеді (7,8-сурет):

Егістік бізде NDVI медианалары төмен және өзгермелі (өрістерді өңдеудің әр түрлі фазалары); NDVI пикселдерінің үлесі $< 0,35$ құрғақ аудандарда және үстірттерде жоғарылайды.

Шабындықтар болса тұрақты NDVI медианалары; жауын-шашыннан кейін батпақты жерлерде жоғары интерквартильді диапазон байқалады (Shekhar et al., 2022).

Жайылымдар су айдындарында және жайылым жүктемесі жоғары аудандарда $NDVI < 0,35$ үлесінің жоғарылауы; жоғары мәндегі жергілікті "дақтар" төмендеу немесе жасанды суару тесіктерімен сәйкес келеді (Sivakumar et al., 2023).

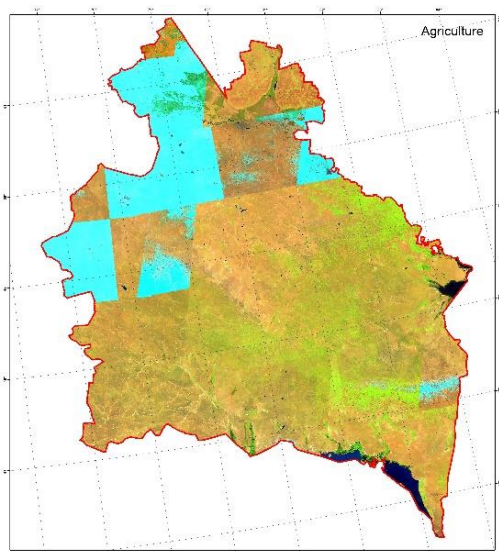
Аудандар бойынша негізгі айырмашылықтарды агротехниканы (жұмыс күнтізбесін), микрорельефті және топырақ кесіндісін ескере отырып түсіндірген жөн. Абай облысы мен Шығыс Қазақстан облысының (ШҚО) топырақ карталары өнімділіктің түбегейлі әртүрлі табиғи алғышарттарын белгілейді.

Абай облысы үстірттерде және тау аралық бассейндерде каштан және ашық каштан кешендері басым, құмды және сазды жерлер бар. Бұл комбинациялар ылғал сыйымдылығын шектейді және вегетациялық белсенділіктің төмен "фонна" әкеледі.

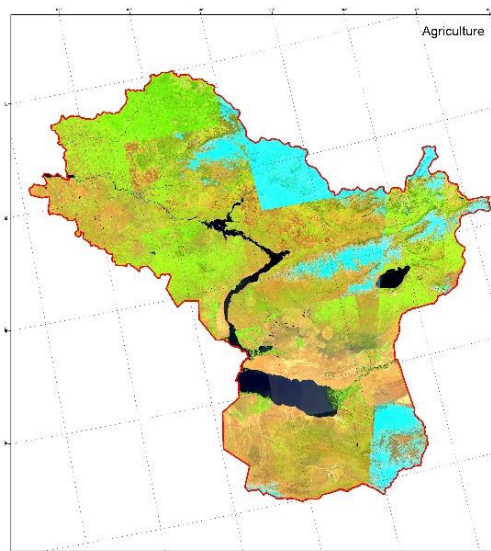
ШҚО-сы айқын тау бөктеріндегі мозаика: ірі өзендердің жайылмаларындағы аллювиалды кешендер және тау бөктеріндегі Топырақтың құрамы жағынан ауыр. Бұл

құрылым ылғалмен қамтамасыз етуді арттырады және Маусымда өсімдік индексінің тұрақты жоғары мәндеріне жағдай жасайды.

Топырақ зоналылығы өсімдік потенциалының айырмашылықтарын алдын ала белгілейді: аллювий және ауыр саздақтар көбінесе индекстің жоғары мәндерімен, жеңіл және тұзды кешендермен-төмендетілген және өзгермелі.



7-сурет. Абай облысының Agriculture
Ескерту – авторлар құрастырған



8-сурет. ШҚО-ның Agriculture

Agriculture индексі қабаты салыстырылатын аймақтардағы ауылшаруашылық жерлерінің конфигурациясындағы айқын айырмашылықтарды анықтады (7, 8-суреттер) (Nie & Yang, 2021).

Абай облысында (7-сурет) үстірттермен және тау аралық ойпаттармен шектесетін іріактам егістік алқаптары басым, ал жайылымдар мен шабындықтар мозаикалық кірістірулерді құрайды. Мұндай орналасу технологиялық терезелерде топырақтың қысқа мерзімді жалаңаштануы бар учаскелердің үлесін арттырады және сәйкесінше осы кезеңдерде өсімдік индексінің төмен мәндерінің пайда болуы ықтималдығын арттырады.

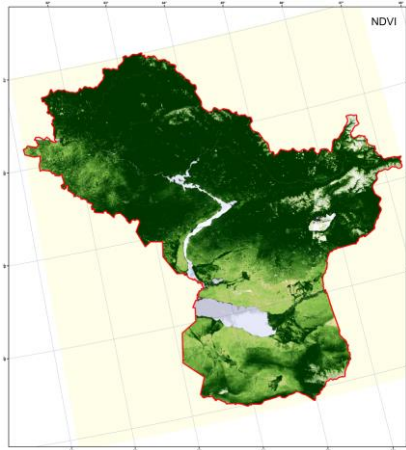
Шығыс Қазақстан облысында (ШҚО) (8-сурет) ауыл шаруашылығы жамылғысы жайылмалар мен тау бөктеріне қарай тартылады және ішкі біртектілігімен сипатталады. Ылғалданған жер бедерінің болуы (аңғарлар, шлейфтер, Приозер аймақтары) жаздың басында да тұрақты вегетациялық белсенділікке жағдай жасайды.

Егістік үшін маусымдық терезеде индекстің төмен мәндері ең алдымен агротехнологияның фазаларын (дайындық, бу) есепке алуды қажет етеді. Жайылымдар мен шабындықтар үшін тұрақты төмен мәндер агроэкологиялық стрессті (ылғалдың жетіспеушілігі, шамадан тыс жүктеме, шөптің деградациясы) көрсетеді.

NDVI-дің 01-30.06. 2025 маусымдық композициялары жерді пайдалану мен рельефке сәйкес заңдылықтарды көрсетеді (9, 10-суреттер).

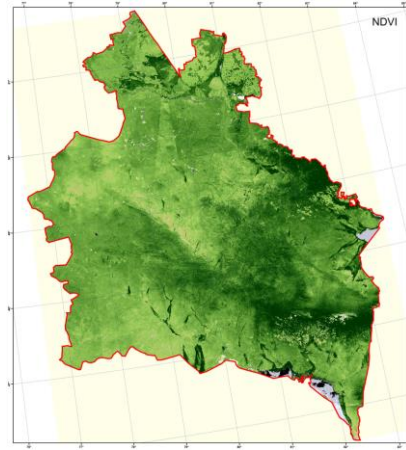
ШҚО-да ең жоғары мәндер ірі су ағындарының жайылмаларына және тау бөктеріндегі шабындықтарға орайластырылған; индекстің ауданішілік өзгергіштігі биіктік зоналылығына және беткейлердің қарама-қарсы экспозициясына байланысты жоғары.

Абай облысында фон тегіс және орташа/төмен мәндерге ауысады: үстірттер мен бассейндерде белсенділігі төмен учаскелер басым, ал жоғары мәндегі «аралдар» су объектілері мен суармалы алқаптарда локализацияланған.



9-сурет. ШҚО-ның NDVI

Ескерту – авторлар құрастырған



10-сурет. Абай облысының NDVI

Негізгісінен Абай облысындағы тұрақты төмен NDVI кластары жайылымдық үстірттермен және жеңіл/сортаң топырақтармен кеңістікте сәйкес келеді; ШҚО - да олар көбінесе топырақ профилінің қуаты мен ылғал сыйымдылығы шектелген беткей позициялармен байланысты (Padhiary et al., 2024).

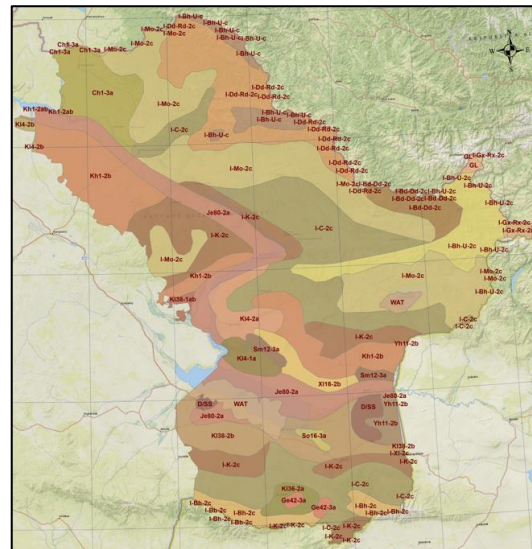
Топырақ карталары анықталған қарама-қайшылықтардың табиғатын нақтылайды. Абай облысында (11-сурет) құмды және сортаңды учаскелердің қосындылары бар каштан және ашық-каштан кешендері басым. Бұл комбинациялар ылғалдың төмен сыйымдылығымен сипатталады және су айдындарында NDVI орташа төмен мәндерінің басым болуын түсіндіреді.

ШҚО-да (12-сурет) аңғарлар мен тау бөктеріндегі аллювиалды және одан да ауыр кешендердің үлесі жоғары; олар маусымдық терезеде тұрақты жоғары NDVI мәндерін сақтайды және қысқа қашықтықта кескіндеменің мозаикасын күшейтеді.



11-сурет. Абай облысының
топырақ картасы

Ескерту – авторлар құрастырған



12-сурет. ШҚО-ның
топырақ картасы

Топырақ зоналылығы өсімдіктердің "әлеуетін" анықтайды: аллювиалды/ауыр сазды қалыңдықтар көбінесе NDVI жоғары маусымдық мәндеріне сәйкес келеді; жеңіл және тұзды кешендер — төмендетілген және өзгермелі.

Білағал факторы және рельефтегі позиция. ШҚО жайылмалар мен тау бөктерінің дамыған желісіне ие бола отырып, NDVI жоғары аумақтардың үлкен үлесін және неғұрлым айқын ішкі масштабты мозаиканы көрсетеді. Абай облысында үстірттер мен жеңіл топырақтардың басым болуы орташа-төмен мәндердің кең өрістерін қалыптастырады.

Егістікте төмен NDVI көбінесе фазалық (технологиялық жалаңаштау), жайылымдарда — мүмкін агрострессінің көрсеткіші (Kingra et al., 2016). Жайылмалардағы шабындықтар индекс интервалдарын калибрлеу үшін жоғары белсенділіктің жергілікті "стандарттары" бола алады.

Абай облысы: NDVI мәндері тұрақты төмен жайылымдық үстірттерге жүктемені реттеуді көздеу, сумен қамтамасыз ету бойынша нүктелік іс-шараларды (суағарлар, микро тоғандар) іске асыру, сондай-ақ осал учаскелерде жергілікті эрозияға қарсы тәжірибелерді енгізу.

ШҚО-да баурайдағы жайылымдарды басқару (контурлық ұйымдастыру, жайылымды шектеу) және жайылмалы шабындықтарды өнімділігі жоғары тұрақты аймақтар ретінде ұстау. Екі аймақтағы егістік жерлер үшін-технологиялық "терезелердің" әсерін болдырмайтын көп қабатты қатарлар бойынша бағалау.

Интерпретация 2025 жылдың маусымдық терезесіне жатады және сезімтал: (I) валидті пиксель маскасының сапасы, (II) белгілі бір маусымның ауа-райы, (III) Agriculture қабатының өзектілігі және (IV) визуализация шектерін таңдау. Басқарушылық тұжырымдар үшін көпжылдық салыстырмалы терезелерге және жерді пайдалану қабаттарын үнемі жаңартып отыруға сүйенген жөн.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу біртұтас технологиялық контурға негізделген ауылшаруашылық жерлерін бақылау және басқару мәселелерін шешуде ГАЗ құралдарының тиімділігін көрсетті: Sentinel-2 L2A → ГАЗ-да өңдеу → Agriculture маскасының астындағы индекстеу (NDVI) → цифрлық топырақ карталарымен қиылысу → басқару қорытындылары. Екі қарама-қарсы өңір үшін (Абай облысы және Шығыс Қазақстан облысы) бірыңғай және жаңғыртылатын ГАЗ-рәсім нәтижелердің салыстырмалылығын, интерпретациялардың ашықтығын және операциялық қолданыстылығын қамтамасыз ететіні көрсетілген.

Іс жүзінде ГАЗ не береді (жұмыста тексерілген):

- Жылдамдық және масштабтау. Sentinel-2-ді автоматтандырылған құрастыру және өңдеу салыстырмалы карталарды (True Color, NDVI, Agriculture) маусымдық терезелерге көп уақытты қажет етпестен алуға мүмкіндік береді.

- Түсіндіру дәлдігі. NDVI-дің ауылшаруашылық және топырақ карталарымен кеңістіктік үйлесуі жалған тұжырымдардың санын азайтады (егістіктің технологиялық жалаңаштығын жайылым/шабындық агрострестен бөледі; топырақ пен ландшафт шектеулерін ескереді).

- Басқарушылық утилиты. Карталар мен аналитика қолданбалы өнімдерге оңай ауысады: "проблемалы" өрістер/жайылымдар тізбесі, Мелиорация және сумен қамтамасыз ету кезектілігі, беткейлік учаскелер үшін контурлық ұсыныстар.

- Үнемділік. Ашық Copernicus деректерін және типтік ГАЗ операцияларын пайдалану жеткілікті егжей-тегжейлерді (10-20 м) сақтай отырып, бақылау шығындарын азайтады.

Тиімділікке байлам арқылы қол жеткізілетін агроландшпейндердің жай-күйін бағалау регламенті ұсынылды: NDVI (жылдам индикатор ретінде) + Agriculture (жерді пайдалану контексті) + цифрлық топырақтар (аумақтардың әлеуеті).

ГАЗ құралдары табиғи жағдайды (топырақ, рельеф, ылғалдылық) технологиялық (өңдеу фазасынан) қалай бөлетінін көрсететін бірыңғай маусымдық терезеде аймақаралық салыстыру жүргізілді.

Тұрақты мониторинг пен ведомстволық есептілікке жарамды қайталанатын ГАЗ процедуралары мен карталар жиынтығы құрылды.

Нәтижелер: (I) басқарушылық іс-қимылдарға басымдық беру үшін (жайылымдық жүктемені реттеу, жергілікті мелиорация, суармалы жерлер), (II) "технологиялық терезелерді" ескере отырып, далалық жұмыстарды жоспарлау үшін, (III) жер пайдаланудың цифрлық топырақ және тақырыптық карталарын жыл сайын жаңарту үшін қолданылуы мүмкін. Құралдар жинағы корпоративтік ГАЗ және веб-бақылау қызметтерімен үйлесімді.

Деректерді дұрыс жинақтап, нәтижелерді контекстке сай түсіндірген жағдайда ГИС-құралдары ауылшаруашылық жерлерін жедел, қайталамалы және экономикалық жағынан тиімді мониторингілеуді қамтамасыз етіп, табиғи әрі технологиялық әртекстілік жағдайында басқарушылық шешімдерді негіздеуді күшейтеді.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ

ХАБАРЛАМА: Ғылыми мақалалардың авторлары өз еңбектерін дайындау барысында жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын қолданбады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Frimpong, B. F., Koranteng, A., Atta-Darkwa, T., Junior, O. F., & Zawila-Niedzwiecki, T. (2023). Land cover changes utilising Landsat satellite imageries for the Kumasi metropolis and its adjoining municipalities in Ghana (1986–2022). *Sensors*, 23, 2644. <https://doi.org/10.3390/s23052644>
- Hively, W. D., McCarty, G. W., Reeves, J. B., Lang, M. W., Oesterling, R., & Delwiche, S. R. (2011). Use of airborne hyperspectral imagery to map soil properties in tilled agricultural fields. *Applied and Environmental Soil Science*, 2011, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2011/358193>
- Ivlieva, N. G., Manuhov, V. F., & Alferina, A. V. (2020). Cartographic and geoinformation support of soil and agrochemical research (on the example of a separate agricultural enterprise). *InterCarto. InterGIS. Geoinformation support for sustainable development of territories: Proceedings of the International Conference*, 26(2), 41–53. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-41-53>
- Joiner, J., Yoshida, Y., Anderson, M. C., Holmes, T., Hain, C., Reichle, R. H., Koster, R. D., Middleton, E. M., & Zeng, F. (2018). Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales. *Remote Sensing of Environment*, 219, 339–352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.020>
- Karmakar, P., Teng, S. W., Murshed, M., Pang, P., Li, Y., & Hao, L. (2024). Crop monitoring by multimodal remote sensing: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33, 101093. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101093>
- Khanal, S., Kushal, K. C., Fulton, J. P., Shearer, S., & Ozkan, E. (2020). Remote sensing in agriculture—accomplishments, limitations, and opportunities. *Remote Sensing*, 12, 3783. <https://doi.org/10.3390/rs12223783>
- Kingra, P. K., Majumder, D., & Singh, S. P. (2016). Application of remote sensing and GIS in agriculture and natural resource management under changing climatic conditions. *Agricultural Research Journal*, 53, 295–302. <https://doi.org/10.5958/2395-146X.2016.00058.2>
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to

- topographic effects: A case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11), 2636–2651. <https://doi.org/10.3390/s7112636>
- Nie, J., & Yang, B. (2021). A detailed study on GPS and GIS enabled agricultural equipment field position monitoring system for smart farming. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 22. <https://doi.org/10.12694/scpe.v22i2.1882>
- Padhiary, M., Kumar, R., & Sethi, L. N. (2024). Navigating the future of agriculture: A comprehensive review of automatic all-terrain vehicles in precision farming. *Journal of The Institution of Engineers (India) Series A*, 105, 767–782. <https://doi.org/10.1007/s40030-024-00816-2>
- Saha, A., Patil, M., Goyal, V. C., & Rathore, D. S. (2019). Assessment and impact of soil moisture index in agricultural drought estimation using remote sensing and GIS techniques. *Proceedings*, 7, 2. <https://doi.org/10.3390/ecws-3-05802>
- Sarmah, K., Deka, C. R., Sharma, U., & Sarma, R. (2018). Role of GIS-based technologies in sustainable agriculture resource planning & management using spatial decision support approach. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*, 5, 30–34.
- Shekhar, S., Gusain, R., Vidhyarthi, A., & Prakash, R. (2022). Role of remote sensing and GIS strategies to increase crop yield. In *2022 International Conference on Advances in Computing, Communication and Materials (ICACCM)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACCM56405.2022.10009217>
- Sivakumar, V. G., Vijaya Baskar, V., Vadivel, M., Vimal, S. P., & Murugan, S. (2023). IoT and GIS integration for real-time monitoring of soil health and nutrient status. In *2023 International Conference on Self Sustainable Artificial Intelligence Systems (ICSSAS)* (pp. 1265–1270). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSAS57918.2023.10331694>
- Sun, T., Cheng, W., Abdelkareem, M., & Al-Arifi, N. (2022). Mapping prospective areas of water resources and monitoring land use/land cover changes in an arid region using remote sensing and GIS techniques. *Water*, 14, 2435. <https://doi.org/10.3390/w14152435>
- Yang, X., & Kuang, H. (2022). Evaluation of ecological quality in southeast Chongqing based on modified remote sensing ecological index. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19851-9>
- Rafikov, T., Zhumatayeva, Z., Mukaliyev, Z., & Zhildikbayeva, A. (2024). Evaluating Land Degradation in East Kazakhstan Using NDVI and Landsat Data. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 19(5), 1677–1686. <https://doi.org/10.18280/ijdne.190521>
- Vtar, R., Komolafe, A. A., Kouser, A., et al. (2020). Assessing sustainable development prospects through remote sensing: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100402. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100402>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Жұматаева Жазира Манарбекқызы – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан,

Жұматаева Жазира Манарбекқызы – магистр естественных наук, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан,

Zhumatayeva Zhazira – Master of Natural Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: Zhumatayeva.Zhazira@kaznu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6113-3614>



Мукалиев Жандос Кайратович – техника ғылымдарының магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан,

Мукалиев Жандос Кайратович – магистр технических наук, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан,

Mukaliyev Zhandos – Master of Technical Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: Zh.mukaliyev@kaznu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9292-7468>



Оналбаева Дарига Саятбековна – докторант; Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті; Алматы қ., Қазақстан,

Оналбаева Дарига Саятбековна – докторант; Казахский национальный аграрный исследовательский университет, г.Алматы, Казахстан,

Onalbayeva Dariga – doctoral student; Kazakh National Agrarian Research University; Kazakhstan,

e-mail: aslaiD@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5235-6601>



Касымханова Камила Женисовна – магистрантка; Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан,

Касымханова Камила Женисовна – студент магистратуры, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г.Алматы, Казахстан,

Kassymkhanova Kamila – Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: kamila-k@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6357-3545>



Тұрғаналиев Сәкен Рахматуллаевич – аға оқытушы; әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан,

Турганалиев Сакен Рахматуллаевич – старший преподаватель; Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан,

Turganaliyev Saken – Senior Lecturer; Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: S.Turganaliyev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8791-8495>

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_4

МРНТИ 73.31.11

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛОКАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАССИРОВКИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

АВТОМОБИЛЬ ЖОЛДАРЫНЫҢ КӨЛІК-ЛОГИСТИКАЛЫҚ ЖЕЛІЛЕРІН САЛУДАҒЫ ШАҒЫН БӨЛІКТЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ДЫҢ ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІ

GEOMETRIC MODELS OF LOCAL OPTIMIZATION OF TRACING TRANSPORT AND LOGISTICS NETWORKS OF HIGHWAYS

К.А. Куспеков  ^{1*}

¹Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

*Автор-корреспондент: Куспеков Кайырбек Амиргазыулы, k.kuspekov@satbayev.university

Ключевые слова:

Геометрическая модель,
конфигурация,
оптимизация, полярная
сеть Штейнера, расстояния,
полярная система
координат, полярная
метрика,
криволинейный
четырёхугольник.

АННОТАЦИЯ

Трассировка и построения оптимальной конфигурации сети являются одними из основных задач логистики. Статья посвящена совершенствованию методов дискретно-локальной оптимизации трассировки транспортно-логистических сетей автомобильных дорог. Основной целью является определение кратчайшего расстояния доставки грузов от места погрузки до места разгрузки, отвечающего предварительно заданным требованиям. Для решения задачи систематизированы и обобщены различные варианты геометрических моделей сети с полярной метрикой. Исходя из метода наименьшего удлинения, сформулирован и разработан алгоритм построения трассировки локальной сети для четырех пунктов. Трассировка сети принадлежит к экстремальным и классу NP-трудных задач дискретной оптимизации. Требуемая конфигурация сети достигается добавлением точки Штейнера. Алгоритм позволяет учитывать обход препятствия и построить кратчайший маршрут дороги. Построенная конфигурация сети состоит из радиальных отрезков и дуг окружностей. Суммарная длина отрезков дуг и окружностей должна быть минимальной.

Түйінді сөздер:

Геометриялық модель,
кофигурация,
оңтайландыру, Штейнердің
полярылық желісі,
қашықтық, полярылық
координаталар жүйесі,
полярылық метрика, қисық
Сызық төрбұрыш

ТҮЙІНДЕМЕ

Көлік-логистикалық желінің оңтайлы конфигурациясының моделін салу, логистиканың негізгі есептерінің бірі. Мақала автомобиль жолдарының көлік-логистикалық желілерінің шағын бөліктерін оңтайландыру әдістерін жетілдіруге арналған. Негізгі мақсат жүктерді тиеу орнынан түсіру орнына дейін жеткізу және алдын ала берілген талаптарды қанағаттандыратын ең қысқа полярылық желіні, қысқа қашықты жол салу. Есепті шешу үшін желілердің геометриялық модельдерінің әртүрлі нұсқалары жүйеленген және



© 2026 К.А. Куспеков

Данная работа распространяется на условиях лицензии Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

жалпыланған. Ең қысқа аралықты анықтау әдісін қолданып төрт нүктені жалғайтын желінің шағын бөліктерін салудың алгоритмі тұжырымдалған және жасалған. Желілерді салу дискретті оңтайландырудың экстремалды және NP-қиын есептер санатына жатады. Талапты қанағаттандыратын желінің конфигурациясы Штейнер нүктесін енгізу арқылы жүзеге асады. Алгоритм бөгеттерді айналып өтіп қысқа қашық жолдарды салуға септігін тигізеді. Салынған желінің конфигурациясы радиалды кесінділер мен шеңбер доғаларынан тұрады. Доғалар мен кесінділердің жалпы ұзындығы минималды болуы керек.

Keywords:

geometric model,
configuration, optimization,
Steiner polar network,
distances, polar coordinate
system, polar metric,
curved quadrilateral.

АБСТРАКТ

Tracing and building an optimal network configuration is one of the main tasks of logistics. The article is devoted to improving the methods of discrete local optimization of tracing transport and logistics networks of highways. The main goal is to determine the shortest distance of cargo delivery from the place of loading to the place of unloading that meets the specified requirements in advance. To solve the problem, various variants of geometric network models with a polar metric are systematized and generalized. Based on the method of least elongation, an algorithm for tracing a local network for four points is formulated and developed. Network tracing belongs to the extreme and class of NP-hard discrete optimization problems. The required network configuration is achieved by adding a Steiner point. The algorithm allows you to take into account the obstacle avoidance and build the shortest route of the road. The constructed network configuration consists of radial segments and arcs of circles. The total length of the arcs and circles should be minimal.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы и дальнейшее развитие рыночных отношений зависят от взаимодействия поставщика и потребителя. В контексте данных отношений решение вопроса своевременной доставки товаров и повышения ее качества остается открытым. Здесь важную роль играет логистика перевозок, которая занимается проблемами нахождения оптимальных маршрутов поставки грузов, удовлетворяющих социальные потребности потребителей и экономические выгоды поставщиков (Nerush, 2019). Так как время доставки грузов является важнейшим критерием логистики, при проектировании сети автомобильных дорог или ее реконструкции важнейшей задачей является нахождение кратчайшего пути маршрута. Поэтому государства в своих стратегических программах развития сети автомобильных дорог закладывают возможные перспективные пути дальнейшего ее развития. Соответственно этим показателям указываются объемы финансирования (Khalturin, 2011). Положительное решение таких задач логистики достигается разработкой и применением новых геометрических моделей сети автомобильных дорог. На практике геометрические модели отображают реальные маршруты и позволяют проанализировать другие варианты пути доставки грузов. Появляется возможность рассчитать другие критерии: скорость движения транспорта, расстояние между пунктами назначения и другие. Проблемы построения маршрутов транспортных средств в обход опасных участков пути показывают важность выбора оптимальной конфигурации сети дорог на примере и анализе дорожно-транспортных происшествий, случившихся в Спрингфилде в 2013–2018 годах (Герштейн, 2022). С учетом всех этих факторов можно выделить, что основным при практическом решении задачи трассировки транспортно-логистической сети автомобильных дорог является построение разветвленной конфигурации сети кратчайшей длины. Здесь важно построить возможные

объезды так называемых карстовых зон на пути, которые могут быть искусственного или природного происхождения. Геометрические элементы трассы с точки зрения длины, протяженности, а также расположения трассы на определенной поверхности рельефа влияют на ее строительную стоимость. При определении и выборе оптимальной конфигурации сети автомобильных дорог эффективно применять методы синтеза, позволяющие определять расстояния от начального пункта погрузки груза до конечного пункта доставки. В настоящее время широкое применение получил вероятностный метод дорожной карты PRM (Probabilistic Road Map), который позволяет построить трассу в обход препятствий на пути. Следует отметить, что этот метод применяется при проектировании магистральных трасс.

Методами теории графов разработан программный комплекс оптимизации маршрутов перемещения транспортных средств (Жигалов, 2020). В этой работе основным критерием является выбор кратчайшего маршрута транспорта от пункта погрузки до пункта доставки, учтены характеристики дорог топографической поверхности местности, координаты пунктов места погрузки и конечного пункта доставки. Здесь не рассматривается кривизна дорог как один из факторов, влияющих на оптимальность сети. В контексте анализа и решения вышеуказанных задач актуальным является совершенствование методов дискретно-локальной оптимизации трассировки распределительных сетей автомобильных дорог с применением построения геометрических моделей, позволяющих строить дороги с обходом препятствий, минимальной протяженности и определять формы оптимальной кривой в отдельных участках, удовлетворяющие требованиям проектирования.

Постановка задач. Проектирование автомобильных дорог включает несколько этапов. Важным из них является построение оптимальной конфигурации транспортно-логистической сети дорог. В результате трассировки определяется несколько вариантов областей маршрутов. На пути трассировки могут возникнуть ограничения в виде карстовых зон, тогда требуется выбрать другой маршрут или построить трассу в обход этих зон. Как известно, трассировка принадлежит к экстремальным и NP-трудным задачам дискретной оптимизации. Основной целью оптимизации сети является определение рациональных маршрутов доставки продуктов потребления от поставщиков к потребителям и достижение максимального коэффициента использования пробега автомобиля. В основу разрабатываемых геометрических моделей локальной оптимизации трассировки транспортно-логистических сетей должны быть положены следующие требования:

- геометрическая модель сети должна максимально отображать реальную трассировку дороги;
- конфигурация трассы должна отображать несколько вариантов маршрутов, соединяющих все заданные пункты назначения;
- наличие альтернативных трасс обхода карстовых зон;
- автомобильные дороги должны иметь минимальную строительную стоимость;
- разработанная конфигурация модели сети стратегически должна способствовать дальнейшему развитию дороги в плане застройки города.

Стоимость строительства и эксплуатации дорог зависит от рельефа топографической поверхности местности и от характеристики дорог, в первую очередь от длины участка дороги. Разработанная геометрическая модель и конфигурация трассировки сети позволяют проанализировать и выбрать дорогу, удовлетворяющую таким требованиям. Для решения проблемы рассматриваются криволинейные трассы с учетом обхода препятствий, которые можно аппроксимировать отрезками прямых и дуг окружностей. Строится конфигурация сети с полярной метрикой. Дискретная оптимизация локальной сети автомобильной дороги для заданных четырех пунктов состоит из этапов:

- 1) Определить количество дополнительно вводимых пунктов;
- 2) Определить координаты этих пунктов;
- 3) Построить линии, огибающие препятствия на пути и соединяющие заданные и дополнительно вводимые пункты;
- 4) Суммарная длина сети должна быть минимальной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Важность геометрических методов и графиков в вопросах оптимизации структуры автомобильных дорог обоснована в работе (Немчинов, 2016), где для практической реализации в проектировании и строительстве дорог предлагаются различные структуры трассировки сети в виде радиальной, радиально-кольцевой, прямоугольной, прямоугольно-диагональной, треугольной, комбинированной и других.

Оптимизация криволинейного участка, когда трассы состоят из прямолинейных участков и для сопряжения связывающих две точки применяются кривые типа параболы и окружности больших радиусов, описаны в (Плехова, 1998). Этот класс задач возникает при проектировании автомобильных дорог. В этих исследованиях рассматривается только оптимальная кривизна трассы, вляющая на различные ограничения при проектировании дорог.

Геометрические модели транспортных сетей логистики с евклидовой метрикой для пяти пунктов (Kuspekov, 2016) и для заданного множества пунктов с ортогональной и евклидовой метриками исследованы и описаны (Kuspekov, 2023). На практике проектирования сети логистики автомобильных дорог наряду с евклидовой и ортогональной метриками важное значение имеет применение полярных расстояний. При проектировании трассы дорог, особенно при определении кратчайшего пути в обход препятствий, удобно использовать геометрические модели, состоящие из отрезков прямых и дуг окружностей. Такие модели исследованы для физических пространств на плоскости с полярной метрикой (Есмуханов, Куспеков, 2005).

Рассмотрим задачу построения кратчайших дугорадиальных линий, соединяющих заданные точки M_1, M_2, M_3 и M_4 . Пусть в фиксированной области точками M_1, M_2, M_3 и M_4 имеются ограничения в виде различных препятствий на пути трассы. В такой постановке задачи предлагается применить топологию для четырех точек (Куспеков, 2011). Оптимальная конфигурация сети достигается добавлением дополнительной точки Штейнера по аналогии решения транспортных задач с ортогональной и евклидовой метриками. Точка Штейнера позволяет построить сеть минимальной длины и различные варианты соединения фиксированных точек в зоне подвижности сети. Точки соединяются радиальными и дуговыми отрезками окружности. Для построения оптимальной конфигурации автомобильных дорог и трассировки используем алгоритм, позволяющий построить кратчайшие линии, связующие заданное множество точек плоскости (Куспеков, 2023):

- 1 шаг. Вычисляются расстояния между всеми парами заданных точек.
- 2 шаг. Методом сравнительного анализа выбираются две точки M_i и M_j . Выбираем точки с наименьшими расстояниями. Соединяем эти точки, которые образуют кратчайшее дерево Штейнера, $КДШ_2$.
- 3 шаг. Сравниваем расстояние между группами из t точек и строим кратчайшее дерево Штейнера, образуется кратчайшее дерево $КДШ_t$.
- 4 шаг. Строим кратчайшее дерево Штейнера $КДШ_{t+1}$ для группы из $t+1$ точек.
- 5 шаг. Здесь требуется определить очередную $t+1$ точку, присоединяемую к дереву.
- 6 шаг. В общем случае к $КДШ_{t+1}$ присоединяется $КДШ_t$ (3 шаг) в деформированном виде.

7 шаг. Могут оказаться точки, не вошедшие в КДШ. При необходимости соединить такие две точки, которые расположены ближе друг к другу.

8 шаг. Такие точки могут образовать новые группы соединяемых точек, которые образуют новые кратчайшие поддеревья.

9 шаг. Кратчайшие поддеревья, образованные при 7 шаге, присоединяются друг к другу на основе ближайшего расстояния КДШ; при каждом отдельном шаге его построения.

10 шаг. Формируется конфигурация сети на плоскости, заданной точками M_1, M_2, M_3 и M_4 с карстовыми зонами на пути трассы. Строятся огибающие эти зоны линии в виде дуг окружности.

Такой подход является одним из рациональных способов выбора формы криволинейного участка трассы, соединяющего заданные точки в обход препятствий, в виде дуг окружности, позволяющий учитывать и другие критерии, предъявляемые к кривизне трассы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Для решения поставленной инженерно-экономической задачи строим полярную сеть Штейнера. Далее более подробно изучим различные пути дугорадиальных маршрутов, соединяющих две фиксированные точки в выбранной зоне подвижности сети. Для этого рассмотрим фиксированную полярную систему координат (Есмухан, Куспеков, 2005). На рисунке 1 изображены полюс O и полярная ось единичного отрезка $|Op|$. Если точка M данной плоскости не совпадает с полюсом O , тогда положения этой точки M описываются как $p = |OM|$, формула выражает расстояние, p и φ – полярные координаты точки M . Угол отсчитывается против часовой стрелки ($p > 0$). На рисунке 2 показаны возможные пути перемещения от точки M_1 к точке M_2 по дугам концентрических окружностей с центром в полюсе O и радиальным отрезкам. Как известно, полярный радиус p изменяется от нуля до бесконечности, а полярный угол φ – от нуля до 2π .

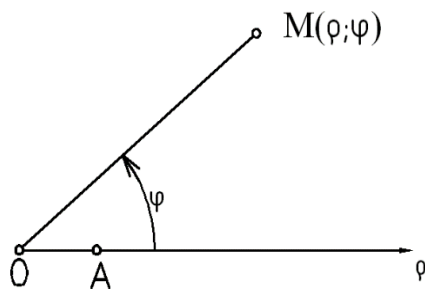


Рисунок 1. Точка M в полярной системе
Примечание – составлено автором на основе
(Есмуханов, Куспеков, 2005)

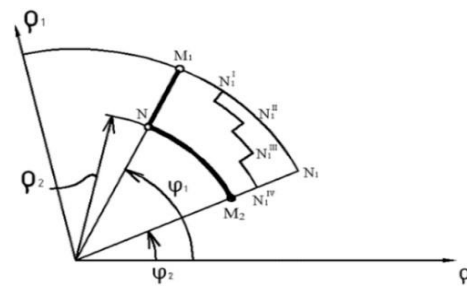


Рисунок 2. Дугорадиальные отрезки
Примечание – составлено автором на основе
(Есмуханов, Куспеков, 2005)

Рассмотрим возможные пути перемещения от точек M_1 и M_2 . Множество всех возможных линий, связывающих M_1 и M_2 , образует четырехугольник $M_1N^IVM_2N$, две стороны M_1N^I и NN^IV которого образуют дуги концентрических окружностей, а две стороны M_1N и N_1M_2 – отрезки прямых. Один из возможных путей $M_1N^I N' N_1'' N_1''' N_1'''' N^IV M_2$ показан на рисунке 2, он состоит из четырех дуг $M_1N_1^I, N^I N_1^I, N^{111} N_1^{111}, N^{111} N_4^{1V}$ и четырех радиальных отрезков $[N^I N_1], [N_1^{11} N^{11}], [N_1^{111} N^{111}], [N^IV M_2]$. Очевидно, что кратчайшая линия, связывающая точки M_1 и M_2 , состоит из отрезка $M_1 N$ прямой дуги NM_2 окружности, что выделено на рисунке 2 жирной линией. На плоскости

с полярной системой координат отметим четыре точки общего положения M_1, M_2, M_3 и M_4 . Координаты точек известны. Далее применим результаты проведенных исследований (Куспеков, 2011), где построены различные варианты топологии кратчайшего дерева для четырех точек с полярной метрикой. Проведенный анализ работ показал, что результаты данных исследований практически не применялись для изучения конфигурации транспортных сетей логистики. В таком контексте построение геометрической модели дискретно-локальной оптимизации сети логистики автомобильных дорог рассматривается с некоторыми условными ограничениями на пути трассировки дороги. Данную модель сети с полярной метрикой для четырех локальных точек и ее построенную конфигурацию на практике отражают изображения реальных сетей логистики автомобильных дорог. Если в полярной системе координат из центра O провести множество концентрических окружностей и радиальных прямых, образуется ортогональная полярная сеть.

На плоскости относительно фиксированной полярной системы координат заданы $q_1M_1 (\rho_1, \varphi_1)$; $q_2M_2 (\rho_2, \varphi_2)$; $q_3M_3 (\rho_3, \varphi_3)$; и $q_4M_4 (\rho_4, \varphi_4)$. Расположение точек общего положения показано на рисунке 3. Требуется построить оптимальную конфигурацию сети в виде кратчайшего дерева Штейнера, отвечающую заранее заданным требованиям в реальных условиях. Соединяем точки линией кратчайшей длины так, чтобы суммарная длина была минимальной. Весовые коэффициенты в заданных точках q_1, q_2, q_3 и q_4 имеют различные значения. На практике эти коэффициенты отражают различные экономические показатели. Далее соединяем точки радиальными и дуговыми отрезками. Образуется заштрихованная зона, назовем ее криволинейным четырехугольником с вершинами в точках $M_1N^I N^{II} N^{III}$. Допустим, в зоне подвижности сети имеется некоторое количество условных препятствий, так называемых карстовых зон, ограничивающих трассировку сети и маршрут движения. В обход этих массивов препятствий точки M_1, M_2, M_3 и M_4 можно соединить различными путями дугорадиальных отрезков и получить другие конфигурации кратчайшего дерева Штейнера – KD4. Задача построения заключается в поиске точек Штейнера.

Точки Штейнера N позволяют построить оптимальную конфигурацию сети и различные варианты соединения заданных точек. Рассмотрев и сравнив все варианты, необходимо выбрать конфигурацию сети, которая имеет минимальную суммарную длину, отвечающую предварительно заданным требованиям. С центром в точке O проведем дуговые отрезки M_3N^I и $N^{II} N^{III}$, а также радиальный отрезок M_4N . Данный подход позволяет построить множество криволинейных четырехугольников, что позволяет рассмотреть другие виды соединения точек. В нашем случае получается четыре криволинейных четырехугольника. Проведем построения сети:

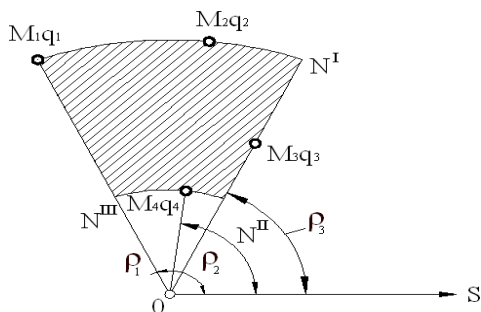


Рисунок 3. Зона подвижности сети с пунктами четырех пунктов $M_1M_2M_3M_4$
 Примечание – составлено автором на основе (Куспеков, 2011)

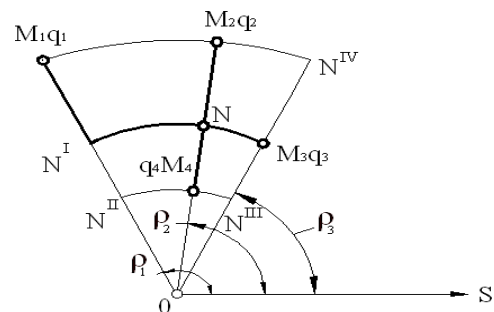


Рисунок 4. Конфигурация сети для препятствий с учетом условного обхода
 Примечание – составлено автором на основе (Куспеков, 2011)

1 шаг. В криволинейном четырехугольнике $M_3NM_4N^{111}$, рисунок 4, отрезок $M_4N=M_3N^{111}$, а отрезок M_4N^{111} меньше NM_3 . Соединяем точки кратчайшим расстоянием $M_3N^{111}M_4$, образуется KD_2 .

2 шаг. Сравниваем расстояние от отрезка $M_3N^{111}M_4$ (KD_2) до точек M_2M_1 . Точку M_3 соединяем с точкой M_4 через точку Штейнера N , образуется кратчайшее дерево KD_2 .

3 шаг. Сравниваем расстояние от KD_2 до точек M_1M_2 . Соединяем точки M_4 и M_2 как близлежащие через точку Штейнера N . Строится кратчайшее дерево KD_3 .

4 шаг. Соединяем точку M_1 дугорадиальным отрезком с KD_3 через узловую точку N^1 . Строится кратчайшее дерево KD_4 .

На рисунке 4 показан окончательный вариант конфигурации сети. Применение топологии (Куспеков, 2011) показывает, что можно построить множество вариантов конфигурации сети, которое является эффективным инструментом применительно к построению сети логистики и определению маршрутов движения транспорта, а также решает другие задачи логистики. Полярная сеть Штейнера, построенная кратчайшими связующими линиями для точек M_1, M_2, M_3 и M_4 , является оптимальной. Суммарная длина L для этого KD_4 складывается из следующих отрезков:

$$L = |M_1N^1| + |N^1N| + |NM_3| + |M_2N| + |NM_4| = |M_1N^1| + |N^1M_3| + |M_2M_4|$$

Запишем суммарную длину сети в такой формуле: $L = |\rho_1 - \rho_3| + |\rho_3(\varphi_1 - \varphi_3)| + |\rho_2 - \rho_4|$. Суммарная длина конфигурации сети, образованная соединением точек M_1, M_2, M_3, M_4 через узловую точку Штейнера дугорадиальными отрезками, вычисляется формулами (1) и (2).

$$L = \sum \sum q_{ij} d^{ij}, \quad (1)$$

где: q_{ij} – коэффициент затрат на строительство и эксплуатацию и другие стоимости, d – расстояние между точками i и j . Известно, что любую функцию, зависящую от расположения точек M_1 и M_2 , можно рассматривать как расстояние между ними, если эта функция является всегда положительной и симметричной, а также имеет место так называемое неравенство треугольника, кроме того, эта функция должна быть невырожденной. Действительно, функция (1) обладает указанными свойствами расстояния:

1) $d(M_1, M_2) \geq 0$, т. е. функция (1) всегда является положительной;

2) $d(M_1, M_2) = d(M_2, M_1)$ (симметричность); расстояние от точки M_1 до точки M_2 равно расстоянию от точки M_2 до точки M_1 ;

3) расстояние от точки M_1 до точки M_2 равно или меньше суммы расстояний между точками M_1M_3 и между точками M_3, M_2 , т. е. $d(M_1, M_2) \leq d(M_1, M_3) + d(M_3, M_2)$ (неравенство треугольника);

4) $d(M_1, M) = 0$ тогда и только тогда, когда точки M_1 и M_2 совпадают (невырожденность).

Расстояние между точками M_1 и M_2 определяется по формуле:

$$d(M_1, M_2) = \begin{cases} \rho_1 + \rho_2, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| \geq 2, \\ |\rho_1 - \rho_2| + |\rho_1(\varphi_1 - \varphi_2)|, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| < 2 \text{ и } \rho_1 < \rho_2, \\ |\rho_1 - \rho_2| + |\rho_2(\varphi_1 - \varphi_2)|, & \text{если } |\varphi_1 - \varphi_2| < 2 \text{ и } \rho_1 > \rho_2. \end{cases} \quad (2)$$

Алгоритм построения трассировки локальной сети для четырех пунктов

1 шаг. Определяется территория трассировки локальной транспортной сети логистики автомобильных дорог в плане застройки города, населенного пункта или в произвольном рельефе местности.

2 шаг. Определяются координаты искомым пунктов, подлежащих соединению кратчайшими линиями.

3 шаг. Изучается пространство застройки трассы между пунктами на предмет ограничения препятствиями различного рода - карстовые зоны.

4 шаг. В зависимости от количества массивов препятствий выбираются метрика для расчета расстояний между пунктами и конфигурация предполагаемой трассировки сети.

5 шаг. Построим полярную сеть Штейнера. Изучаем положения и координаты точек (пунктов), подлежащих соединению.

6 шаг. Проведем дугорадиальные отрезки через искомые точки и построим криволинейный четырехугольник.

7 шаг. Эффективными являются эвристические методы построения трассы; сравниваем расстояние между точками и решаем задачу Штейнера на плоскости с полярной метрикой. Вычисляются расстояния между всеми парами заданных точек.

8 шаг. Методом сравнительного анализа выбираются две точки M_i и M_j , выбираем точки с наименьшими расстояниями. Соединяем эти точки и строим кратчайшее дерево Штейнера, $КДШ_2$.

9 шаг. Сравниваем расстояние между группами из t точек и строим кратчайшее дерево Штейнера, образуется кратчайшее дерево $КДШ_3$.

10 шаг. Строим кратчайшее дерево Штейнера $КДШ_{t+1}$ для группы из $t+1$ точек, здесь требуется определить очередную $t+1$ точку, присоединяемую к дереву.

11 шаг. В общем случае к $КДШ_{t+1}$ присоединяется $КДШ_t$ (3 шаг) в деформированном виде.

12 шаг. Могут оказаться точки, не вошедшие в $КДШ_t$. При необходимости соединяем такие две точки, которые расположены ближе друг к другу.

13 шаг. Такие точки могут образовать новые группы соединяемых точек, которые образуют новые кратчайшие поддеревья.

14 шаг. Кратчайшие поддеревья, образованные 7 шагом, присоединяются друг к другу на основе ближайшего расстояния к $КДШ_t$ при каждом отдельном шаге его построения.

15 шаг. На практике строятся другие варианты конфигурации полярной сети для заданной зоны подвижности криволинейного четырехугольника.

16 шаг. Сравнительным анализом выбирается оптимальная трассировка локальной сети, удовлетворяющая требованиям проектирования с обходом карстовых зон на пути. Производятся укрупненные технико-экономические расчеты сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложность проектирования разветвленных транспортно-логистических сетей автомобильных дорог заключается в том, что оно зависит от многих факторов, таких как рельеф топографической поверхности, препятствия на пути трассировки; от свойства линий, соединяющих заданные пункты. Поэтому инженерно-экономические задачи такого типа являются сложным и многовариантным вопросом, требующим построения нескольких типов сети, отображающих реальные образы дорог. В связи с этим геометрические модели сети отражают не только требуемую конфигурацию, но и общую планировочную структуру рассматриваемой территории в плане топографической поверхности, населенных пунктов и города. Дискретно-локальная оптимизация сети автомобильных дорог рассматривается с позиции плоскости полярной метрикой и построением кратчайших связующих линий для заданных четырех точек. Кратчайшие связующие линии, моделирующие трассу дорог, проводятся с учетом обхода препятствий на пути трассировки. Для этого решена задача для четырех пунктов прокладки трассы, огибающих условные препятствия.

Систематизированы и обобщены некоторые способы определения точки Штейнера, позволяющие построить оптимальную сеть. Методом наименьшего удлинения строится кратчайшее дерево, удовлетворяющее некоторым ранее заданным требованиям. Разработан алгоритм построения трассировки локальной сети для четырех пунктов. На практике алгоритм позволяет построить несколько вариантов сети с обходом препятствий на пути трассы. Преимущество геометрических моделей и предложенных методов подхода решения задач заключается в том, что после каждого шага построения формируется конфигурация сети, если она оптимальна и отвечает предварительно заданным условиям, можно остановиться и провести корректировку сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Geraerts R., Overmars M.H. A comparative study of probabilistic roadmap planners // Proceedings of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR) (15–17 December 2002). Nice, France, 2002, pp. 43–57.
- Kavraki L.E., Latombe J.-C. Randomized preprocessing of configuration space for fast path planning // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (8–13 May 1994). San Diego, CA, USA: IEEE Press, 1994, pp. 2138–2145.
- Халтурин Р.А. Состояние и опыт строительства дорожной сети в России и за рубежом. Экономические науки, 2011, № 74, С. 223–226. // Khalturin R.A. Sostoyanie i opyt stroitel'stva dorozhnoi seti v Rossii i za rubezhom [A condition and the experience of construction of road networks in Russia and abroad]. Ekonomicheskie nauki, 2011, No. 74, pp. 223–226. (In Russ.)
- Kuspekov K.A., Rotkov S.I. (2016). Geometrical methods of tracing of transport-logistic networks. Proceedings of the 26th International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon), pp. 531–534.
- Kuspekov K.A. Optimization of geometric models of transport network tracing used in city planning. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2023, Vol. 48(5/W2-2023), pp. 63–69.
- Неруш М.Ю., Неруш А.Ю. Логистика: учебник и практикум для СПО. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2019. 559 с. (Серия: Профессиональное образование). // Nerush M.Yu., Nerush A.Yu. Logistika: uchebnik i praktikum dlia SPO [Logistics: textbook and workshop for secondary vocational education]. 5th ed., revised and expanded. Moscow: Yurait Publishing House, 2019. 559 p. (In Russ.)
- Topcon. Official website. URL: <http://www.topconpositioning.eu/0/30/products.html> (accessed: 07.07.2013).
- Герштейн А.М., Терехов А.Н. Маршрутизация транспорта при наличии опасных участков на дороге (на примере города Спрингфилда, Массачусетс). Компьютерные инструменты в образовании, 2022, № 2, С. 5–18. // Gerstein A.M., Terekhov A.N. Marshrutizatsiya transporta pri nalichii opasnykh uchastkov na doroge (na primere goroda Springfield, Massachusetts) [Transport routing in the presence of hazardous road sections]. Kompyuternye instrumenty v obrazovanii, 2022, No. 2, pp. 5–18. (In Russ.)
- Есмуханов Ж.М., Куспеков К.А. Особенности плоскости с полярной метрикой. Вестник КазНТУ, 2005, № 6(50), С. 226–230. // Esmukhanov Zh.M., Kuspekov K.A. Osobennosti ploskosti s polyarnoi metrikoi [Features of a plane with polar metric]. Vestnik KazNTU, 2005, No. 6(50), pp. 226–230. (In Russ.)
- Жигалов К.Ю., Ключкова Е.Н. Решение задачи построения оптимального маршрута движения транспорта по пересеченной местности с использованием ГИС. Московский экономический журнал, 2020, № 1. // Zhigalov K.Yu., Klochkova E.N. Reshenie zadachi postroeniya optimal'nogo marshruta dvizheniya transporta po peresechennoi mestnosti s

- ispol'zovaniem GIS [Solving the problem of optimal vehicle routing over rough terrain using GIS]. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal*, 2020, No. 1. (In Russ.)
- Куспеков К.А., Волков В.Я. Определение оптимальной топологии кратчайшего дерева для четырех точек плоскости с полярной метрикой. *Вестник СибАДИ*, 2011, Вып. 1(19), С. 66–68. // Kuspekov K.A., Volkov V.Ya. Opredelenie optimal'noi topologii krachaishego dereva dlya chetyrekh tochek ploskosti s polyarnoi metrikoi [Determination of the optimal topology of the shortest tree for four points of a plane with polar metric]. *Vestnik SibADI*, 2011, Issue 1(19), pp. 66–68. (In Russ.)
- Немчинов Д.М., Кочетков А.В. Анализ планировочных схем сетей автомобильных дорог. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», 2016, Т. 8, № 5 (сентябрь–октябрь). URL: <http://naukovedenie.ru> // Nemchinov D.M., Kochetkov A.V. Analiz planirovochnykh skhem setei avtomobil'nykh dorog [Analysis of planning schemes of road networks]. Internet journal "NAUKOVEDENIE", 2016, Vol. 8, No. 5. (In Russ.)
- Пегин П.А., Немчинов Д.М., Ильин А.А. Анализ эффективности развития сети автомобильных дорог. *Бюллетень результатов научных исследований*, 2023, Вып. 2, С. 71–80. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2023-2-71-80> // Pegin P.A., Nemchinov D.M., Il'in A.A. Analiz effektivnosti razvitiya seti avtomobil'nykh dorog [Analysis of efficiency of road network development]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*, 2023, Issue 2, pp. 71–80. (In Russ.)
- Плехова А.А. Метод оптимального решения базовой задачи о кратчайшем скруглении. *Информатика: сборник научных трудов*. Киев: Наукова думка, 1998, Вып. 5, С. 124–126. // Plekhova A.A. Metod optimal'nogo resheniya bazovoi zadachi o krachaishem skruglenii [Method of optimal solution of the basic problem of shortest rounding]. *Informatika: sbornik nauchnykh trudov*. Kyiv: Naukova Dumka, 1998, Issue 5, pp. 124–126. (In Russ.)
- Щербakov В.С., Кorytov М.С. Оптимизация трассы автомобильной дороги на рельефе с препятствиями методом вероятностной дорожной карты. *Вестник СибАДИ*, 2012, № 6(28), С. 88–92. // Shcherbakov V.S., Korytov M.S. Optimizatsiya trassy avtomobil'noi dorogi na rel'efe s prepyatstviyami metodom veroyatnostnoi dorozhnoi karty [Optimization of road alignment on terrain with obstacles using the probabilistic roadmap method]. *Vestnik SibADI*, 2012, No. 6(28), pp. 88–92. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Құспеков Қайырбек Әмірғазыұлы – техникалық ғылымдарының кандидаты. Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

Куспеков Кайырбек Амиргазыұлы – кандидат технических наук. Казахский национальный исследовательский технический университет, г. Алматы, Казахстан

Kuspekov Kaiyrbek Amirgazyuly – candidate of technical sciences. K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: kuspekov@satbayev.university

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2315-9634>






https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_5

XFTAP 49.44.31

ТАЛШЫҚТЫ-ОПТИКАЛЫҚ АҚПАРАТ БЕРУ ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ ОПТИКАЛЫҚ ҚУАТ ДЕҢГЕЙІН ТӨМЕНДЕТУ БОЙЫНША ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕР

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УМЕНЬШЕНИЯ УРОВНЯ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ В ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

EXPERIMENTAL STUDIES OF REDUCING THE OPTICAL POWER LEVEL IN FIBER-OPTIC INFORMATION TRANSMISSION LINES

А.Д. Мехтиев ¹, Е.Г. Нешина ¹, А.Д. Алькина ¹, П.А. Дунаев ^{2*},
М.Ж. Мусагажинов ²

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КЕАҚ, Қарағанды қ., Қазақстан

²«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Дунаев Павел Александрович, e-mail: dunayev.kz@mail.ru

Түйінді сөздер:

қосымша шығындар,
оптикалық қуат,
талшықты-оптикалық
тарату желілері,
оптикалық талшық,
микроизгиб.

ТҮЙІНДЕМЕ

Осы зерттеуде ақпаратты берудің талшықты-оптикалық желілерінің оптикалық қуатының қосымша ысыраптары қаралады. Авторлар дисперсия, абсорбция, шашырау және өзге де физикалық құбылыстар сияқты оптикалық қуаттың жоғалуына әкелуі мүмкін әртүрлі факторларды талдайды. Осы ысыраптардың ақпарат берудің тиімділігіне әсерін зерделеуге баса назар аударылады. Зерттеу барысында авторлар оптикалық қуаттың қосымша ысыраптарының себептері мен салдарын түсіндіру үшін эксперименттік деректер мен теориялық модельдерге негізделген дәлелдер ұсынады. Олар сондай-ақ талшықты-оптикалық желілер параметрлерін оңтайландыруды және мамандандырылған компоненттерді пайдалануды қоса алғанда, ақпарат берудің тиімділігін жақсарту жөнінде практикалық ұсынымдар ұсынады. Осы зерттеудің негізгі ойы оптикалық қуаттың қосымша ысыраптарын түсіну және есепке алу талшықты-оптикалық желілер бойынша ақпаратты тиімді беруді қамтамасыз ету үшін қажетті болып табылады. Авторлар осындай деректер беру жүйелерінің өнімділігі мен сенімділігін жақсартуға көмектесетін нақты ұсынымдар мен шешімдер ұсынады.

Ключевые слова:

потери, оптическая
мощность, волоконно-
оптические линии
передачи,

АННОТАЦИЯ

В данном исследовании рассматриваются потери оптической мощности оптоволоконных линий передачи информации. Авторы анализируют различные факторы, которые могут приводить к потере оптической мощности, такие как дисперсия, абсорбция,



оптическое волокно,
микроизгиб.

В рассеяние и прочие физические явления. Основной акцент делается на изучении влияния этих потерь на эффективность передачи информации. ходе исследования авторы представляют аргументы, основанные на экспериментальных данных и теоретических моделях, чтобы объяснить причины и последствия потерь оптической мощности. Они также предлагают практические рекомендации по улучшению эффективности передачи информации, включая оптимизацию параметров оптоволоконных линий и использование специализированных компонентов. Основная мысль данного исследования заключается в том, что понимание и учет потерь оптической мощности является необходимым для обеспечения эффективной передачи информации по волоконно-оптическим линиям. Авторы предлагают конкретные рекомендации и решения, которые могут помочь улучшить производительность и надежность таких систем передачи данных.

Keywords:

additional losses,
optical power,
fiber-optic transmission
lines,
optical fiber,
micro bending.

ABSTRACT

This study examines the additional optical power loss of information fiber links. We analyze various factors that can lead to loss of optical power, such as dispersion, absorption, scattering and other physical phenomena. The main emphasis is on studying the impact of these losses on the efficiency of information transmission.

In the study, the authors present arguments based on experimental data and theoretical models to explain the causes and consequences of additional optical power losses. They also offer practical recommendations to improve the efficiency of information transfer, including optimizing the parameters of fiber optic lines and using specialized components.

The main idea of this study is that understanding and accounting for additional losses of optical power is necessary to ensure the efficient transmission of information over fiber optic lines. The authors offer specific recommendations and solutions that can help improve the performance and reliability of such data transfer systems.

КІРІСПЕ

Оптикалық талшықтарды (талшықтарды) ақпарат берудің бағыттаушы жүйесі ретінде пайдалану бірнеше ондаған жылдар бойы кең таралған. Талшықты-оптикалық техника мен технологияның әлемдік даму деңгейі ОТ тек өткізгіш ретінде ғана емес, сонымен қатар сенсор ретінде де пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл ақпаратты беру функцияларын біріктіруде және ақпаратты берудің талшықты-оптикалық желісінің (ТОБЖ) техникалық жай-күйін бақылауда телекоммуникация жүйелерін пайдалану кезінде өте тиімді болуы мүмкін. Қазіргі уақытта квази үлестірілген талшықты-оптикалық датчиктердің көмегімен кабельдерді бақылаудың автоматты жүйелерін әзірлеу жүргізілуде (Al'kina і dr., 2023). Сондай-ақ, осы басылымдарда бір кабель модульдерінің ішіндегі оптикалық талшықтар жаңартылған сенсор және бағыттаушы беріліс жүйесі болуы мүмкін деген болжам бар. Бұл нақты уақыт режимінде техникалық жағдайды автоматтандырылған бақылау міндетін айтарлықтай жеңілдетуге мүмкіндік береді. Бұл жағдайда оптикалық кабельге механикалық әсер ету деңгейін бағалауға немесе оның зақымдануының нақты орнын орнатуға, сондай-ақ рұқсатсыз қосылу әрекетін түзетуге болады. Авторлар ТОБЖ-ның техникалық жай-күйін бақылау үшін ОТ пайдаланумен байланысты негізгі мәселелерді қарастырды, сондай-ақ талшықты-оптикалық датчиктерді (суларды) пайдалану бойынша кейбір техникалық шешімдерді ұсынды. Дереккөзде (Indra, 2012) өнеркәсіптің әртүрлі салаларында суды дамыту және одан әрі пайдалану

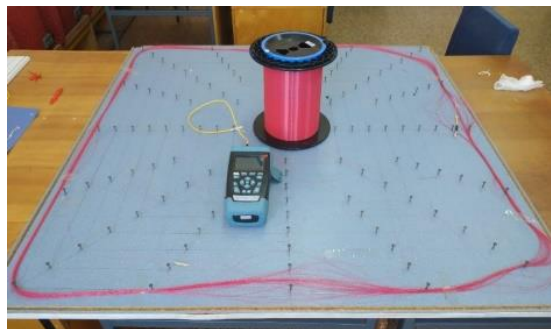
туралы мәліметтер келтірілген. Оптикалық сигналдарды әр түрлі толқын ұзындығымен бір уақытта жіберуге болады, бұл оны байланыстырушы жүйені де, сенсорды да бір уақытта пайдалануға мүмкіндік береді (Guofeng, 2008). Су электр датчиктерімен салыстырғанда бірқатар артықшылықтарға ие. Олар ұзақ уақыт бойы шекті жағдайларда жақсы жұмыс істейді (Вуймиструк, 2013). Тау жыныстарындағы әртүрлі өзгерістерді бекіту үшін талшықты-оптикалық кабельдерді қолдануды сипаттайтын деректер бар (Ким және басқалар., 2015; Liu et al., 2013). Физикалық сипаттамаларды өлшеу үшін қолданылатын оптикалық талшықтың әртүрлі маркалары бар (Ding et al., 2018). Жоғарыда келтірілген мақалада телекоммуникация желілерінде қолданылатын оптикалық талшықтың тек бір түрі – G. 652 стандартты оптикалық талшық көрсетілген. G. 652 стандарты механикалық әсерді өлшейтін су конструкцияларында ең көп қолданылады (SHishkin, Granev & SHelemba, 2016). Мақалаларда (Yurchenko et al., 2019; Mekhtiyev et al., 2021) осы стандарттың талшықтары мен оның негізінде жасалған датчиктерді зерттеу туралы ақпарат бар. Сулар амплитудалы және жеткілікті сызықтық сипаттамаларға ие, бұл оларды перспективалы етеді. Сулар амплитудалы және жеткілікті сызықтық сипаттамаларға ие, бұл оларды перспективалы етеді. Дәл осы жұмыстарда талшықтың бүйір бетіне механикалық манипуляция кезінде оптикалық қуат деңгейінің төмендеуін зерттеу туралы мәліметтер бар (Ribejro i dr., 2011). Тәжірибелерде қолданылатын G. 652 стандартты талшық кварц шыныдан жасалған, сондай-ақ осындай датчиктер үшін қолданылатын талшық түрлерін шығарады пластиктен жасалған (Koike & Asai, 2009). Авторлардың пікірінше, Пластмассадан жасалған талшықтың артында үлкен болашақ бар. Ақпаратты беру процесінде пайдаланылмайтын, бірақ жұмыс талшықтарымен бір модульде болатын талшықтарды су ретінде пайдалануға болады. Бұл жағдайда су қосудың немесе ТОВЖ кабелінің дизайнын өзгертудің қажеті жоқ. (Tsao & Cheng, 2002) оптикалық талшықтың микро иілуін ескере отырып, оптикалық қуаттың жоғалуын зерттейтін зерттеу нәтижелерін ұсынады. Осы жарияланымды зерттей отырып, талшық иілген кезде шығындар пайда болады деген қорытынды жасауға болады, олар оптикалық кабельдің техникалық параметрлерінің өзгеруін бағалай алады. Берілетін деректерге рұқсатсыз қол жеткізудің немесе үзілістің болуына жол беріледі. Микро иілу және пайда болатын фотоэластикалық әсер мақалаларда толығымен қарастырылады (Amorebieta et al., 2021; Zheng, Xiao & Zhu, 2020; Zheng et al., 2021). Бұл материалдан ОТ-ға механикалық әсер етудің әртүрлі жағдайларында ОТ микрофлексінің әсер ету принципі және оптикалық қуат деңгейінің төмендеуі туралы ақпарат алуға болады. Пайда болған шығындарды бекітуге негізделген сулар талшыққа механикалық кернеу деңгейін тікелей басқарады (Ghaffar et al., 2020).

Жоғарыда айтылғандарды ескере отырып, оптикалық кабельдердің техникалық жай-күйін бақылауға арналған суларды әзірлеу кезінде нәтижелерді кейіннен пайдалану үшін ТОВЖ өткізгіштерін бұту кезінде оптикалық қуат деңгейін төмендету бойынша зерттеулер жүргізу мақсаты айқындалды. Бастапқы міндет-зертханалық жағдайда G. 652 стандартының шығындары бойынша эмпирикалық зерттеулер жүргізу, шығындардың өсуінің иілу саны мен параметрлеріне тәуелділігін алу. Зерттеу нәтижелері бұдан әрі ТОВЖ техникалық жай-күйін бақылауға, сондай-ақ ақпаратты алу үшін рұқсатсыз қосылудың жасырын нүктелерін анықтауға арналған суларды жасау үшін пайдаланылатын болады. Оптикалық қуаттың жоғалуын бақылау бойынша зерттеулердің өзектілігі G. 652 стандартының иілу бұрышының әртүрлі параметрлерінде оптикалық қуаттың жоғалуын сандық бағалауға мүмкіндік беретін жаңа нәтижелерді алу болып табылады. G. 652 стандартының шығындарын зерттеу өзекті болып табылады, өйткені бұл ОВ аймақшілік ТОВЖ үшін ең массивті болып табылады. Алдағы уақытта зерттеу нәтижелері шығын деңгейін өзгерту бойынша ТОВЖ техникалық жай-күйін бақылаудың

автоматты аппараттық-бағдарламалық кешенін құруға мүмкіндік береді. ТОВЖ-ның әртүрлі нүктелеріндегі шығындар деңгейінің өзгеруі қалалар мен кәсіпорындардың телекоммуникация жүйелеріне (аймақшілік ТОВЖ) рұқсатсыз кіру нүктелерін бақылауға мүмкіндік береді, бұл ақпарат беру қауіпсіздігі жүйелерін дамыту үшін өте өзекті болып табылады. Бұдан әрі қарастырылған шығындарды бақылау әдісі оптикалық қуаттың жоғалуының сандық параметрін ғана емес, сонымен қатар ТОВЖ үзілуінің немесе ақпаратқа рұқсатсыз қол жеткізудің нақты орнын анықтауға мүмкіндік береді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеудің мақсаты мен міндеттерін жүзеге асыру үшін зертханалық стенд арнайы әзірленді, ол ОТ микрофлексындағы шығындарға эмпирикалық зерттеулер жүргізуге мүмкіндік береді. Стенд-Болат бұрандалар бұралған БТ негізі, стендтің сыртқы түрі 1-суретте көрсетілген.



1-сурет. Зертханалық стенд

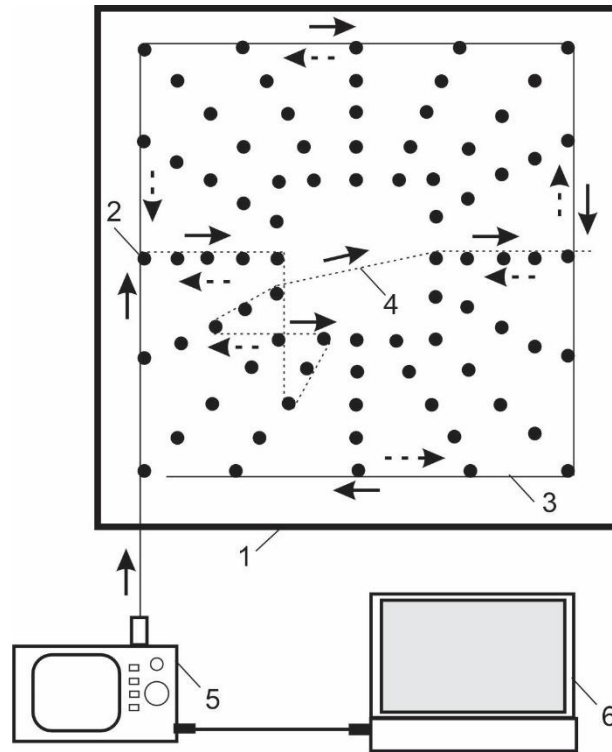
Ескерту – авторлар әзірлеген

Кері дисперсияны бақылайтын белгілі оптикалық рефлектометрия әдісі қолданылды. Бұл әдіс мақалада қарастырылған (Yurchenko et al., 2016), онда авторлар әр түрлі бұрыштарда, сондай - ақ әр түрлі толқын ұзындығында 1310-1625 НМ микро иілу кезінде оптикалық қуаттың жоғалуын зерттеудің барлық кезеңдерін егжей-тегжейлі ашты. Авторлар ОТ үшін сыни иілу радиусы бар, ол бұзылады деп мәлімдейді. Сондай-ақ, ол сыну ықтималдығын арттыратын жарықтар тудыруы мүмкін. Иілу диаметрі 20 диаметрден аз болуы мүмкін (Yurchenko et al., 2016). Сондай-ақ, ОТ бұзу процесіне температура әсер етеді, әсіресе теріс, онда ОТ нәзік болады. Зерттеу жүргізу кезінде қоршаған ортаның температурасы 23-24 °С аралығында болды. Стендті жобалау кезінде сыни диаметр ескерілді, өйткені оның жетістігі ОТ тұтастығына теріс әсер етуі мүмкін және онда жарықтар пайда болуы мүмкін. Бір режимді ОТ диаметрі 125 мкм болғандықтан, сыни радиусы өте аз – 0,0025 ММ. зертханалық стендті орындау кезінде 45 – 1800 бұрышы бар талшықтың иілуін қамтамасыз ететін бағыттағыштар (диаметрі 2,5 мм) алынды. Эксперименттің тақырыбы бір режимді талшық болды (G. 652 стандарты). Қабық пен өзектің диаметрі сәйкесінше 125 және 9 мкм, катушкадағы талшықтың жалпы ұзындығы 460 м.

2-суретте зертханалық стендтің шартты схемасы көрсетілген, онда эксперименттер жүргізу принципі түсіндіріледі.

1 негізіне бұрандалы болаттан жасалған бұрандалар 2, олардың жіптері жоқ цилиндрлік бөлігі бар, бұл оларды орау кезінде тірелетін бағыттаушы ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Стендтің дизайны кез-келген траектория бойынша талшықты төсеуді және оның иілу бұрыштарын 45-тен 1800-ге дейін құруды қамтамасыз етеді, қажет болған жағдайда кіші немесе үлкен бұрыштарды жасауға болады.

Бағыттағыштар 2,5 мм иілу радиусын қамтамасыз етеді, бұл диаметрі 125/9 мкм G. 652 стандарты үшін өте қолайлы. OT 3-позиция, бұрыштардың әртүрлі комбинацияларында оралған, мысалы, тек 900 тік бұрыштар жасалған кезде, бұл траектория қатты сызықпен көрсетілген.

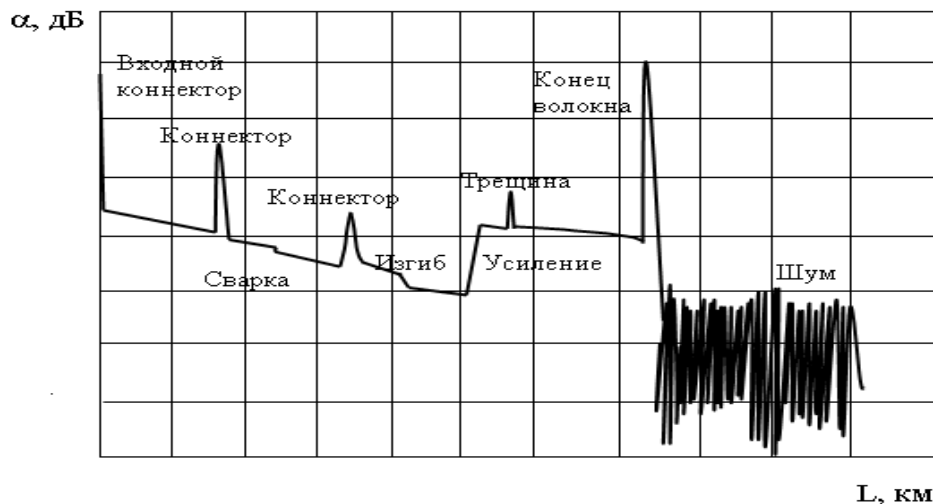


2-сурет. Стендтің шартты схемасы

Ескерту – суретті авторлар жасаған

Нүктелі сызық 45-тен 1800-ге дейінгі бұрыштардың басқа комбинацияларын жасауға болатын траекторияны көрсетеді. Сондай-ақ, бұрыштардың саны бірліктен жүзге дейін өзгеруі мүмкін. 5 өлшеу құралы ретінде microOTDR оптикалық рефлектометрi (China өндірісі) қолданылды, жұмыс диапазоны 1310nm/1550nm/1625nm \pm 10nm, өлшеу дәлдігі $\pm 0,05$ dB/dB, құрылғының шығыс коннекторынан өлі аймақтың ұзындығы 8 м. Шартты түрде айтқанда, егер сіз ұзындығы 8 метр болатын сегментті қоссаңыз, онда құрылғы оптикалық шығындарды өлшей алмайды. Рефлектометр өлшенетін шаманың мәнін dB 1 км-ге береді, бұл оптикалық сигнал әртүрлі қашықтықтағы OT қандай күшпен сөнетінін білдіреді. Тиісінше, әртүрлі гетерогенділік, иілу, қосылыстар және ақаулар осы құрылғының көмегімен түзетуге болатын шығындарды арттырады. Әрбір иілу алынған рефлектограммада көрінеді, сонымен қатар оның ТОВЖ трассасында нақты орналасуын орнатуға болады. Оптикалық рефлектометрдің көмегімен дәнекерленген және ажыратылатын қосылыстардың сапасын бағалауға, сондай-ақ OT үзілу орнын орнатуға болады. Оптикалық рефлектометрдің жұмыс принципі белгілі және қысқа оптикалық импульс берілгеннен кейін оның фото қабылдағышына келген алынған шағылысқан оптикалық импульстарды микропроцессорлық талдауға негізделген. рефлектомерге қарай жіберілген импульстің кішкене бөлігі ғана көрінеді, бұл импульс энергиясының шамамен 10^{-6} бөлігі. Оптикалық рефлектометр оптикалық толқын сыну көрсеткішіне әсер ететін OT гетерогенділігінен шағылысқан кезде кері Рэлей шашырау деңгейін өлшейді. Үздіксіз көрсеткі оптикалық шашырау (шағылысу) қозғалысының тікелей импульсі мен

нүктелі бағытын көрсетеді. Эксперимент барысында бұрыштар саны 1-ден 10-ға дейін өсті. 45 және 90° бұрыштары таңдалды. Оптикалық толқынның қалыптасқан бұрышы мен ұзындығын ескере отырып, иілу саны артқан кезде шығындардың өсу деректері бағаланды. Рефлектометр USB сымның көмегімен 6 дербес компьютерге қосылған, бұл деректерді сақтау және эксперименттің барысын басқару үшін қажет.



3-сурет. Рефлектограмманың мысалы

Ескерту – суретті авторлар жасаған

Рефлектометр белгілі бір уақыт аралығында бірнеше импульс жібереді, содан кейін алынған өлшеу деректерін орташалайды және рефлектограмма жасайды. 3-суретте пайда болған жарылыстарды түсіндіре отырып, ТОВЖ рефлектограммасының мысалы көрсетілген, ал иілу белгілі бір шартты қадаммен белгіленген.

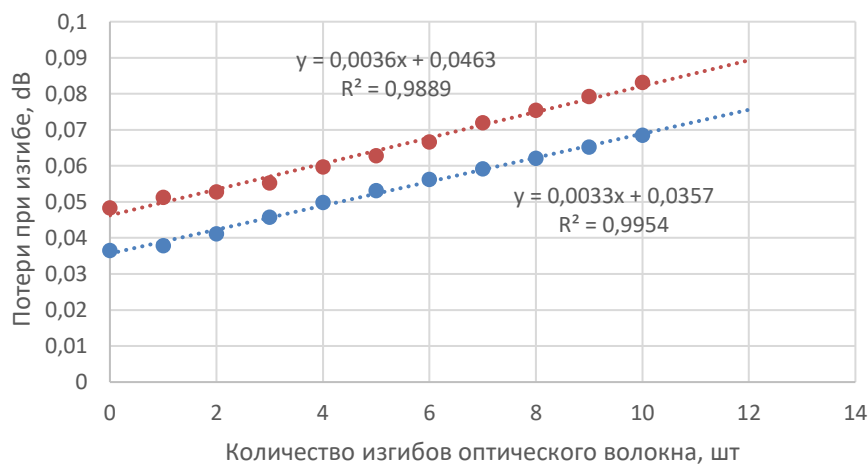
Толқын ұзындығы 1200-ден 1550 нм-ге дейін ұлғайған кезде ОТ шығындар азаяды, «мөлдірлік терезесі» деп аталатын әсер байқалады, ТОВЖ үшін оптикалық толқынның жұмыс ұзындығы 1310 және 1550 нм, бұл ең тиімді толқын ұзындығы (Yurchenko et al., 2016). Іс жүзінде ОТ техникалық күйін тексеру үшін 1625 нм толқын ұзындығы қолданылады, сондықтан берілген толқын ұзындығы нәтижелерді талдау үшін пайдаланылмайды. Зерттеулер қашықтыққа байланысты Оптикалық сигналдың әлсіреу графигінде көрсетілгендей, екінші және үшінші мөлдірлік терезесінде орналасқан 1310 нм және 1550 нм толқын ұзындығымен жүргізілді. G. 652 стандартының қазіргі заманғы ОТ үшін 0,22 dB/км шегінде оптикалық сигналдың ең аз сөнуіне толқын ұзындығы 1550 нм-ге тең жетеді (Rodina, 2016).

Эксперимент келесідей жүргізілді, ОТ рельстерге бірдей немесе әртүрлі бұрыштарда орналастырылды, иілу саны әр жаңа тәжірибемен 1-ден 10-ға дейін өсті. Шығындарды өлшеу оптикалық рефлектометрдің көмегімен әр бұрышқа 10 рет жүргізілді, содан кейін мәліметтер регрессивті талдау жүргізіп, жуықтау теңдеуін шығара отырып, Microsoft Excel компьютерлік бағдарламасының көмегімен орташаланды және өңделді. Деректер талшықты-оптикалық иілудің әртүрлі бұрыштарында және қолданылатын толқын ұзындықтарында оптикалық қуат шығынының жақындатылған графикалық тәуелділігін өңдеу және алу үшін бағдарламаға енгізіледі.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижелері 45 және 90° бұрыштары бар иілу санына байланысты болатын шығындардың өсуіне тәуелділік графиктерінде (4 және 5-сурет) берілген. Эксперименттік зерттеулер талшықтағы оптикалық қуат деңгейі иілу санының артуымен төмендейтінін

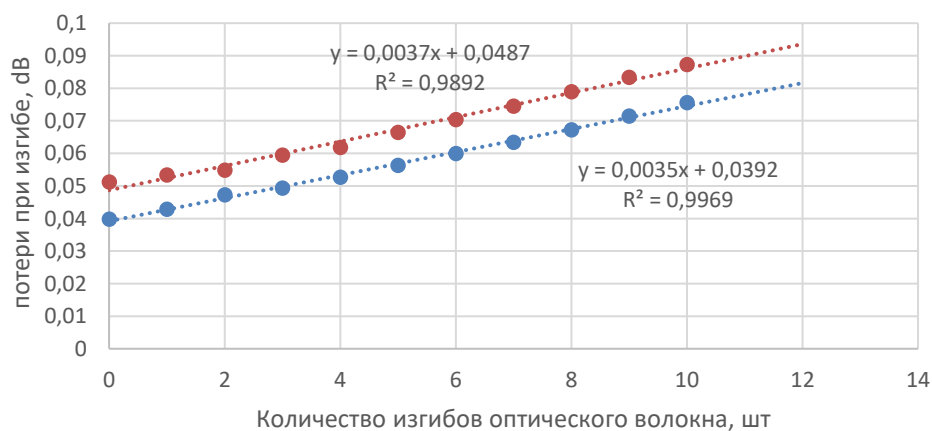
көрсетті. Бұл факт осыған дейін ұқсас эксперименттер жүргізген басқа ғалымдар алған зерттеулердің басқа нәтижелерімен сәйкес келеді. 1550 нм толқын ұзындығынан айырмашылығы 1310 нм толқын ұзындығында иілу шығындарының саны аз екендігі анықталды (4 және 5-сурет). ОТ мөлдірлігінің терезелеріне тән қарама – қарсы әсер пайда болады-толқын ұзындығының ұлғаюымен ОВ-дағы шығындар азаяды (Yurchenko et al., 2016; Rodina, 2016). Бұл әсер иілу болмаған кезде байқалады. Иілу пайда болған кезде ОТ сыну параметрлерінің өзгеруіне байланысты фотоэластикалық әсер пайда болады. Сәулеленудің үлесі сөзсіз талшықтың өзегінен шығады, мұны ОТ бүйірлік бетінің механикалық кернеуінде бекітілген оптикалық қуат деңгейінің төмендеуі деп сипаттауға болады. Егер ОТ иілуге ұшырамаса, онда шығындар толқын ұзындығының өсуімен азаяды, бұл ТОВЖ өткізгіштерін нақты төсеу кезінде мүмкін емес. Иілу болмаған жағдайда, материалдың өзі қалыптастырған шығындарды ғана қарастыру керек, бірақ мұны тек ТОВЖ трассасының идеалды төсеміне жатқызуға болады.



4-сурет. 45⁰ бұрыштағы иілу санына байланысты шығындар графигі

Ескерту – алынған эксперименттік деректер негізінде авторлар әзірлеген

4-суретте иілу саны артқан кезде күтілетін шығындар көрсетілген, бұл аймақ алынған жуықтау теңдеулерін қолдана отырып салынған.

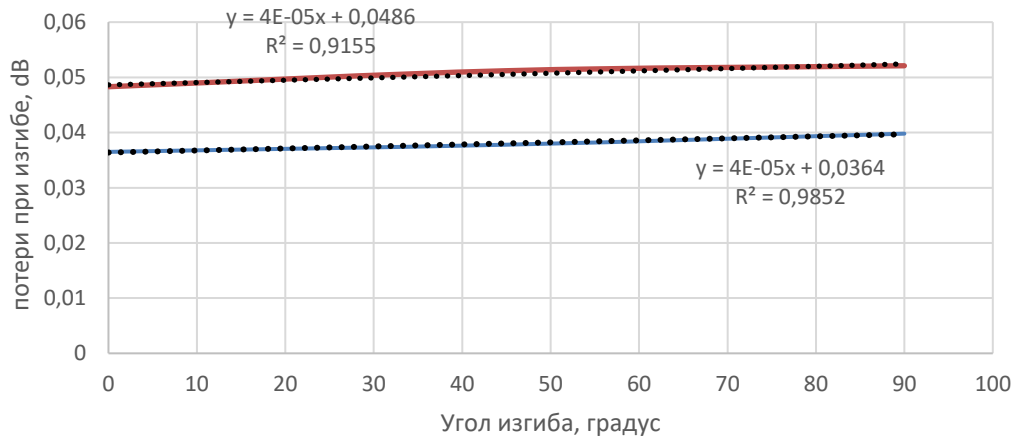


5-сурет. 90⁰ бұрыштағы иілу санына байланысты шығындар графигі

Ескерту – алынған эксперименттік деректер негізінде авторлар әзірлеген

Графиктер жуықтаудың сызықтық заңына бағынады, ал барлық ауытқулар өлшеу қателігі мен деректерді өңдеудің себебі болып табылады. Осыған ұқсас ойды бұрын осындай зерттеулер жүргізген және ОТ басқа түрлерін қолданған басқа ғалымдар айтқан (жоғарыдан қараңыз).

1310 нм-ге қарағанда 1550 нм толқын ұзындығында оптикалық талшықтың иілуіндегі шығындардың артуы G. 652 стандартындағы бір режимді оптикалық талшықтардың шектеулі өткізу диапазонына байланысты. Сондай-ақ, шығындардың артуына иілу саны мен олардың бұрыштары әсер етеді. Бұл тәуелділік 6-суретте көрсетілген.



6-сурет. Иілу бұрышының шамасына байланысты иілу кезінде оптикалық шығындардың өсуі

Ескерту – алынған эксперименттік деректер негізінде авторлар әзірлеген

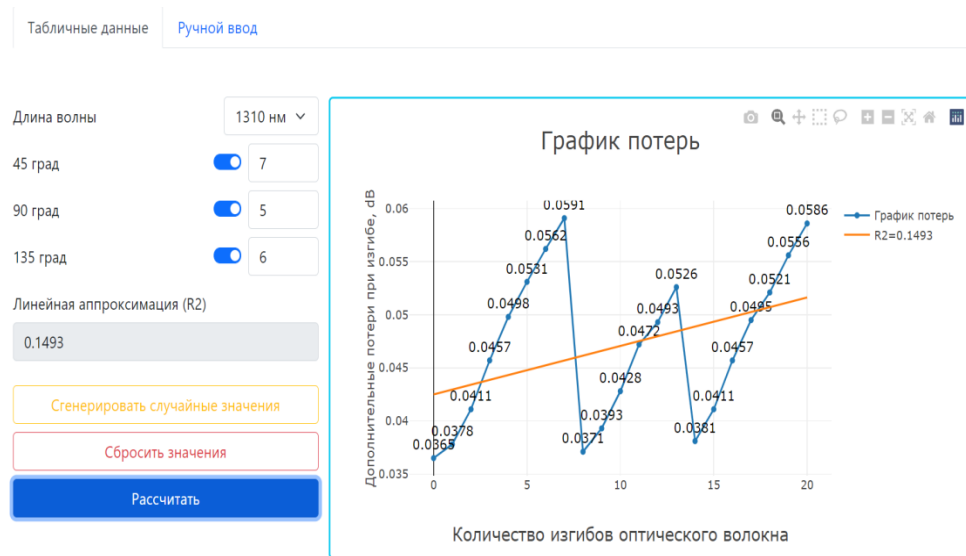
Әрбір иілу кезіндегі шығындардың орташа өсу мәні: 0,016 dB шегінде 1310 нм толқын ұзындығы үшін және 1550 нм толқын ұзындығы үшін – 0,017 dB.

Келесі қадам – көрінетін диапазонның (650 нм) толқын ұзындығындағы жоғалту деңгейін, сондай-ақ 850 нм және 1625 нм көрінбейтін инфрақызыл диапазонды зерттеу. Сонымен қатар, 90° астам бұрыштар жасау жоспарлануда, бұл ғылым мен техниканың әртүрлі салалары үшін амплитудалық суларды құруға мүмкіндік беретін иілу кезінде шығындардың өсуінің толық көрінісін алу үшін қажет. Мүмкін, механикалық жүктемені немесе орын ауыстыруды өлшеуге жарамды сияқты сипаттамалардың сызықтық көрсеткіштері жеткілікті жоғары суларды құру.

Тәжірибелер әртүрлі ОТ иілу параметрлері мен оптикалық толқын ұзындығында жоғалту параметрлерінің жаңа мәндерін алуға мүмкіндік берді. Алынған сандық мәндер негізінде шығындарды есептеу бағдарламасы құрылды. Бағдарлама көпшілікке қол жетімді <https://5kif4a.github.io/losses-calculation/>. бағдарламада екі енгізу күйі бар: есептеуге арналған деректер практикалық тәжірибелердің нәтижелері негізінде ұсынылған және автоматты түрде немесе өңделетін басқа деректерді қолмен енгізу арқылы жуықталған кестелік деректер.

Бағдарлама терезесінде таңдау түймелері көрсетіледі. Толқын ұзындығының мәнін таңдау үшін: 1310, 1550 нм, «Толқын ұзындығы» батырмасы қолданылады. Иілу бұрыштарының көрсеткіштеріне арналған түйме: 0-7. Иілу бұрыштарының мәндерінің түймелері: 45, 90, 135 градус. Сызықтық жуықтау түймесі (R2): функцияны жуықтау үшін сызықтық регрессия моделі енгізілген мәліметтерге сәйкес құрылады. Кездейсоқ мәндерді жасау түймесі: иілу бұрышының мәндерін және оның көрсеткіштерін кездейсоқ таңдауға көмектеседі. Мәндерді қалпына келтіру түймесі: бұрын енгізілген барлық мәндерді

қалпына келтіруді ойнатады. Есептеу түймесі: шығындарды есептейді және шығындар кестесін жасайды.



7-сурет. Деректерді енгізу кезінде бағдарлама интерфейсінің жалпы көрінісі
Ескерту – авторлар әзірлеген

ҚОРЫТЫНДЫ

Оптикалық кабельдердің техникалық жай-күйін бақылауға арналған суларды әзірлеу кезінде нәтижелерді кейіннен пайдалану үшін ТОБЖ өткізгіштерін ию кезінде оптикалық қуаттың жоғалуын зерттеумен байланысты қойылған мақсатқа қол жеткізілді. Алынған деректерді оптикалық қуаттың шығыны бойынша ТОБЖ техникалық жай-күйін бақылаудың автоматтандырылған жүйесін құру үшін пайдалануға болады. Тиісінше, ТОБЖ кабелінің үзілуі немесе оның шамадан тыс салбырауы немесе оған басқа механикалық әсер етуі кезінде, оның өткізгіштерінің иілуіне әкеліп соқтырады, шығындардың өсуі байқалады, олардың деңгейіне сәйкес ТОБЖ зақымдану сипатын бағалауға болады. Сондай-ақ, ақпаратты алу үшін ТОБЖ-ға рұқсатсыз қосылуды бақылаудың автоматты жүйесін құру үшін бұл зерттеу өте перспективалы болып табылады. Рұқсатсыз қол жеткізудің қолданыстағы әдістері ОТ иілуін жасауға немесе одан сәулеленудің бір бөлігін шығаруға негізделген, оны шығындардың өсуі ретінде тіркеуге болады. Оптикалық рефлектометрия әдісі 0,1-ден 1 м-ге дейінгі рефлектометрдің ажыратымдылығына байланысты нақты байланыс орнын анықтауға мүмкіндік береді. зертханалық жағдайда G. 652 стандартының шығындарына эмпирикалық зерттеулер жүргізуге байланысты міндет шығындардың өсуінің иілу саны мен параметрлеріне тәуелділігін алу үшін толығымен жүзеге асырылады. Зерттеу нәтижелері ТОБЖ техникалық жай-күйін бақылауға, сондай-ақ ақпаратты алу үшін рұқсатсыз қосылудың жасырын нүктелерін анықтауға арналған суларды жасау үшін пайдаланылуы мүмкін. Тәжірибелер әртүрлі ОТ иілу параметрлері мен оптикалық толқын ұзындығында жоғалту параметрлерінің жаңа мәндерін алуға мүмкіндік берді. Алынған мәліметтер негізінде ақпарат берудің талшықты оптикалық желілерінің пайда болатын оптикалық қуатының жоғалу бағдарламасы жасалды (<https://5kif4a.github.io/losses-calculation/>).

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Жоғарыда келтірілген нәтижелер Қазақстан Республикасы Сауда және интеграция министрлігінің бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру шеңберінде «Зияткерлік талшықты-оптикалық датчиктер негізінде шахталар мен карьерлердің тау-кен қазбаларының геотехникалық жай-күйіне мониторинг жүргізу жүйесін әзірлеу» № BR19980899 СТН ғылыми жобасын орындау шеңберінде алынды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Ghaffar, A., Mehdi, M., Hussain, S., & others. (2020). The coupling of scattered-bend loss in POF based the displacement measurement sensor. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 29, 100351. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100351>
- Amorebieta, J., Ortega-Gomez, A., Durana, G., & others. (2021). Compact omnidirectional multicore fiber-based vector bending sensor. *Scientific Reports*, 11, 5989. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85507-9>
- Ding, M., Fan, D., Wang, W., Luo, Y., & Peng, G.D. (2018). Basics of Optical Fiber Measurements. In G.D. Peng (Ed.), *Handbook of Optical Fibers*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1477-2_57-2
- Indra, A. (2012). Industrial fiber optics in train transportation systems. *Avago Technologies White Papers*, 4 p. <https://docs.broadcom.com/doc/AV02-2378EN>
- Guofeng, W. (2008). Methods for increasing the Bandwidth-Distance Product for multimode fibers in LAN // *Journal of Optical Communication*, 29(4), 213–216. [In Eng.] DOI:10.1515/JOC.2008.29.4.213
- Kim, S.T., Park, Y-H., Park, S.Y., Cho, K., & Cho, J-R. (2015). A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces // *Sensors*, 15(1), 1060–1070. [In Eng.] DOI:10.3390/s150101060
- Koike, Y., & Asai, M. (2009). The future of plastic optical fiber. *NPG Asia Materials*, 1, 22–28. <https://doi.org/10.1038/asiamat.2009.2>
- Mekhtiyev, A.D., Kovtun, A.A., Yugay, & others. (2021). Research of mechanical stress at tension of quartz optical fiber (QOF). *Metalurgija*, 60(1–2), 121–124. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/246106> [In Eng.]
- Liu, T., Wei, Y., Song, G., & others. (2013). Advances of optical fiber sensors for coal mine safety monitoring applications // *Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics*, 102–111. DOI:10.1109/ICMAP.2013.6733455
- Yurchenko, A.V., Mekhtiyev, A.D., Bulatbaev, F.N., & others. (2019). Investigation of additional losses in optical fibers under mechanical action // *III International Conference "Cognitive Robotics," IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 516, 012004. DOI:10.1088/1757-899X/516/1/012004
- Zheng, Y., Xiao, W., & Zhu, Z-W. (2020). A simple macro-bending loss optical fiber crack sensor for the use over a large displacement range. *Optical Fiber Technology*, 58, 102280. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102280>
- Zheng, Y., Yu, J., Zhu, Z-W., Zeng, B., & Yang, C. (2021). Design, sensing principle and testing of a novel fiber optic displacement sensor based on linear macro-bending loss. *Optik*, 242, 167194. <https://doi.org/10.1016/j.jileo.2021.167194>
- Yurchenko, A.V., Gorlov, N.I., Alkina, A.D., Mekhtiev, A.D., & Kovtun, A.A. (2016). Research of the additional losses occurring in optical fiber at its multiple bends in the range waves 1310 nm, 1550 nm and 1625 nm // *IOP Science, Journal of Physics*, 671, 012001. DOI:10.1088/1742-6596/671/1/012001
- Цао С-Л., Ченг В-М. Упрощенная формула потерь на изгиб для оптоволоконных датчиков, волокна и интегрированной оптики // Tsao S-L., & Cheng W-M. Uproshchennaya formula poter' na izgib dlya optovolokonnyh datchikov, volokna i

integrirrovannoj optiki [Simplified bending loss formula for fiber optic sensors, fibers, and integrated optics]. 21(5), 333–344. doi:10.1080/01468030290087723 [In Russ.]

Алькина А.Д., Юрченко А.В., Мехтиев А.Д., Мадиди П.Ш., Ажмагамбетова Р.Ж. Разработка автоматической системы контроля кабелей с помощью квази-распределенных волоконно-оптических датчиков / Alkina A.D., Yurchenko A.V., Mekhtiev A.D., Madi P.Sh., Ajmagambetova R.Zh. Razrabotka avtomaticheskoy sistemy kontrolya kabelej s pomoshchi kvazi-raspredeleennyh volokonno-opticheskikh datchikov [Development of an automatic cable monitoring system using quasi-distributed fiber optic sensors]. Vestnik KGEU, 15(1(57)), 125–143. [In Russ.]

Алькина А.Д., Ажмагамбетова Р.Ж., Юрченко А.В., Мехтиев А.Д., Мадиди П.Ш. Автоматическая система контроля целостности волоконно-оптических кабелей / Alkina A.D., Ajmagambetova R.Zh., Yurchenko A.V., Mekhtiev A.D., Madi P.Sh. Avtomaticheskaya sistema kontrolya celostnosti volokonno-opticheskikh kabelej [Automatic fiber optic cable integrity monitoring system]. Mir izmerenij, 2, 50–55. [In Russ.]

Бужмистрюк Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий / Buzhmistryuk G. Volokonno-opticheskie datchiki dlya ekstremal'nyh uslovij [Fiber optic sensors for extreme conditions]. Control Engineering Russia, 3(45), 34–40. [In Russ.]

Родина О.В. Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство. 400 с. / Rodina O.V. Volokonno-opticheskie linii svyazi. Prakticheskoe rukovodstvo [Fiber optic communication lines. Practical guide]. 400 s. [In Russ.]

Рибейро Л.А., и др. Оптоволоконный датчик потерь на изгиб для применения при мониторинге плотин насыпей // Ribejro L.A., & others. Optovolokonnyj datchik poter' na izgib dlya primeneniya pri monitoringe plotin nasypej [Fiber optic bending loss sensor for embankment dam monitoring]. SBMO / IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, 637–641. doi:10.1109/IMOC.2011.6169273 [In Russ.]

Шишкин В.В., Граньёв И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Shishkin V.V., Granyov I.V., Shelemba I.S. Otechestvennyj opyt proizvodstva i primeneniya volokonno-opticheskikh datchikov [Domestic experience in manufacturing and application of fiber optic sensors]. Prikladnaya fotonika, T3(1), 61–75. http://doi.org/10.15593/2411-4367/2016.01.05 [In Russ.]

Авторлар туралы мәліметтер

Информация об авторах

Information about authors



Али Джаванширович Мехтиев – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Басқарма мүшесі – Ғылыми жұмыс жөніндегі проректор, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті KEAҚ, Қарағанды, Қазақстан

Али Джаванширович Мехтиев – кандидат технических наук, профессор, Член правления – проректор по научной работе, НАО «Қарагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова», Қараганда, Қазақстан

Ali Mekhtiyev – Cand.Sci. (Eng.), Member of the Board – Vice-Rector for Research, NJSC Karaganda Technical University named after A.Saginov, Karaganda, Kazakhstan

e-mail: barton.kz@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>



Елена Геннадьевна Нешина – PhD, кафедра менеджменті, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті КЕАҚ, Қарағанды, Қазақстан

Елена Геннадьевна Нешина – PhD, заведующий кафедрой, НАО «Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова», Караганда, Казахстан

Elena Neshina, Cand.Sci. (Eng.), PhD, Head of Department, NJSC Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, Kazakhstan

e-mail: 1_neg@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>



Алия Даулетхановна Алькина – PhD, аға оқытушы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті КЕАҚ, Қарағанды, Қазақстан

Алия Даулетхановна Алькина – PhD, старший преподаватель, НАО «Карагандинский технический университет имени Абилкаса Сагинова», Караганда, Казахстан

Aliya Al'kina – PhD, senior lecturer, NJSC Karaganda Technical University named after A. Saginov, Karaganda, Kazakhstan

e-mail: alika_1308@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4879-0593>



Павел Александрович Дунаев – PhD, қауымдастырылған профессор, білім беру бағдарламалары тобының жетекшісі, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана, Қазақстан

Павел Александрович Дунаев –, ассоциированный профессор, руководитель группы образовательных программ, НАО «Казакский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина», Астана, Казахстан

Pavel Dunayev, Cand.Sci. (Eng.), PhD, Associate Professor, Head of the Educational Program Group, NJSC "Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin", Astana, Kazakhstan

e-mail: dunayev.kz@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0379-315X>



Мусагажинов Мадияр Жалелович – докторант, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті КЕАҚ, Астана, Қазақстан

Мусагажинов Мадияр Жалелович – докторант, НАО «Казакский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина», Астана, Казахстан

Madiyar Musagazhinov – PhD Student, NJSC Kazakh Research Agrotechnical University named after S. Seifullin, Astana, Kazakhstan

e-mail: musagazhinov@bk.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4521-8172>

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IES_2026_1_6

SRSTI 89.57.45

APPLICATION OF EARTH REMOTE SENSING DATA FOR PREDICTING AGRICULTURAL CROP YIELDS

АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ДАҚЫЛДАРЫНЫҢ ӨНІМДІЛІГІН БОЛЖАУ ҮШІН ЖЕРДІ ҚАШЫҚТЫҚТАН ЗОНДАУ ДЕРЕКТЕРІН ҚОЛДАНУ

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Zh.M. Ramazanova ^{1*}, M.G. Zamalitdinova ¹, A.Zh. Kamet ¹, B.D. Abdikarimov ¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

*The corresponding author: Ramazanova Zhanat Musanovna, e-mail: zhanat2005@yandex.kz

Keywords:

Earth remote sensing data, crop yield, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), satellite images, satellite image interpretation.

ABSTRACT

Agriculture in the Republic of Kazakhstan plays a strategic role in ensuring the country's food security and exports. This paper shows the effectiveness of remote sensing methods for assessing the productivity of grain crops. In this article, Sentinel-2 space images for the period from 2019 to 2023 are used. Normalized difference vegetation index (NDVI) was used to forecast crop productivity. Space images interpretation and calculation of the NDVI were carried out using ArcGIS software. The article reveals that NDVI values reflect well the biological productivity of agricultural crops during the growing season and show correlation with biomass and yield. The work indicates that the analysis of crop yields will be more accurate if along with NDVI index such indicators of climatic conditions as air temperature and precipitation are used. Forecasting yields is of great practical importance.

Түйінді сөздер:

Жерді қашықтықтан зондау деректері, өнімділік, нормаланған айырымдық вегетациялық индекс (NDVI), ғарыштық суреттер, ғарыштық суреттерді дешифрлеу.

ТҮЙІНДЕМЕ

Қазақстан Республикасындағы ауыл шаруашылығы елдің азық-түлік қауіпсіздігін және экспортты қамтамасыз етуде стратегиялық рөл атқарады. Бұл жұмыста дәнді дақылдардың өнімділігін бағалау үшін Жерді қашықтықтан зондау әдістерінің тиімділігін көрсетіледі. Бұл мақалада 2019–2023 жылдар аралығындағы Sentinel-2 ғарыштық суреттері пайдаланылды. Өсімдіктердің нормаланған айырымдық вегетациялық индексі (NDVI) дақылдардың өнімділігін болжау үшін пайдаланылды. Ғарыштық суреттерді дешифрлеу мен NDVI индексі есептеу ArcGIS бағдарламалық жасақтамасы арқылы жүзеге асырылды. Зерттеу нәтижелері NDVI көрсеткіштері вегетациялық кезеңдегі дақылдардың биологиялық өнімділігін дәл бейнелейтінін, сондай-ақ бұл көрсеткіштердің биомасса мен өнім көлемімен өзара тығыз байланысты екенін көрсетті. Сонымен қатар, өнімділікке талдау жасау барысында NDVI көрсеткішімен қатар



© 2026 Zh.M. Ramazanova, M.G. Zamalitdinova, A.Zh. Kamet, B.D. Abdikarimov

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ауа температурасы, жауын-шашын мөлшері сияқты климаттық параметрлерді де ескерген жағдайда, болжаудың дәлдігі артатыны атап өтілді. Өнімділікті болжаудың практикалық маңызы зор.

Ключевые слова:

данные дистанционного зондирования Земли, урожайность, нормализованный разностный вегетационный индекс, космические снимки, дешифрирование космических снимков.

АННОТАЦИЯ

Сельское хозяйство в Республике Казахстан играет стратегическую роль в обеспечении продовольственной безопасности страны и экспорта. В данной работе показана эффективность методов дистанционного зондирования Земли для оценки продуктивности зерновых культур. В статье использованы космические снимки Sentinel-2 за период с 2019 по 2023 годы. Для прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур был использован нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI). Дешифрирование космических снимков и расчет нормализованного разностного вегетационного индекса проводили с использованием программного продукта ArcGIS. В статье показано, что значения NDVI хорошо отражают биологическую продуктивность сельскохозяйственных культур в течение вегетационного периода, показывают корреляцию с биомассой и урожайностью. В работе указано, что анализ урожайности сельскохозяйственных культур будет более точнее, если наряду индекса NDVI использовать такие показатели климатических условий, как температура воздуха, количество осадков. Прогнозирование урожайности имеет большое практическое значение.

INTRODUCTION

Currently, the Republic of Kazakhstan is one of the largest producers of grain crops and this is a strategically important task. Due to changes in climatic conditions in the vast areas of agro-industrial complex of the Northern district of Kazakhstan in recent decades there are often sharp temperature fluctuations, uneven distribution of precipitation, which significantly affects the productivity of agricultural fields. Also grain crops are subject to diseases and various pests. Agricultural land is subject to erosion and degradation. In view of these problems, space monitoring and remote sensing methods are an important tool for agro-industrial complex. The use of Earth remote sensing (ERS) methods is relevant in the conditions of a vast territory of agricultural land, changing climate, and water resources deficit. Remote sensing methods allow to manage agricultural production more effectively, increase crop yields and reduce negative environmental impacts. And this is important in the conditions of land degradation, water scarcity, etc.

The aim of the research in this paper is to show the effectiveness of remote monitoring of productivity of grain crops on the example of the Northern district of Kazakhstan using satellite data and image processing methods.

LITERATURE REVIEW

Currently, unmanned aerial vehicles (UAVs) are increasingly being used to monitor agricultural land (GP Shetty et al., 2024a; Ridha Guebsi et al., 2024b). UAVs are becoming an important tool for transforming precision agriculture. UAVs used in agriculture can be categorized into the following classes based on the type of design: fixed wing drones; multi-rotor drones; hybrid drones; and folding wing drones (Ridha Guebsi et al., 2024). Each class of drones fulfils certain functions inherent to that design. For example, fixed wing drones are similar to aeroplanes and are designed in such a way that they can systematically observe large areas. Can operate at high altitudes and provide high-resolution images of the area being surveyed. They can be used for large-scale mapping (Matese, A., et al., 2015). Multicopter drones have increased

maneuverability and hovering capabilities. They can take off and land vertically, which means they can be used in difficult terrain. Hybrid drones provide vertical take-off and landing are used for wide areas. Folding wing drones are mobile, used for small agricultural operations. Depending on the type of cameras mounted on the drones, they have different functional purposes. RGB cameras are widely used for visual inspection of crops, e.g. to assess the density of potato plantations (Abdou, B. et al., 2022). Thermal imaging cameras are used to detect water scarcity.

However, despite their advantages, UAVs have certain disadvantages that limit their application: insufficient autonomy of flight; sensitivity to wind; limited maneuverability and others. Regulatory, technological and economic problems are also significant obstacles to the use of UAVs.

Space-based monitoring using remote sensing data has several advantages over UAVs. Kazakhstan has vast agricultural lands, remote sensing can cover vast areas in a single pass (Natalya N. Karabkina et al., 2018), whereas UAV imagery requires multiple flights. Monitoring satellites update images regularly and are publicly accessible to all. Remote sensing allows surveillance of designated and inaccessible areas, extensive analyses of area change over a long period of time, identification of landforms, vegetation, soil moisture, etc. (Liu T et al., 2025).

Therefore, this paper will focus on the use of remote sensing to assess the productivity of cereal crops.

MATERIALS AND METHODS

To conduct crop yield forecasting in the example of Northern Kazakhstan, the climatic characteristics of the study region were considered. Satellite images of the target area from Sentinel-2 for the period from 2019 to 2023 were also used. These satellite images were obtained from the publicly available Copernicus Browser website: [<https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=5&lat=50.16282&lng=20.78613&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30&dateMode=SINGLE>].

Normalized difference vegetation index (NDVI) was used to predict crop productivity. The indices used in this study were calculated using the following formulas:

$$NDVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right)$$

where, ρ_{NIR} – pixel values from the near infrared channel;

ρ_{RED} – pixel values from the red channel.

Space images interpretation and calculation of normalized difference vegetation index were carried out using ArcGIS software. Cartographic materials of the territory of Northern Kazakhstan from freely available websites (<https://map.ikostanay.kz/>; <https://map.gov4c.kz/egkn/>; <https://data.nextgis.com/en/region/KZ-39/base/>) were also used in the work. Calculation of normalized difference vegetation index was carried out for Denisovskiy region of Kostanay district of Northern Kazakhstan.

The averaged mean annual (January - December) temperature anomalies for the periods under research were taken as deviations from the mean multiyear values for 1961 - 1990 for Kostanay region (RGP «Kazgidromet», 2019-2023).

Annual amounts of precipitation during the study period in northern Kazakhstan were taken from Kazhydromet data, considering the deviation of precipitation anomalies from long-term averages for 1961-1990 (RGP «Kazgidromet», 2019-2023).

The average yield of grain crops in Denisovskiy region of Kostanay district was determined according to the data of the Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan (dynamic tables for the North Kazakhstan region, 2019–2023).

RESULTS AND DISCUSSION

The territory of Denisovsky region of Kostanay district of Northern Kazakhstan was chosen for the research in this work. The land massif of the territory is a set of plots, which are mostly rectangular or trapezoidal in shape.

The largest arrays of agricultural arable land are concentrated in Northern Kazakhstan. According to natural zones Northern Kazakhstan belongs to steppe and forest-steppe zones. The geographical location of the study area is shown in Figure 1.

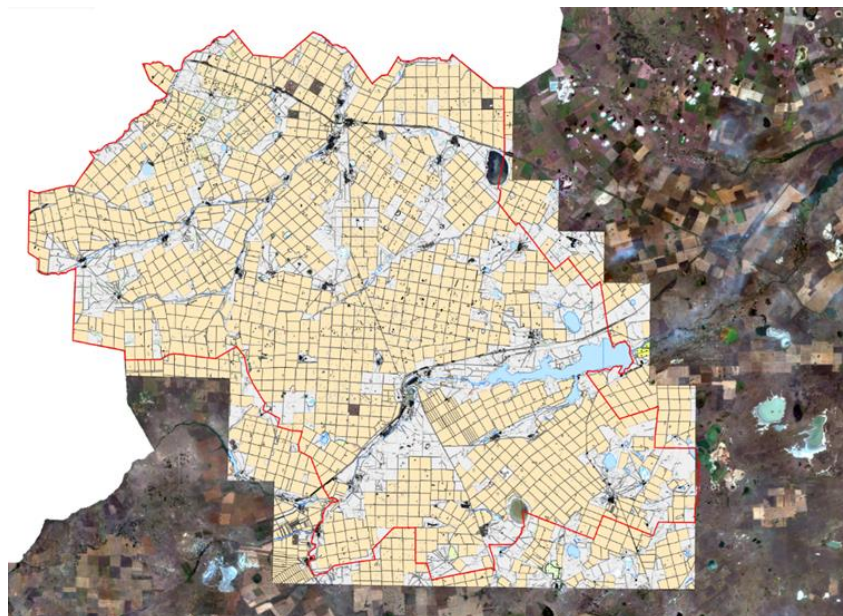


Figure 1. Researched territory – Denisovsky region

Note – compiled by the authors

The researched territory is completely located in the subzone of moderately dry steppes on southern black soils of the steppe zone. Soil cover of the main part of the researched territory is southern normal black soils. In the valleys of the Tobyl and Kamysky Ayat rivers the soil cover is represented by southern carbonate black soils. In the western and south-eastern parts of Denisovsky District, complexes of southern solonetzified black soils with solonets are distinguished. Southern phosphoritic black soils are distributed in small areas of the southern part of the territory (S.S. Baisholanov, 2017).

The characteristics of soil cover, relief, and climatic conditions allow crop production to be defined as the main branch of agriculture in the researched territory. For the research territory in the work climatic indicators for Northern Kazakhstan and NDVI for the fields of Denisovsky region were analyzed.

One of the most important climatic factors influencing the yield of grain crops is temperature. The influence of temperature due to increased evaporation of moisture from the surface and soil freezing is manifested at all stages of plant growth - from seed germination to grain ripening.

Along with temperature, moisture also has a significant impact on grain yields. Soil moisture controls the amount of water that seeps into the soil, recharges groundwater, and influences surface water drainage of moisture into the atmosphere. It affects the physiological processes of plants, determines the success of crop formation at each stage of crop development. Figure 2 shows the graphs of climatic indicators and grain crop yields in the researched territory for the period from 2019 to 2023.

As can be shown in Figure 2(a) - averaged mean annual (January - December) anomalies of temperature deviation from the mean multiyear values for 1961 - 1990 in the considered period of time have positive values. This positively affects the yield of grain crops. The least amount of precipitation in Kostanay district was observed in 2021 (Figure 2(b)). The year 2021 was due to acute drought. With lack of moisture, seeds of crops do not swell or give weak, non-viable sprouts. Lack of moisture with a positive trend in temperature anomaly, as can be shown in Figure 2(a), can lead to lower yields.

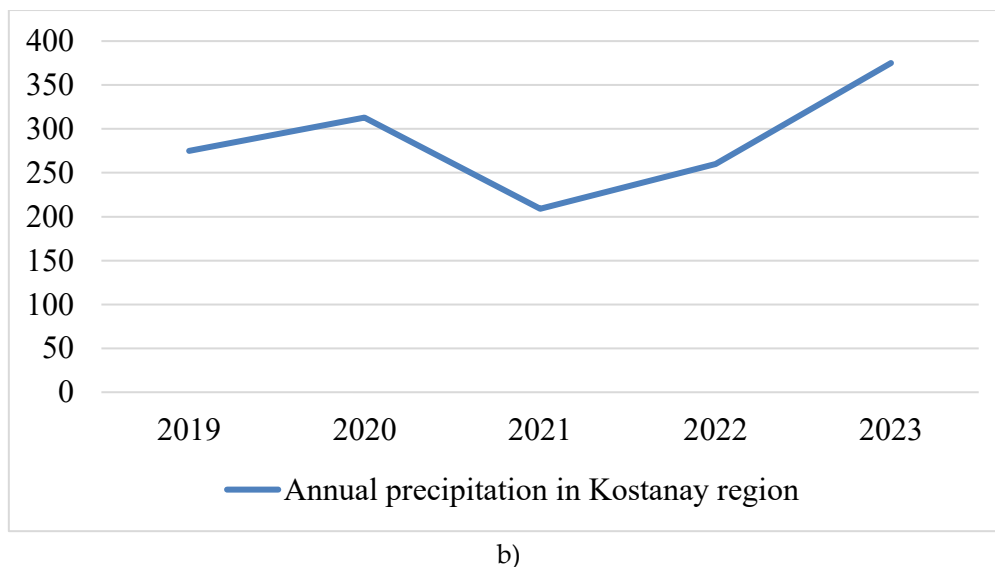
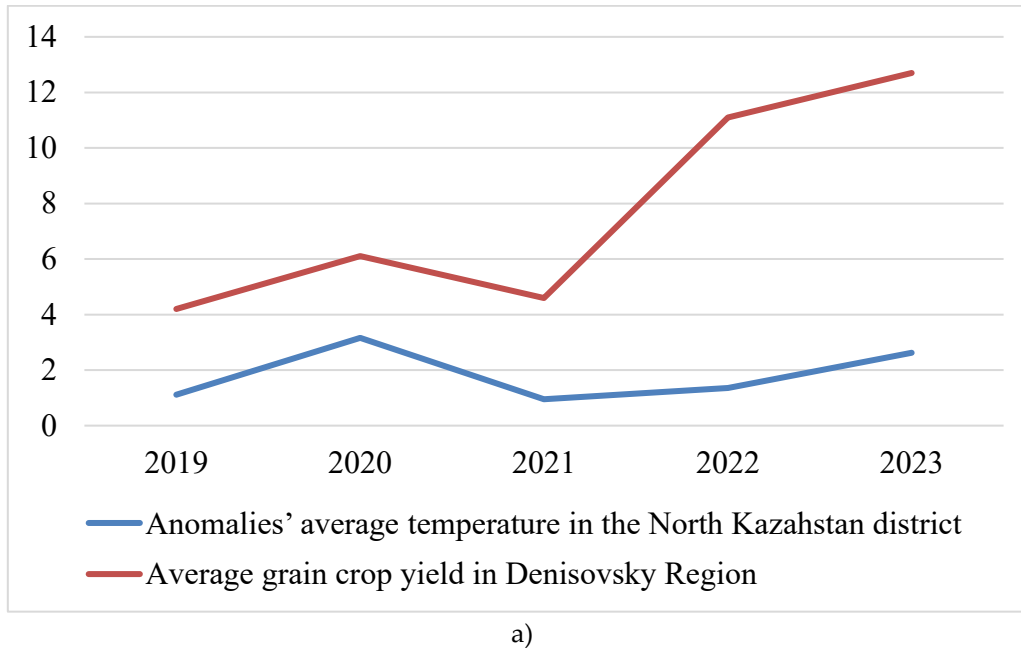


Figure 2. Climatic indicators and grain yields for the period 2019-2023:
a – average temperature (°C), average grain yield (centners per hectare);
b – annual precipitation (mm)

Note – compiled by the authors

A recovery in yields was observed in 2022–2023 due to favourable weather conditions (Figure 2). The graph of annual precipitation in Kostanay region, where the researched territory

is located, correlates with the yield. There is a deviation in 2019. Apparently, this is due to negative anomalies of average seasonal air temperature observed in the researched territory (RGP «Kazgidromet», 2019).

Nowadays, modern methods of remote sensing of the Earth's surface provide continuous and objective data for assessing vegetation conditions. Normalized relative vegetation index NDVI is one of the key indicators used in remote sensing of the Earth. NDVI shows the level of photosynthesis activity and, consequently, biomass in a certain area. This indicator is widely used in predicting crop yields. A high NDVI value of about 0.6 to 0.9 indicates healthy, dense vegetation with high photosynthetic activity. This corresponds to high yields. Low values of the order of 0.1 - 0.3 indicate drought, disease and low crop density. A low NDVI value is indicative of poor yield. NDVI allows tracking the vegetation stages of plants from germination to maturity. Figure 3 shows the relationship between normalized relative vegetation index NDVI and yield.

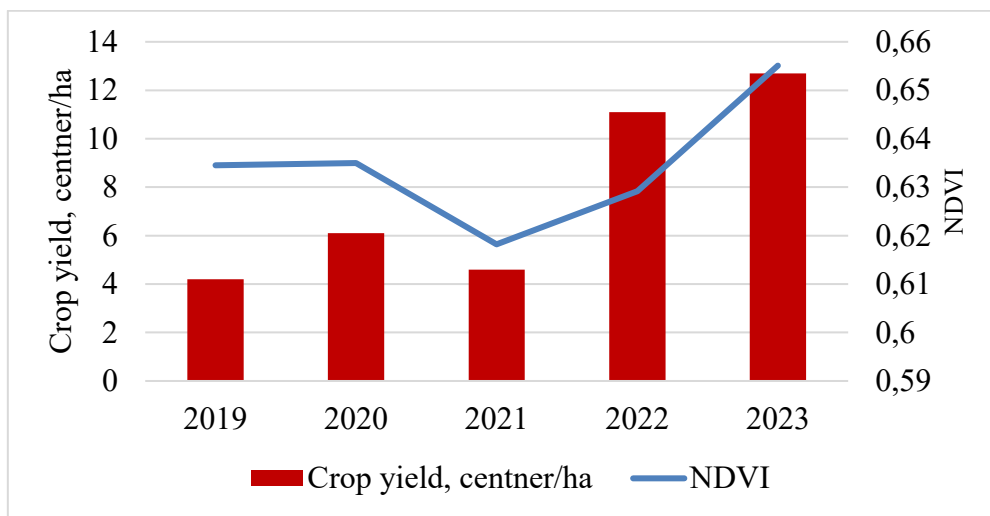


Figure 3. NDVI and yield in the researched territory for 2019-2023

Note – compiled by the authors

As can be seen from Figure 3, there is a certain relationship between the NDVI index of the researched territory and land use yields. Changes in the NDVI index indicator to a certain extent repeat the changes in crop yields for the research period.

CONCLUSION

Earth remote sensing methods can be effectively used in predicting vegetation yields. NDVI values reflect well the biological productivity of crops during the growing season. To some extent, NDVI can be used as a predictive tool to estimate future crop yields.

Analysis of crop yields will be more accurate if such indicators of climatic conditions as air temperature and precipitation are used along with NDVI index.

CONFLICT OF INTERESTS: The authors declare that there is no conflict of interest.

REFERENCES

- G.P. Shetty, A Meghana, Praveen Kottari, Mahesh G. Shetty. (2024). Aerial farming: Revolutionizing M-drone in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture Extension and Social Development*, Vol. 7, № 12, 446-455, <https://doi.org/10.33545/26180723.2024.v7.i12g.1450>

- Ridha Guebsi, Sonia Mami, Kareem Chokmani. (2024). Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review of Applications, Technologies, and Challenges. *Drones*, № 8, 686, <https://doi.org/10.3390/drones8110686>
- Matese, A.; Toscano, P.; Di Gennaro, S.F.; Genesio, L.; Vaccari, F.P.; Primicerio, J.; Belli, C.; Zaldei, A.; Bianconi, R.; Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote sensing*, № 7(3), 2971–2990. <https://doi.org/10.3390/rs70302971>
- Abrougui, K.; Guebsi, R.; Ouni, A.; Boughattas, N.E.; Habel, F.; Barkaoui, Y.; Amami, R.; Khemis, C.; Abdou, B.; Chehaibi, S. (2022). Contribution of UAV-airborne imagery in the study of machine-soil-plant interaction in potato cultivation. *Journal of Oasis Agriculture and Sustainable Development*, № 4, 71–78, <https://doi.org/10.56027/JOASD.spiss102022>
- Natalya N. Karabkina, Nurlan E. Bekmuhamedov, Olga V. Dolbnya, Aset A. Arystanov, Ainur S. Aysarova, Ranida Arystanova, Rehangul A. Kurbanova, Rashid T. Iskakov. Operational Solution of Space Monitoring of Grain Crops in South Kazakhstan on the Basis of Data of Sentinel-2, Landsat-8, PlanetScope. *Information Technologies in Remote Sensing of the Earth – RORSE*, 2018, pp. 321-328, <https://doi.org/10.21046/rorse2018.321>
- Liu T, Yu L, Liu X, Peng D, Chen X, Du Z, Tu Y, Wu H, Zhao Q. A Global Review of Monitoring Cropland Abandonment Using Remote Sensing: Temporal–Spatial Patterns, Causes, Ecological Effects, and Future Prospects. *J. Remote Sens.*, 2025, 5 Article 0584, <https://doi.org/10.34133/remotesensing.0584>
- Copernicus Browser <https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=5&lat=50.16282&lng=-20.78613&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30&dateMode=SINGLE>
- Geoportal of the Kostanay District <https://map.ikostanay.kz/>
- Public Cadastral map <https://map.gov4c.kz/egkn/>
- NextGIS Data <https://data.nextgis.com/en/region/KZ-39/base/>
- РГП «Казгидромет». (2020). Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана за 2019 год. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> // RGP «Kazgidromet». Ezhegodnyi byulleten' monitoringa sostoyaniya i izmeneniya klimata Kazakhstana za 2019 god. (2020). [Annual bulletin on monitoring the state and changes in Kazakhstan's climate for 2019,2020]. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> (In Russ.)
- РГП «Казгидромет». (2021). Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана за 2020 год. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> // RGP «Kazgidromet». Ezhegodnyi byulleten' monitoringa sostoyaniya i izmeneniya klimata Kazakhstana za 2020 god. (2021). [Annual bulletin on monitoring the state and changes in Kazakhstan's climate for 2020, 2021]. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> (In Russ.)
- РГП «Казгидромет». (2022). Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана за 2021 год. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> // RGP «Kazgidromet». Ezhegodnyi byulleten' monitoringa sostoyaniya i izmeneniya klimata Kazakhstana za 2021 god. (2022). [Annual bulletin on monitoring the state and changes in Kazakhstan's climate for 2021, 2022]. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> (In Russ.)
- РГП «Казгидромет». (2023). Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана за 2022 год. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana>

- byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana // RGP «Kazgidromet». Ezhegodnyi byulleten' monitoringa sostoyaniya i izmeneniya klimata Kazakhstana za 2022 god. (2023). [Annual bulletin on monitoring the state and changes in Kazakhstan's climate for 2022, 2023]. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> (In Russ.)
- РГП «Казгидромет». (2024). Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана за 2023 год. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> // RGP «Kazgidromet». Ezhegodnyi byulleten' monitoringa sostoyaniya i izmeneniya klimata Kazakhstana za 2023 god. (2024). [Annual bulletin on monitoring the state and changes in Kazakhstan's climate for 2023, 2024]. <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana> (In Russ.)
- Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам РК. Динамические таблицы по Северо-Казакстанской области. (2019–2023). <https://stat.gov.kz/ru/region/sko/dynamic-tables/1485/> // Byuro natsional'noi statistiki Agentstva po strategicheskomu planirovaniyu i reformam RK. Dinamicheskie tablitsy po Severo-Kazakhstanskoi oblasti. (2019–2023). [Dynamic tables for the North Kazakhstan region, 2019–2023]. <https://stat.gov.kz/ru/region/sko/dynamic-tables/1485/>
- Агроклиматические ресурсы Костанайской области: научно-прикладной справочник. (2017). <https://ingeo.kz/wp-content/uploads/2017/11/%D0%90%D0%B3%D1%80%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%83%D1%80%D1%81%D1%8B-%D0%9A%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%B9-%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9-%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B82.pdf> // Agroklimaticheskie resursy Kostanaiskoi oblasti: nauchno-prikladnoi spravochnik. (2017). [Agroclimatic resources of the Kostanay region: scientific-applied reference book, 2017]. <https://ingeo.kz/wp-content/uploads/2017/11/%D0%90%D0%B3%D1%80%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%83%D1%80%D1%81%D1%8B-%D0%9A%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%B9-%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9-%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B82.pdf>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Рамазанова Жанат Мусановна – химия ғылымдарының кандидаты, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Рамазанова Жанат Мусановна – к.х.н., доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

Ramazanova Zhanat Musanovna – Candidate of Chemical Sciences, associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

e-mail: zhanat2005@yandex.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-2886>,



Замалитдинова Марина Григорьевна – магистр деңгейі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

Замалитдинова Марина Григорьевна – магистр, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

Zamalitinova Marina Grigorievna – Master's degree, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
e-mail: mzamalitinova@bk.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8746-1664>



Камет Аяна Жанатқызы – магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

Камет Аяна Жанатқызы – магистрант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

Kamet Ayana Zhanatkyzy – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
e-mail: zhanatkyzy.ayana@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4416-2696>



Абдикаримов Бекарыс Даниярұлы – магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

Абдикаримов Бекарыс Даниярұлы – магистрант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

Abdikarimov Bekarys Daniyaruly – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
e-mail: kazncsm@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2933-1369>






https://doi.org/10.51885/3134-8009_IES_2026_1_7

XFTAP 61.67.81

ҮЙІНДІЛЕРДІҢ ЖЫЛУДАН ҚОРҒАЙТЫН ЖАБЫНДАРЫНА АРНАЛҒАН ГЕОКОМПОЗИТТЕРДІҢ ТӨЗІМДІЛІГІ ЖӘНЕ МИКРОҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕРІ

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ГЕОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ОТВАЛОВ

MICROSTRUCTURAL STUDIES AND DURABILITY OF GEOCOMPOSITES FOR THERMAL PROTECTION COATINGS OF LANDFILLS

Н.В. Серая ^{1*}, В.В. Литвинов ², Г.К. Даумова ^{1*},
Д.Е. Советханов ¹, М.М. Баймурзина ¹

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

²«Жобалық-экологиялық бюро» ЖШС, Өскемен қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Даумова Гульжан Камалбекқызы, e-mail: GDaumova@edu.ektu.kz

Түйінді сөздер:

геокомпозит, төмен қысымды полиэтилен, геотекстиль, микроқұрылым, төзімділік, растрлық электронды микроскопия, жылудан қорғайтын жабын, пайдалану қасиеттері.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада Қоңырат кенішінің ТМТ үйінділерінің қысқы блоктарын жабу үшін қолданылатын төмен қысымды полиэтиленнен (ТҚП) және геотекстильден тұратын геокомпозиттің төзімділігін бағалау бойынша эксперименттік зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Өртүрлі уақытта (бір айдан үш жылға дейін) пайдаланылған үлгілер зерттелді. JSM-6390LV растрлық электронды микроскопын ("JEOL", 2007) қолдана отырып, ТҚП және геотекстиль беттеріне микроқұрылымдық зерттеулер жүргізілді. Пайдалану процесінде ТҚП бетінде материалдың біртіндеп деформациясын көрсететін микрожарықтар мен ойықтар пайда болатыны анықталды, ал геотекстиль құрылымы тұтастықты сақтайды. Нәтижелер геокомпозиттің полимерлі матрицасының деградациясының сипатын бағалауға және оның ұзақ мерзімді пайдалану жағдайында сыртқы әсерлерге жоғары төзімділігін растауға мүмкіндік береді. Сондай-ақ, полимер бөлігінде микроақаулар болса да, жабын өзінің функционалдығын сақтап, жылу қорғауды тиімді орындауды жалғастыратынын көрсетті.

Ключевые слова:

геокомпозит, полиэтилен низкого давления, геотекстиль, микроструктура, долговечность, растровая электронная

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по оценке долговечности геокомпозита, состоящего из полиэтилена низкого давления (ПНД) и геотекстиля, применяемого для укрытия зимних блоков отвалов ТМО Коунрадского рудника. Исследованы образцы, находившиеся в эксплуатации различное время (от одного месяца до трёх лет).



микроскопия,
теплозащитное
покрытие,
эксплуатационные
свойства.

Проведены микроструктурные исследования поверхностей ПНД и геотекстиля с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390LV («JEOL», 2007). Установлено, что в процессе эксплуатации на поверхности ПНД формируются микротрещины и продавливания, свидетельствующие о постепенной деформации материала, тогда как структура геотекстиля сохраняет целостность. Результаты позволяют оценить характер деградации полимерной матрицы геокомпозита и подтвердить его высокую устойчивость к внешним воздействиям в условиях длительной эксплуатации. Также выявлено, что даже при наличии микродефектов в полимерной части покрытие сохраняет свою функциональность и продолжает эффективно выполнять теплозащитные задачи.

Keywords:

geocomposite, low-
pressure polyethylene,
geotextile, microstructure,
durability, scanning
electron microscopy,
thermal protective coating,
operational properties.

ABSTRACT

The article presents the results of experimental studies to assess the durability of a geocomposite consisting of low-pressure polyethylene (HDPE) and geotextile used to shelter winter blocks of the TMO dumps of the Kounrad mine. Samples that have been in use for various periods (from one month to three years) have been studied. Microstructural studies of HDPE and geotextile surfaces were performed using a JSM-6390LV scanning electron microscope (JEOL, 2007). It has been established that microcracks and perforations form on the HDPE surface during operation, indicating gradual deformation of the material, while the geotextile structure remains intact. The results make it possible to assess the nature of the degradation of the polymer matrix of the geocomposite and confirm its high resistance to external influences under long-term operation conditions. It was also revealed that even in the presence of microdefects in the polymer part, the coating retains its functionality and continues to effectively perform thermal protection tasks.

КІРІСПЕ

Тау-кен кәсіпорындарын пайдалану жағдайында қолайсыз климаттық факторлардың әсеріне ұшыраған технологиялық үйінділер мен қысқы блоктардың сақталуы мен тұрақтылығын қамтамасыз ету ерекше маңызға ие. Мұндай объектілерді қорғаудың тиімді әдістерінің бірі – геосинтетикалық материалдарды, атап айтқанда, жылудан қорғау, оқшаулау және эрозияға қарсы жабындар функцияларын орындайтын геокомпозиттерді қолдану (Litvinov et al., 2023). Геосинтетиктерді қолдану жылу шығынын азайтуға, үйінді массаларының қатып қалуын болдырмауға, судың қанықтылығын азайтуға және экстремалды климаттық жағдайларда құрылымдардың төзімділігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді (Wu et al., 2020).

Полимерлі және тоқыма құрамдас бөліктерінен тұратын геокомпозиттер жоғары беріктікке, химиялық және биологиялық әсерлерге төзімділікке және дренаждық функцияларды орындау қабілетіне ие, бұл оларды гидротехникалық, көліктік және тау-кен құрылысында сұранысқа ие етеді (Carneiro and Lopes, 2022). Ең көп тарағандары су өткізбейтін және механикалық төзімділікті біріктіретін төмен қысымды полиэтилен (ТҚП) және тоқыма емес геотекстиль негізіндегі геокомпозиттер (Al-Barqawi et al., 2021; Scholz et al., 2024). Геотекстильдер күрделі ландшафттық-климаттық әсерлер жағдайында беттерді нығайту, дренаждау, жылу оқшаулау және қорғау үшін қолданылатын әмбебап талшықты материалдар екені белгілі (Tanasä et al., 2022).

Күн радиациясының, мұздату-еріту циклдерінің, механикалық жүктемелердің және химиялық қартаюдың әсерінен ұзақ уақыт жұмыс істеу процесінде полимер

компоненттерінің құрылымында жабынның пайдалану қасиеттеріне әсер ететін деградациялық өзгерістер орын алады (Carneiro et al., 2022; Markiewicz et al., 2024). Зерттеулер көрсеткендей, полимерлердің қартаюында микрожарықтардың пайда болуы, тотығу, кристалдылықтың төмендеуі және беткі морфологияның өзгеруі байқалады (Lebedev et al., 2023; Balla et al., 2019). Бұл жағдайда полипропилен немесе полиэфир талшықтарынан жасалған геотекстильді қабаттар полимерлі талшықтармен салыстырғанда климаттық және механикалық әсерлерге жоғары төзімділікті көрсетеді (Chubarenko et al., 2023; Koerner et al., 2017).

Геосинтетикалық материалдардың төзімділігін бағалау үшін микроқұрылымдық талдау әдістері (Odeh et al., 2022), атап айтқанда, морфологиялық өзгерістерді, микродефектілерді және беттің тозу формаларын анықтауға мүмкіндік беретін растрлық электронды микроскопия (РЭМ) белсенді қолданылады (Jwaida et al., 2023; Aparicio-Ardila et al., 2021). РЭМ зерттеулері полимерлердің қартаю заңдылықтарын анықтауға және материалдың қызмет ету мерзімі мен оның құрылымының өзгеруі арасындағы корреляцияны анықтауға мүмкіндік береді. Бұл деректер геосинтетиктердің төзімділігін болжау және олардың жұмысына төзімділігін арттыру бойынша ұсыныстар жасау үшін қолданылады (Vicuña et al., 2024).

Осыған байланысты, оның төзімділігін бағалау және материалдың бұзылуын немесе тұтастығын сақтауды анықтайтын факторларды анықтау мақсатында ұзақ мерзімді пайдалану процесінде ТҚП және геотекстиль негізінде геокомпозитте болатын микроқұрылымдық өзгерістерді кешенді зерттеу өзекті міндет болып табылады.

Бұл жұмыс Қоңырат кенішінің ТМТ үйінділерінің қысқы блоктарының жылудан қорғайтын жабыны ретінде қолданылатын геокомпозиттің микроқұрылымын эксперименттік зерттеуге арналған. Зерттеу барысында растрлық электронды микроскопияны қолдана отырып, әртүрлі уақытта жұмыс істеп тұрған үлгілерді салыстыру жүргізілді, бұл полимер матрицасы мен геотекстиль қабатының құрылымын пайдалану ұзақтығы мен сыртқы әсерлерге байланысты өзгерту заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді.

МАТЕРИАЛДАР МЕН ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

Зерттеу нысаны екі функционалды қабаттан тұратын геокомпозит болды: төмен қысымды полиэтилен пленкасы (ТҚП) және тоқылмаған геотекстиль, ол Қоңырат кенішінің техногендік-минералды түзілімдер үйінділерінің (ТМТ) қысқы блоктарының жылудан қорғайтын жабыны ретінде қолданылады. Бұл материал үйінділердің беткі қабаттарының қатып қалуын және артық ылғалдануын болдырмау үшін, сондай-ақ жел мен су эрозиясынан қорғау үшін қолданылады.

Пайдалану мерзімінің геокомпозиттің микроқұрылымына әсерін бағалау үшін әр түрлі уақытта жұмыс істеп тұрған үлгілердің үш тобы іріктелді:

- 3 жыл — 2020 жылғы жабын үлгілері (3-ші блок, 16-шы үйінді);
- 2 жыл — 2021 жылғы жабын үлгілері (20-шы блок, 16-шы үйінді);
- 1 ай — 2022 жылғы жабын үлгілері (26-шы блок, 16-шы үйінді).

Әрбір үлгі екі қабатты құрылым болды: сыртқы жағы — ТҚП пленкасы, ішкі жағы — тоқыма емес геотекстильді мата (1-3 суреттер).

Үлгілер пайдаланылатын үйінділердің бетінен алынып, алдын ала тазалаусыз зертханалық зерттеулерге жіберілді.

Үлгілерді микроқұрылымдық талдауға дайындау

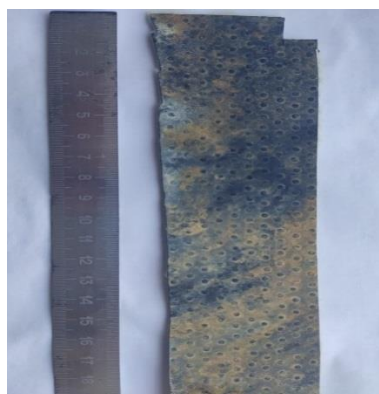
Микроқұрылымдық зерттеулер үшін үлгілер екі күйде зерттелді — жуылмаған (пайдаланудан кейін бастапқы түрінде) және жуылған (беткі ластануды алып тастағаннан

кейін). Микроқұрылымдық зерттеулерге дайындық кезінде геокомпозит үлгілері екі бөлікке бөлінбей зерттелді, беттердің екі жағында, олардың бірінде төмен қысымды полиэтилен қабаты (ТҚП), екіншісінде геотекстиль қабаты болды.



1-сурет. Сыртқы (ТҚП) және ішкі жағынан (геотекстиль) геокомпозит үлгісінің түрі (3-ші блок, 16-шы үйінді, 2020 ж.).

Ескерту – авторлармен құрастырылған



2-сурет. Сыртқы (ТҚП) және ішкі жағынан (геотекстиль) геокомпозит үлгісінің түрі (20-шы блок, 16-шы үйінді, 2021 ж.).

Ескерту – авторлармен құрастырылған



3-сурет. Сыртқы (ТҚП) және ішкі жағынан (геотекстиль) геокомпозит үлгісінің түрі (26-шы блок, 16-шы үйінді, 2022 ж.).

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Жуу бейтарап жуғыш зат пен жұмсақ щетканы пайдаланып ағынды суда жүргізілді, содан кейін үлгілер тазартылған суы бар шыны ыдысқа салынып, Struers Metason 60T ультрадыбыстық ваннасында 2-3 минут ішінде қосымша тазартылды. Үлгілерді кептіру Struers Drybox 2 құрылғысында бөлме температурасында ылғал толығымен жойылғанға дейін жүргізілді.

Кейінгі талдау үшін үлгілер тұрақты жанасуды қамтамасыз ететін және микроскопия кезінде бетте зарядтардың жиналуын болдырмайтын өткізгіш көміртекті желім арқылы арнайы ұстағыштарға бекітілді.

Зерттеу әдістері

Микроқұрылымды зерттеу төмен вакуум режимінде жұмыс істейтін JSM-6390LV (JEOL шығарған, 2007 ж.) растрлық электронды микроскоптың көмегімен жүргізілді. Талдау геокомпозиттің екі жағы — полимер (ТҚП) және тоқыма (геотекстиль) үшін жүргізілді. Микрографтар әртүрлі үлкейтулермен ($\times 35$ -тен $\times 5000$ -ға дейін) түсірілді, бұл беттік морфологияның ерекшеліктерін, ақаулардың сипатын және полимер матрицасының деградация дәрежесін анықтауға мүмкіндік берді. Алынған кескіндер құрылымдық өзгерістерді, микрожарықтарды, деформацияларды және бөгде қосылыстардың болуын анықтау мақсатында талданды. Деректерді сапалы өңдеу сандық форматтағы микрографтарды қолдану арқылы жүзеге асырылды. Беттің күйін бағалау жұмыс уақыты бойынша ерекшеленетін үлгілердің суреттерін талдау негізінде визуалды және салыстырмалы түрде жүргізілді.

Геотекстиль құрылымы туралы қосымша мәліметтер

Зерттелетін геокомпозиттің бөлігі ретінде қолданылатын тоқыма емес геотекстиль-жоғары төзімділігі, өткізгіштігі және ультракүлгін сәулелерге, көгеруге және саңырауқұлақ инфекцияларына төзімділігі бар синтетикалық талшықтардан (полипропилен немесе полиэфир) жасалған термиялық бекітілген кенеп. Бұл материал механикалық төзімділік пен химиялық инерттің үйлесуіне байланысты дренаждық және сүзу жүйелерінің барлық түрлерінде қолданылады.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Жуылмаған геокомпозит үлгілерінің микроқұрылымдық ерекшеліктері

Әр түрлі уақытта жұмыс істеп тұрған жуылмаған геокомпозит үлгілерін микроқұрылымдық талдау полиэтилен пленкасы мен геотекстиль қабатының бетіндегі тән өзгерістерді анықтауға мүмкіндік берді. Қабаттың ТҚП бетінің микрографтарында (кесте 1) тығыздығы мен морфологиясы әртүрлі аймақтары бар полимер матрицасының көп фазалы құрылымының болуы байқалады. Бұл аймақтар дұрыс емес пішінді борпылдақ оралған элементтермен ұсынылған, бұл жұмыс кезінде жабысып қалған кен материалының қалдықтарына байланысты.

Барлық үлгілер үшін микро ақаулардың, атап айтқанда микрожарықтар мен жергілікті көз жасының болуы, әсіресе екі жылдан астам пайдаланудағы материалдарда байқалғаны тіркелді (1 кесте). Геокомпозиттің беті кептіру процесінде жарылып, жарықтардың мозаикалық үлгісін құрайтын құрғақ жауын-шашынның жұқа қабатының пайда болуымен сипатталады. Бұл сурет ылғал мен ультракүлгін сәулелердің циклдік әсеріне ұшыраған полимерлі материалдарға (Wu et al., 2020; Markiewicz et al., 2024) тән.

Уақыт өте келе жарықтар минералды материалдың ірі түйіршікті бөлшектерімен толтырылатыны байқалды, бұл полимер бетінің күйін визуалды бағалауды қиындатады. Кейбір жағдайларда полимер қабатының жұқа тақтайшаларының жиектері бүгіліп бөлінуі байқалады, бұл климаттық факторлардың әсерінен шаршау шытынаулары мен ТҚП шөгү процестерін көрсетеді.

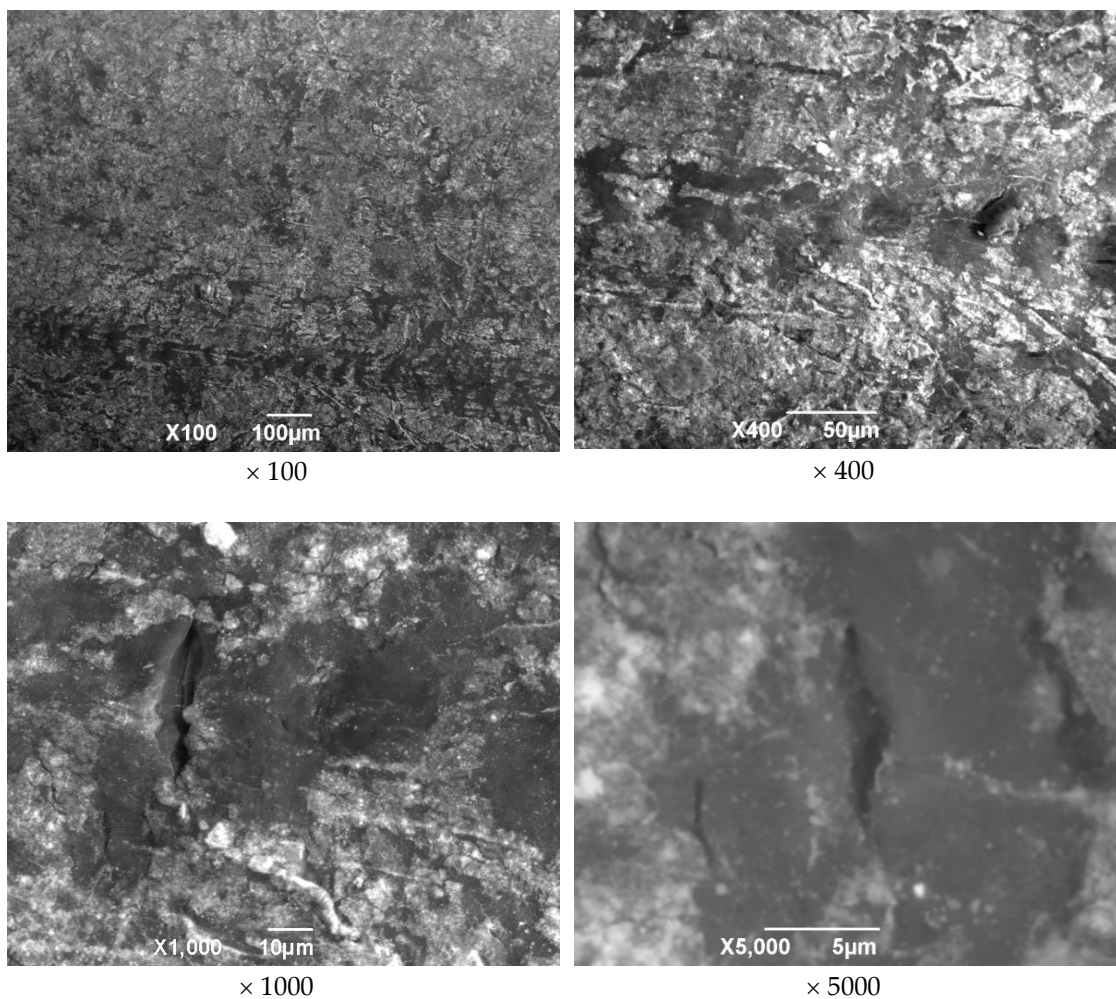
1-кесте. Өртүрлі уақытта пайдалануда болған жуылмаған геокомпозит үлгілерінің
сыртқы бетінің микроқұрылымы

Жуылмаған геокомпозит үлгілерінің сыртқы бетінің микроқұрылымы / пайдалану мерзімі	
Ұлғайту	2022 жылғы жабын (26-шы блок, 16-шы үйінді) 1 ай
x 100-200	2021 жылғы жабын (20-шы блок, 16-шы үйінді) 2 жыл
	2020 жылғы жабын (3-ші блок, 16-шы үйінді) 3 жыл
x 5000	2021 жылғы жабын (20-шы блок, 16-шы үйінді) 2 жыл
	2020 жылғы жабын (3-ші блок, 16-шы үйінді) 3 жыл

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Үлгілерді жуганнан кейінгі бетінің жағдайы

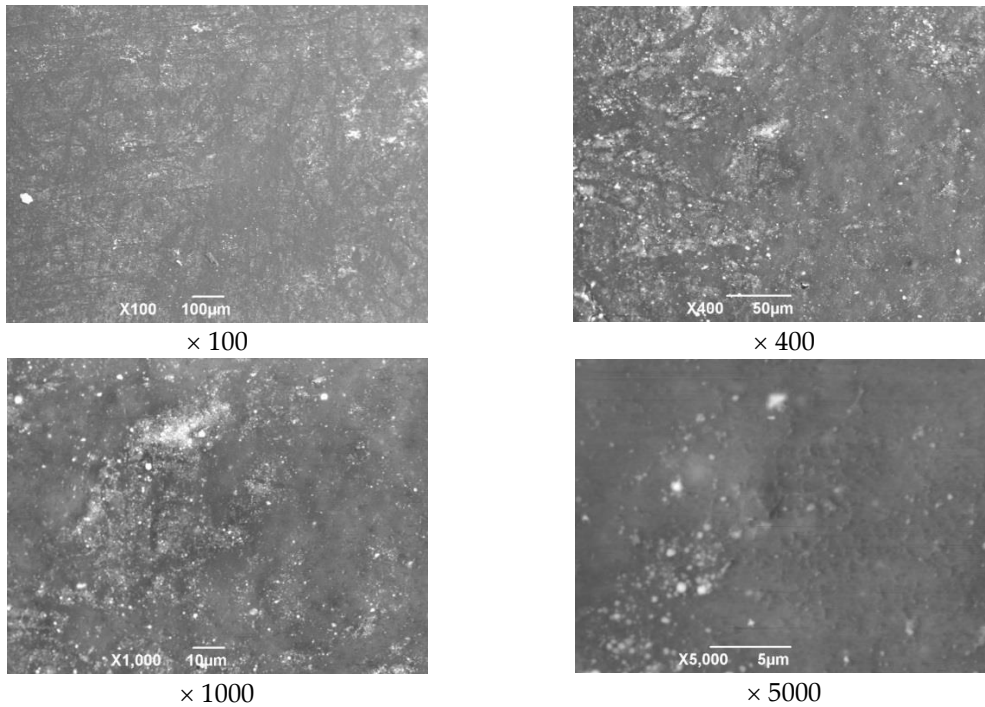
Ластануды алып тастағаннан және ультрадыбыстық тазартудан кейін ТҚП пленкасының беті қайта зерттелді. Жуу беткі жауын-шашынның әсерін болдырмауға және полимер матрицасының шынайы күйін анықтауға мүмкіндік берді. Микрофотографияны талдау ТҚП қабаттың құрылымы тұтастықты сақтайтынын көрсетті, бірақ механикалық зақымданумен байланысты емес микрожарықтар, микрожарықтар мен ойықтар бетінде айқын көрінеді. Микрошытынаулардың ең көп саны үш жыл жұмыс істеп тұрған үлгіде тіркелген (4-сурет).



4-сурет. Жуылған геокомпозит үлгісінің сыртқы бетінің микроқұрылымы
(3-ші блок, 16-шы үйінді, 2020 ж.)

Ескерту – авторлармен құрастырылған

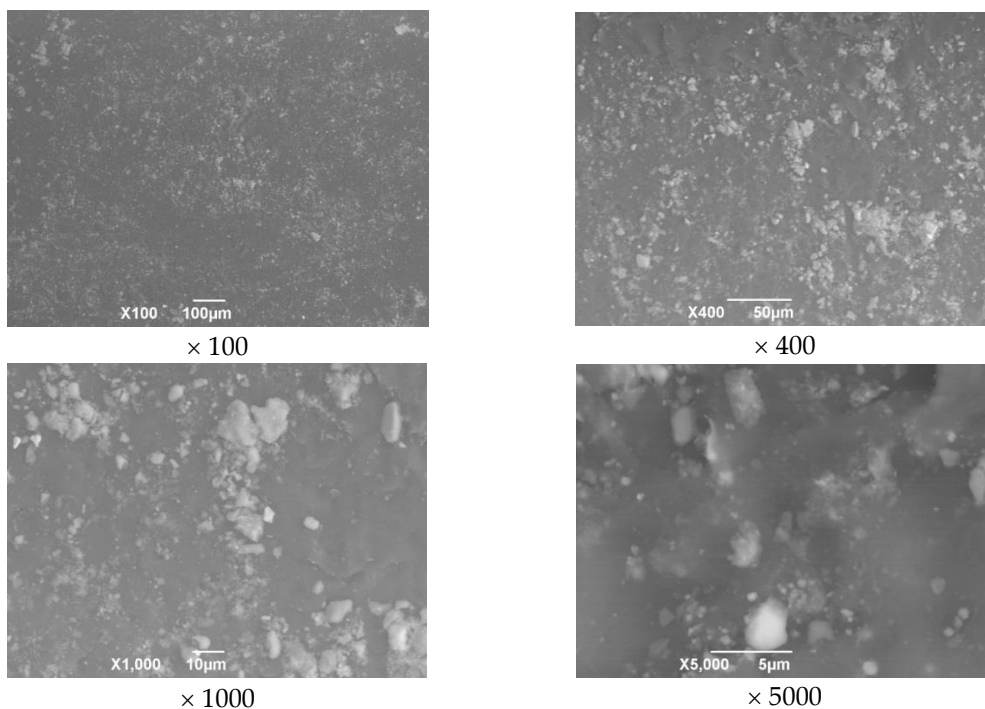
Бұл ақаулар кездейсоқ бағытталған, ұзындығы мен ені әртүрлі, бұл полимер құрылымында деформациялар мен релаксация процестерінің біртіндеп жиналуын көрсетеді. Екі жыл жұмыс істеген үлгіде (5-сурет) беті негізінен жабынның тұтастығын бұзбай ойықтармен және ойылымдармен сипатталады.



5-сурет. Жуылған геокомпозит үлгісінің сыртқы бетінің микроқұрылымы
(20-шы блок, 16-шы үйінді, 2021 ж.)

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Бір айлық пайдалану мерзімінің үлгілері (6-сурет) микро ақаулардан тұрмайды; беті біркелкі және тегіс, бұл пайдаланудың бастапқы кезеңінде құрылымдық өзгерістердің жоқтығын растайды.



Сурет 6 – Жуылған геокомпозит үлгісінің сыртқы бетінің микроқұрылымы
(26-шы блок, 16-шы үйінді, 2022 ж.)

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Бақылау деректері полимерлі геосинтетиктердің төзімділігін зерттеу нәтижелеріне сәйкес келеді, оған сәйкес деградацияның бастапқы белгілері күн радиациясының және мұздату-еріту циклдерінің әсерінен 2-3 жыл жұмыс істегеннен кейін көрінеді (Markiewicz et al., 2024).

Геотекстильді қабаттың микроқұрылымы

Үш жыл жұмыс істегеннен кейін геокомпозиттің құрамынан алынған геотекстиль бетінің микроқұрылымын зерттеу нәтижелері тоқыма емес мата термиялық бекіту әдісімен біріктірілген ретсіз орналастырылған синтетикалық талшықтар (моножіп) жүйесімен ұсынылғанын көрсетті. Алынған микрографтар (2-кесте) талшықтардың тығыз және біркелкі құрылымды құрайтындығын көрсетеді, онда материалдың төзімділігі мен сүзу өнімділігін қамтамасыз ететін нақты кеңістіктік ұйымы сақталады.

Талшық аралық кеңістікте және кенептің қалыңдығында әртүрлі минералды құрамның қосындылары анықталды-конкрециялар, секрециялар, оралған және оралмаған тау жыныстарының бөлшектері, минералдардың сынықтары, сондай-ақ кен материалының фрагменттері. Бұл бөлшектер жұмыс кезінде матаның құрылымына енеді және талшықтардың тығыз тоқуы мен агломерациясы арқылы бекітіледі. Мұндай қосындылардың болуы геотекстильді қабаттың қоршаған ортамен белсенді әрекеттесуін растайды және оның бөлшектерді сүзу мен сақтаудағы рөлін көрсетеді.

Сыртқы көріністе гео-мата сыртқы ортаға ұзақ уақыт әсер еткеннен кейін де айтарлықтай өзгерістерге ұшыраған жоқ: талшықтар тұтастығын сақтап қалды, құрылымның созылу, бұзылу немесе деформация белгілері байқалмайды. Микроскопиялық талдау кезінде саңылаулар, түйіндер, қатпарлар, қыртыстар, жергілікті үзілістер, өрімдер, жіптердің өтуі немесе тіндерді босататын басқа ақаулар табылған жоқ. Материалдың талшықты құрылымы үлгінің бүкіл қалыңдығында тығыз, біркелкі және тұрақты болып қалды.

Бұл деректер геокомпозиттердің жұмыс жағдайларына тән механикалық, климаттық және гидродинамикалық әсерлерге геотекстильді қабаттың жоғары тұрақтылығын көрсетеді. Алынған нәтижелер инженерлік-геологиялық конструкцияларда көпжылдық пайдалану кезінде полипропилен және полиэфир геотекстильдерінің құрылымдық сипаттамаларының төзімділігі мен тұрақтылығын растайтын шетелдік зерттеулердің (Markiewicz et al., 2024; Chubarenko et al., 2023) деректеріне сәйкес келеді.

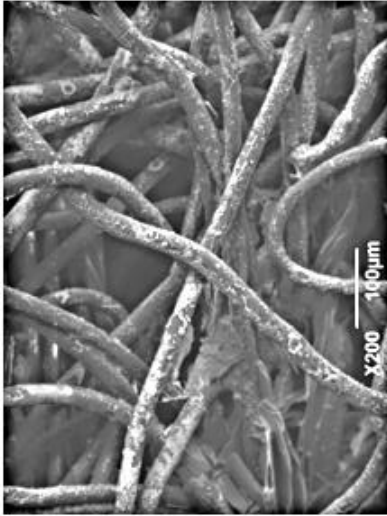
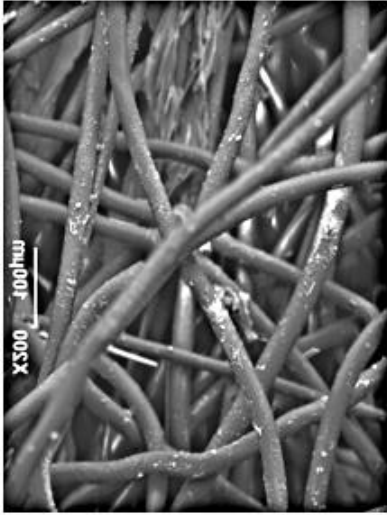
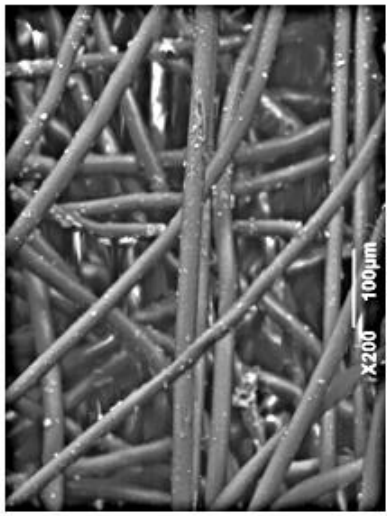
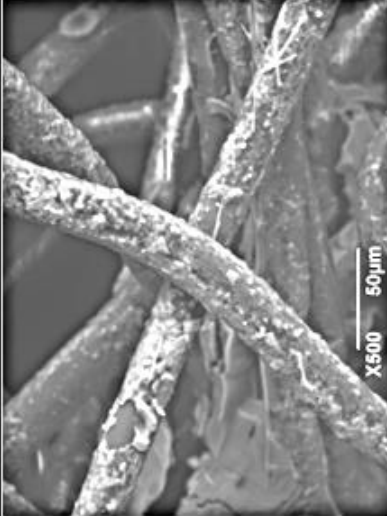
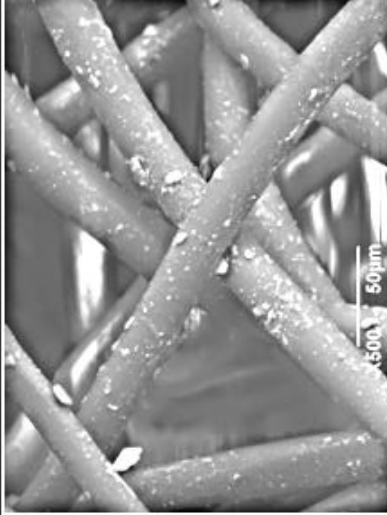
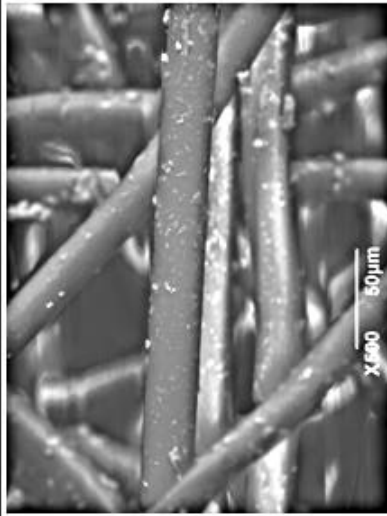
Осылайша, жүргізілген микроқұрылымдық талдау геокомпозиттің геотекстильді қабаты эксплуатациялық факторларға ұзақ уақыт әсер етсе де құрылымдық тұтастық пен функционалдық қасиеттерді сақтайтынын көрсетті, бұл оның арматуралық және сүзгі элементі ретінде сенімділігі мен тиімділігін растайды.

Нәтижелерді жалпылау

Әртүрлі жұмыс ұзақтығының үлгілерінің микроқұрылымдық сипаттамаларын салыстыру деградацияға ұшыраған негізгі элемент ТҚП пленкасы екенін көрсетеді, ал геотекстиль өз құрылымын сақтайды. ТҚП-де микрожарықтар мен жергілікті деформациялардың болуы фотоқартаюмен, тотығумен және температураның ауытқуымен байланысты, бұл ішкі кернеулердің релаксациясын және молекулааралық байланыстардың бұзылуын тудырады.

Жалпы, талдау көрсеткендей, үш жыл жұмыс істегеннен кейін де геокомпозит тұтастығын сақтайды және анықталған микро ақаулар материалдың қорғаныс функцияларының бұзылуына әкелмейді. Бұл қысқы блоктардың жылудан қорғайтын жабыны ретінде пайдаланылған кезде зерттелетін геокомпозиттің жеткілікті төзімділігін растайды.

2-кесте. Өртүрлі уақытта пайдалануда болған жуылмаған геокомпозит үлгілерінің сыртқы бетінің микроқұрылымы

Жуылмаған геокомпозит үлгілерінің сыртқы бетінің микроқұрылымы / пайдалану мерзімі			
Ұлғайту	2020 жылы жабын (3-ші блок, 16-шы үйінді) 3 жыл	2021 жылы жабын (20-шы блок, 16-шы үйінді) 2 жыл	2022 жылы жабын (26-шы блок, 16-шы үйінді) 1 ай
x 200			
x 500			

Ескерту – авторлармен хұрастырылған

ҚОРЫТЫНДЫ

Қоңырат кенішінің ТМТ үйінділерінің қысқы блоктарының жылудан қорғайтын жабыны ретінде пайдаланылатын төмен қысымды полиэтиленнен (ТҚП) және тоқыма емес геотекстильді төсемнен тұратын геокомпозиттің микроқұрылымын эксперименттік зерттеулер нақты тау-кен техникалық жағдайларда ұзақ уақыт пайдалану кезінде материал құрылымының өзгеру заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді.

1. Пайдалану процесінде геокомпозиттің құрылымы әсер ету ұзақтығына және сыртқы ортаның климаттық факторларының өзгеруіне байланысты өзгерістерге ұшырайтыны анықталды.

2. Екі жылдан астам уақыт бойы жұмыс істеп тұрған ТҚП пленкасының бетінде күн радиациясының, температуралық тербелістердің және механикалық жүктемелердің әсерінен полимер матрицасының біртіндеп деградациясын көрсететін микрожарықтар мен жергілікті деформациялар анықталды. Бұл жағдайда жабынның тұтастығының бұзылуы тіркелмеген, бұл материалдың механикалық бұзылуға жоғары тұрақтылығын растайды.

3. Геокомпозиттің геотекстильді қабаты үш жыл жұмыс істегеннен кейін де құрылымдық тұтастығын сақтайды. Микроқұрылымдық талдау талшықтардың созылу, жыртылу және шаршау зақымдану белгілерінің жоқтығын көрсетті, бұл тоқыма емес термиялық матаның жоғары механикалық төзімділігі мен климаттық тұрақтылығын растайды.

4. Зерттеу нәтижелері геокомпозиттің полимерлі компоненті — ТҚП пленкасы қартаюдың ескірудің ең үлкен дәрежесіне ұшырайтынын көрсетеді, ал геотекстиль жабын құрылымының бұзылуын болдырмайтын және оның пайдалану қасиеттерінің сақталуын қамтамасыз ететін тұрақтандыру функциясын орындайды.

5. Тұтастай алғанда, зерттелген геокомпозит қысқы үйінді блоктарының жылудан қорғайтын жабыны ретінде пайдаланылған кезде жоғары беріктік пен пайдалану сенімділігін көрсетті. Материал температура мен климаттың экстремалды факторларына үш жыл әсер еткеннен кейін де қорғаныс қасиеттері мен құрылымдық тұрақтылығын сақтайды.

6. Алынған нәтижелер геосинтетикалық материалдардың деградациялық өзгерістерін диагностикалау үшін растрлық электронды микроскопияны (РЭМ) қолданудың тиімділігін растайды. Техника инженерлік-геологиялық құрылыстарда қолданылатын геокомпозиттік жабындардың қызмет ету мерзімін болжау және олардың төзімділігін арттыру жөніндегі шараларды әзірлеу үшін ұсынылуы мүмкін.

Осылайша, ұзақ мерзімді пайдалану кезінде геокомпозиттің микроқұрылымын қалыптастыру мен өзгертудің белгіленген заңдылықтары қарқынды климаттық және механикалық әсерлер жағдайында жұмыс істеуге арналған геосинтетикалық материалдардың құрамын, құрылымын және өндіріс технологиясын оңтайландыру үшін ғылыми негіз бола алады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу сыртқы қаржыландыруды алған жоқ.

АЛҒЫС: Авторлар мақаланың сапасын жақсартуға ықпал еткен құнды ескертулер үшін анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар осы мақаланы әзірлеу барысында жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын, соның ішінде генеративті тілдік модельдерді пайдаланбағанын растайды.

Барлық мәтіндік материалдар, деректер мен талдау нәтижелері авторлар тарапынан дербес дайындалды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Litvinov, V.V., Aitekenova, D.A., Zhuravlev, I.P., Seraya, N.V., Daumova, G.K. (2023). Increasing the Duration of Dump Leaching of Copper Under Winter Conditions. *Metallurgist*, 67(3-4), 542-553. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01536-x>
- Wu, H., Yao, C., Li, C., Miao, M., Zhong, Y., Lu, Y., Liu, T. (2020). Review of application and innovation of geotextiles in geotechnical engineering. *Materials*, 13(7), 1774. <https://doi.org/10.3390/ma13071774>
- Carneiro, J.R., Lopes, M.d.L. (2022). Weathering of a nonwoven polypropylene geotextile: Field vs. laboratory exposure. *Materials*, 15, 8216. <https://doi.org/10.3390/ma15228216>
- Al-Barqawi, M., Aqel, R., Wayne, M., Titi, H., Elhajjar, R. (2021). Polymer Geogrids: A Review of Material, Design and Structure Relationships. *Materials*, 14, 4745. <https://doi.org/10.3390/ma14164745>
- Scholz, P., Falkenhagen, J., Wachtendorf, V., Brüll, R., Simon, F.-G. (2024). Investigation on the Durability of a Polypropylene Geotextile under Artificial Aging Scenarios. *Sustainability*, 16, 3559. <https://doi.org/10.3390/su16093559>
- Tanasă, F., Nechifor, M., Ignat, M.-E., Teacă, C.-A. (2022). Geotextiles - A Versatile Tool for Environmental Sensitive Applications in Geotechnical Engineering. *Textiles*, 2, 189-208. <https://doi.org/10.3390/textiles2020011>
- Carneiro, J.R., Lopes, M.d.L. (2022). Weathering of a nonwoven polypropylene geotextile: Field vs. laboratory exposure. *Materials*, 15, 8216. <https://doi.org/10.3390/ma15228216>
- Markiewicz, A., Koda, E., Kiraga, M., Wrzesiński, G., Kozanka, K., Naliwajko, M., Vaverková, M.D. (2024). Polymeric Products in Erosion Control Applications: A Review. *Polymers*, 16, 2490. <https://doi.org/10.3390/polym16172490>
- Lebedev, M.P., Startsev, O.V., Petrov, M.G., Kopyrin M.M. (2023). The Formation of Microcracks during Climatic Aging of Polymer-Composite Materials. *Polymer Science, Series D*, 16, 116-123. <https://doi.org/10.1134/S199542122301015X>
- Balla, V.K., Kate, K.H., Satyavolu, J., Singh, P., Tadimetri, J.G.D. (2019). Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects. *Composites Part B: Engineering*, 106956, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106956>
- Chubarenko, B., Domnin, D., Simon, F.-G., Scholz, P., Leitsin, V., Tovpinets, A., Karmanov, K., Esiukova, E. (2023). Change over Time in the Mechanical Properties of Geosynthetics Used in Coastal Protection in the South-Eastern Baltic. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 113. <https://doi.org/10.3390/jmse11010113>
- Koerner, R., Hsuan, Y., Koerner, G. (2017). Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes. *Geosynthetics International*, 24, 198-212. <https://doi.org/10.1680/jgein.16.00026>
- Odeh, N.A., Al-Rkaby, A.H.J. (2022). Strength, Durability, and Microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00988. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00988>
- Jwaida, Z., Dulaimi, A., Mashaan, N., Othuman Mydin, M.A. (2023). Geopolymers: The Green Alternative to Traditional Materials for Engineering Applications. *Infrastructures*, 8, 98. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8060098>
- Aparicio-Ardila, M.A., Pedroso, G.O.M., Kobelnik, M., Valentin, C.A., Luz, M.P., Silva, J.F. (2021). Evaluating the degradation of a nonwoven polypropylene geotextile exposed to natural weathering for 3 years. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7, 69. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00314-6>

Vicuña, L., Jaramillo-Fierro, X., Cuenca, P.E., Godoy-Paucar, B., Inga-Lafebre, J.D., Chavez Torres, J.L., García, J.F., Guaya, D., Febres, J.D. (2024). Evaluation of the Effectiveness of Geogrids Manufactured from Recycled Plastics for Slope Stabilization-A Case Study. *Polymers*, 16, 1151. <https://doi.org/10.3390/polym16081151>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Серая Наталья Владимировна – химия ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Серая Наталья Владимировна – кандидат химических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Seraya Natalya Vladimirovna – Candidate of Chemical Sciences, D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: NSeraya@edu.ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7991-9129>



Литвинов Вадим Викторович – техника және технология магистрі, «Жобалық-экологиялық бюро» ЖШС, Өскемен, Қазақстан

Литвинов Вадим Викторович – магистр техники и технологии, ТОО «Проектно-экологическое бюро», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Litvinov Vadim Viktorovich – master of Engineering and Technology, «Proektno-ekologicheskoe byuro» LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: litvinov_vadim@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7272-2526>



Даумова Гульжан Камалбеккызы – техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Даумова Гульжан Камалбеккызы – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Daumova Gulzhan Kamalbekkyzy – Candidate of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: GDaumova@edu.ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6312-5343>



Советханов Дәурен Ерланұлы – металлургиялық инженерия докторанты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Советханов Дәурен Ерланұлы – докторант металлургической инженерии, Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серікбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Sovetkhanov Dauren Yerlanuly – doctoral student in Metallurgical Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: dauren.sovetkhanov@bk.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0945-5991>



Баймурзина Мерей Маратқызы – Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Баймурзина Мерей Маратқызы – Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серікбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Baimurzina Merrey Maratkyzy – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: may787585@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3167-9112>

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_8

XFTAP 53.15.23

ҰҢҒЫМАЛАРДЫ ГЕОТЕХНИКАЛЫҚ БҰРҒЫЛАУ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША ТАУ ЖЫНЫСТАРЫНЫҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД ПО ДАННЫМ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ СКВАЖИН

ASSESSMENT OF ROCK RESISTANCE BASED ON GEOTECHNICAL DRILLING DATA

З.К. Тунгушбаева ¹, Т.М. Кумыкова ^{2*}, Г.Т. Нуршайыкова ²,
А.М. Габитова ², З.Ж. Абдрашева ²

¹«ҚР Минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу Ұлттық орталығы» «ШҒЗТКМИТүстімет»,
Өскемен қ., Қазақстан

²Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Кумыкова Татьяна Михайловна, e-mail: ktm6010@mail.ru

Түйінді сөздер:

Геотехникалық бұрғылау,
геомеханика, массивтің
жарылуы, Тау
соққылары, өзек.

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада геотехникалық бұрғылау деректері негізінде Орел кен орнының тау жыныстарының тұрақтылығын бағалау нәтижелері қарастырылған. Негізгі зертханалық сынау әдістері, тау жыныстарының беріктігі мен серпімділік сипаттамалары, RQD коэффициенті мен ядро шығысы бойынша массив сапасы туралы мәліметтер келтірілген. UCS/UTS коэффициенті бойынша тау жыныстарының сынғыш сынуға бейімділігін талдауға және ықтимал соққы қаупін бағалауға ерекше назар аударылады. Алынған мәліметтер негізінде терең кептеліс пен бұзылған массив жағдайында бекіткішті жобалау бойынша практикалық ұсыныстар ұсынылған. Зерттеу нәтижелерін жерасты тау-кен қазбаларын модельдеу, жобалау және пайдалану кезінде пайдалануға болады.

Ключевые слова:

геотехническое бурение,
геомеханика,
трещиноватость массива,
горные удары, керн .

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены результаты оценки устойчивости горных пород Орловского месторождения на основе данных геотехнического бурения. Представлены методы лабораторных испытаний керн, характеристики прочности и упругости пород, данные о качестве массива по коэффициенту RQD и выходу керн. Особое внимание уделено анализу склонности пород к хрупкому разрушению по коэффициенту UCS/UTS и оценке потенциальной удароопасности. На основании полученных данных предложены практические рекомендации по проектированию крепи в условиях глубокой заложности и нарушенного массива. Результаты исследования могут быть использованы при моделировании, проектировании и эксплуатации подземных горных выработок.



Keywords:

geotechnical drilling,
geomechanics, rock
fracturing, rock bursts,
core samples.

ABSTRACT

The article discusses the results of assessing the stability of rocks at the Orlovskoye deposit based on geotechnical drilling data. It presents the methods of laboratory testing of rock cores, the characteristics of rock strength and elasticity, and the quality of the rock mass based on the RQD coefficient and the yield of rock cores. Special attention is given to the analysis of the rock's susceptibility to brittle failure based on the UCS/UTS coefficient and the assessment of potential rock bursts. Based on the obtained data, practical recommendations are provided for the design of rock supports in deep and disturbed rock formations. The research results can be used in the modeling, design, and operation of underground mining operations.

КІРІСПЕ

Орлов кен орнының терең деңгейжиектерін игеру тау жыныстары массивінің кернеулі күйінің жоғарылауына байланысты геомеханикалық тәуекелдердің артуымен қатар жүреді. Мұндай жағдайда жер асты тау қазбаларын жобалау мен пайдалану кезінде жыныстардың физикалық-механикалық қасиеттерін сенімді бағалау және олардың мінез-құлқын болжау ерекше маңызды. Массивтің геомеханикалық қасиеттері туралы ең сенімді ақпарат көздерінің бірі – геотехникалық (барлау-ізвестіру) ұңғымаларын бұрғылау кезінде алынған керн болып табылады.

Орлов кенішінің кеңдері мен жанас жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттері геологиялық барлау жұмыстары кезінде алынған сынамалар бойынша зерттеліп, кен орнын игеру барысында нақтыланды.

Жанас жыныстар мен кеннің беріктік коэффициенті 6–8-ден 10–15-ке дейін өзгереді. Кен мен жыныстар кей жерлерде қатты жапырылған, сондықтан олардың орнықтылығы өте төмен, нәтижесінде қазбаларды жүргізу кезінде жиі опырылулар байқалады. Мұндай жыныстарда барлау ұңғымаларын бұрғылау едәуір қиындық туғызады және геологиялық күрделіліктерге байланысты ұңғымалар жиі жобалық тереңдікке жете алмай қалады. Кеннің меншікті салмағы кен орны бойынша орташа есеппен 3,9 т/м³, ал жанас жыныстардікі – 2,7 т/м³ деп қабылданған.

Зертханалық жағдайда алынған керн материалын зерттеу негізінде жыныстардың беріктік, деформациялық және құрылымдық-текстуралық параметрлері анықталады, олар Қазақстан Республикасының қолданыстағы мемлекеттік стандарттарына сәйкес келуі тиіс. Негізгі анықталатын сипаттамаларға бір осьті сығу мен созылудағы беріктік шегі, Кулон–Мор критерийі бойынша беріктік параметрлері (ұштасу мен ішкі үйкеліс бұрышы), серпімділіктің динамикалық модульдері, беріктік, жұмсару және морт сынғыштық коэффициенттері, сондай-ақ табиғи және жасанды жарықшақтар бойынша ығысу беріктігінің параметрлері жатады.

Орлов кен орны ірі тектоникалық жарылым аймақтарына және ұсақ жарылу бұзылыстарының сериясына шоғырланған. Төрт негізгі тектоникалық жарылым ажыратылады: Березов, Орлов, Солтүстік-Батыс және Вознесен жарылымдары. Ұсақ жарылу бұзылыстары ендік және субендік бағыттарға ие. Кен денелері қаңқалы-блоктық құрылыммен сипатталады. Жарықшақтану дәрежесі бойынша жыныстар мен кендер негізінен орташа және күшті жарықшақтанғандарға жатады.

Орлов кенішінің массивіндегі табиғи кернеу өрісінің сипаты тазалау жұмыстарының әсер аймағынан тыс жүргізілген күрделі және дайындық қазбаларындағы тау қысымының тәжірибеде байқалған көріністері бойынша анықталған. Негізгі белгілердің жиынтығы бойынша – әртүрлі бағыттағы қазбалардағы тау қысымының көрініс қарқындылығы; қазба контурларының әр бөлігінің бұзылу

дәрежесі және геологиялық барлау ұңғымаларындағы керннің дискілену қарқындылығы – Орлов кен орны массивіндегі табиғи кернеулердің таралуы гидростатикалық күйге жақын деп анықталған, яғни барлық бағыттардағы горизонталды кернеулер шамамен тік кернеулерге тең және шамамен γH шамасын құрайды.

Қазіргі кезде тау-кен жұмыстарының тереңдігі артып, тау-геологиялық жағдайлардың күрделенуіне байланысты тау жыныстары массивтерінің орнықтылығын бағалаудың дәстүрлі тәсілдерін нақтылау және толықтыру қажет болып отыр. Бұл тек жыныстардың жеке физикалық-механикалық параметрлерін ғана емес, сонымен қатар олардың беріктік пен деформациялық қасиеттерінің, жарықшақтану деңгейінің, текстурасы мен массивтің бұзылу дәрежесінің үйлесіміне негізделген кешенді геомеханикалық сипаттамасын да ескерудің қажеттілігімен түсіндіріледі (Певзнер М.Е., Иофис М.А. және Попов В.Н (2008), Bieniawski Z. T. (1989)).

Орлов кеніші игерудің соңғы сатысында болғандықтан және кен массиві тазалау қазбаларымен тілімденгендіктен, жаңадан ашылып жатқан учаскелердегі геомеханикалық жағдайды бағалау қажет. Кеніштегі барлау жұмыстары жүргізілуде, сондықтан осы мүмкіндікті пайдаланып, барлау ұңғымаларынан алынған керн материалдары бойынша массивтің физикалық-механикалық қасиеттерін зерттеу керек.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ

Орлов кенішінің терең деңгейжиектеріндегі тау жыныстары массивінің орнықтылығын талдау үшін геотехникалық бұрғылау деректері мен керн материалдарының зертханалық зерттеу нәтижелері пайдаланылды. Бұрғылау жұмыстары 5 кен денесі, №43, №53, №39, №54, №69, РТ 2, №31, №49, №63, №62, №67 линзалары мен «Негізгі» шоғыр бойынша жүргізілуі көзделді. Бұрғылау нәтижесінде деңгейжиектердегі кен денелерінің контурларын және олардың сапалық сипаттамаларын нақтылау жоспарланды.

Бұрғылау жұмыстары «Левант» қоңдырғысымен, диаметрі 76 мм алмазды тәждермен (коронкалармен) жүргізілді. Жоба бойынша жалпы ұзындығы 7000 с.м болатын 91 көлбеу ұңғыманы бұрғылау көзделді, оның ішінде кен аймағы бойынша 1180 м. Ұңғымалардың орташа жобалық тереңдігі – 77 м, ал кен аймағы бойынша керн шығуы 85 % құрады.

Дайындау және сынақ жұмыстарын жүргізу Қазақстан Республикасының мемлекеттік стандарттарына және халықаралық әдістемелік ұсынымдарға сәйкес орындалды (ASTM D5607-16. *Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force* (2016).

Алынған керн материалы сынамадан өткізілді. Сынамаға кен аралықтарының да, сульфидті минералдануы бар жыныстардың да барлық материалы таңдап алынды. Кен құрамын дәл анықтау үшін сынаманың ұзындығы 1,5 м етіп қабылданды, ал кенаралық минералданған интервалдар 2 м ұзындықтағы сынамалармен алынды. Сынаманың бастапқы салмағы бұрғылау ұшының диаметріне байланысты 3,8–6,5 кг аралығында болды. Химиялық талдауларға арналған ілмек 0,1–0,15 кг көлемінде алынды.

Сынамаларды өңдеу кеніштің сынама дайындау цехында механикалық әдіспен – жақты және білікті ұсақтағыштарда жүргізілді, ал 0,074 мм дейін майдалау дискілі ұнтақтағышта орындалды.

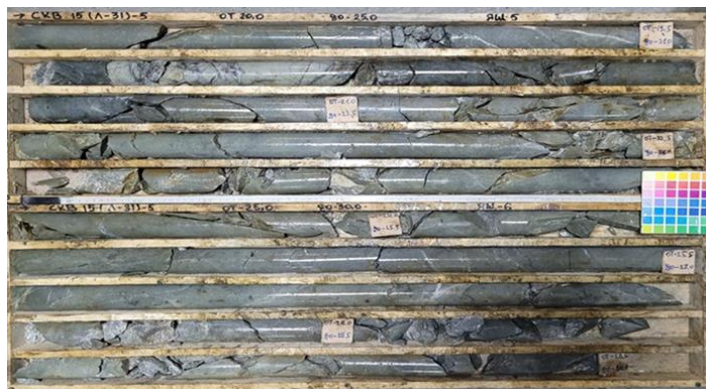
Барлау ұңғымаларынан алынған керн Discotom-65 тас кескіш станогында өңделді. Алынған материалдан параллель жазық ұштары бар цилиндрлік және пластиналы сынамалар дайындалды. Сынамалардың параметрлері МБОО 12248.2 – 2020, МБОО 10180-2012 және ҚР СТ 1213-2003 (ГОСТ 12248.2 – 2020. Бір осьті сығу әдісімен беріктік сипаттамаларын анықтау (2020)), ГОСТ 10180-2012. Бақылау үлгілері бойынша беріктікті анықтау әдістері (2012), ҚР СТ 1213-2003. Геомеханика. Жыныстардың беріктік сипаттамаларын анықтау әдістемесі (2003)) стандарттарына сәйкес бақылауға алынды.

Ұңғымалардан алынған керн RQD көрсеткішін анықтау үшін суретке түсірілді және геотехнологиялық процестер зертханасында (ВНИИцветмет институты) тау жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттерін анықтау мақсатында сынамалар алынды. Суреттерде керн сапасының әртүрлілігін көрсететін мысалдар келтірілген. 1-3-суреттерде ұңғымадан алынған керн фотосуреттері берілген. Фотосуреттерден ұңғыма бойымен геологиялық керн сапасының әртүрлілігі айқын байқалады.



1-сурет. Тектоникалық және ұсақталу аймақтарынан алынған керн

Ескерту – авторлар құрастырған



2-сурет. Орташа орнықтылықтағы жыныстардың керні

Ескерту – авторлар құрастырған



3-сурет. Тұрақты және өте тұрақты жыныстар аймақтарынан алынған керн

Ескерту – авторлар құрастырған

Тау жыныстарының физикалық-механикалық қасиеттерін анықтау әдістемесі келесідей жүргізілді. Жыныстардың бір осьті сығуға беріктігі (халықаралық UCS стандарты бойынша) – тау жынысы сынамасының (дұрыс геометриялық пішінді) бір осьті сығу сынағы кезінде бұзылған сәттегі ең үлкен жүктеме шамасын сынаманың көлденең қимасының ауданына бөлу арқылы анықталады (4, а-сурет).

$$\sigma_c = \frac{P}{S}$$

мұндағы: P – сынаманы бұзатын күш, МН;

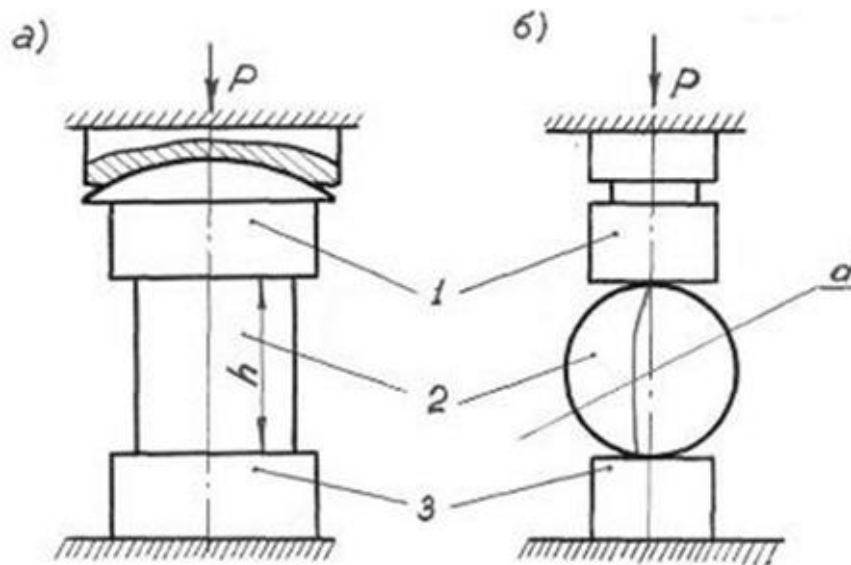
S – сынаманың көлденең қимасының ауданы, m^2 .

Жыныстардың бір осьті созылуға беріктігі (халықаралық стандарт бойынша – бразилиялық әдіс, UTS) цилиндр пішінді сынамаларды олардың жанама беті бойымен қирау жолымен анықталады (4, б-сурет).

$$\sigma_p = 0,64 \frac{P}{S}$$

мұндағы: P – бұзушы жүктеме, МН,

S – сынаманың диаметрі мен ұзындығының көбейтіндісіне тең сыну ауданы, m^2 .



4-сурет. Сынамаларды беріктікке сынау:

1 – жоғарғы плита; 2 – сыналатын цилиндрлік сынама;

3 – төменгі плита

Ескерту – авторлар құрастырған

Бір осьті сығуға (UCS) және созылуға (UTS) беріктік гидравликалық ПГМ-1000МГ4 прессінде, ең жоғары жүктемесі 100 тс болатын құрылғыда анықталды (5-сурет). Сығуға беріктік сынамаға көлденең қимасы бойынша әсер еткен ең үлкен бұзушы жүктеме негізінде стандартты формула бойынша есептелді. Созылуға беріктік бразилиялық әдіс бойынша (жанама беті бойымен жару тәсілімен) анықталды.

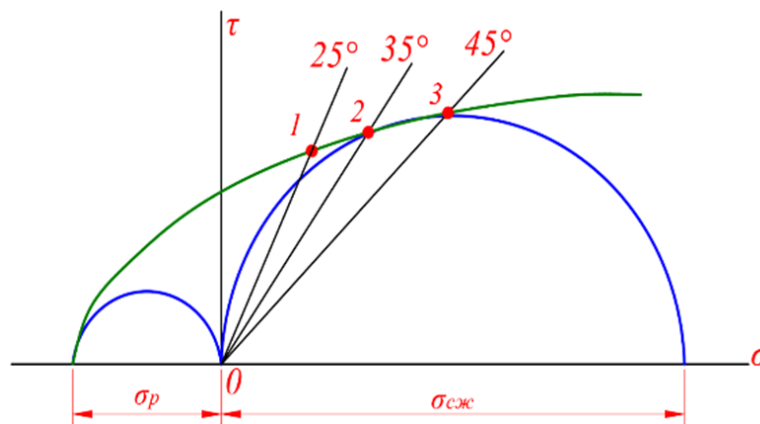
Қосымша түрде әртүрлі бұрыштардағы көлбеу матрицаларда ығысуға сынақтар МБОС 10060-2020 стандартына сәйкес жүргізілді. Бұл сынақтардың нәтижесінде Мур шеңберлері бойынша байланыс күшін және ішкі үйкеліс бұрышын анықтау үшін беріктік төлқұжаттары тұрғызылды.



5-сурет. ПГМ-1000ПГ4 гидравликалық пресі

Ескерту – авторлар құрастырған

Тау жынысының беріктік төлқұжаты — бұл нормаль σ және жанама τ кернеулер координаттарында тұрғызылған, Мурдың барлық максималды кернеу шеңберлерін жанап өтетін қисық (6-сурет).



6-сурет. Тау жынысының беріктік төлқұжатын тұрғызу

Ескерту – авторлар құрастырған

Тау жыныстары мен кен сынамаларының бір осьті сығу және созылу кезіндегі беріктік шегін анықтауға арналған сынақтар үлгілердің құрғақ және сумен қаныққан күйлерінде жүргізілді. 7 және 8-суреттерде сынаққа дейінгі және кейінгі үлгілердің фотосуреттері келтірілген (С.Г. Оника және А.К. Кузьмич Тау жыныстарының беріктігі құжатын құрудың кешенді әдісі (2017)).

Динамикалық серпімділік сипаттамаларын бағалау үшін «Пульсар-2.1» құрылғысы қолданылды. Осы құрылғының көмегімен бойлық және көлденең толқындардың таралу жылдамдықтары анықталды. Алынған мәліметтер негізінде серпімділік модулі, ығысу модулі, көлемдік сығылу модулі және Пуассон коэффициенті есептелді (Трофимов, В.Т. және Дубровский, Ю.В. (2007)).



сынаққа дейін



сынақтан кейін

7-сурет. № 18 сынама, 14-west-3 ұңғымасы, құрғақ күйдегі үлгі
(фельзиттәрізді кварцты альбит-порфирлер және олардың атқыламалы брекчиялары)
Ескерту – авторлар құрастырған



сынаққа дейін



сынақтан кейін

8-сурет. №18 сынама, 14-west-3 ұңғымасы, сумен қаныққан күйдегі үлгі
(фельзиттәрізді кварцты альбит-порфирлер және олардың атқыламалы брекчиялары)
Ескерту – авторлар құрастырған

Беріктік мәндері бойынша жыныстардың беріктік коэффициенттері (Протодьяконов шкаласы бойынша), морт сынғыштық және жұмсару коэффициенттері анықталды. Бұрғыланғыштық пен жарылғыштық қасиеттері ЕНВ-85 стандарты бойынша беріктік шкаласымен салыстырыла отырып жіктелді.

Жарықшақтардың табиғи және жасанды беттері бойынша ығысу беріктігінің параметрлері ISRM және ASTM D5607-16 әдістемелері бойынша Portable Shearbox SL900 құрылғысында бағаланды.

Бес деңгейлі жүктеме кезінде жанама және нормаль кернеулер өлшеніп, олардың негізінде байланыс (сцепление) және ішкі үйкеліс бұрышы анықталды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛДАУ

Геотехникалық ұңғымалардан алынған кен материалын зертханалық сынақтар нәтижесінде кен мен жанас жыныстарының негізгі түрлеріне тән беріктік және серпімділік сипаттамалары анықталды. Біросьті сығу кезіндегі беріктік шегі 54-тен 149 МПа-ға дейін, ал созылу кезіндегі беріктік шегі 3-тен 18 МПа-ға дейін өзгереді. Ең берік жыныстар қатарына тұтас полиметаллды және мыс-мырышты кендер жатады, олар жоғары байланыс мәндерімен (90 МПа-ға дейін), ішкі үйкеліс бұрышымен (37°-қа дейін) және серпімділік модулімен (14.8×10⁴ МПа-ға дейін) сипатталады (Hoek. E. & Brown E.T. (. 1997)).

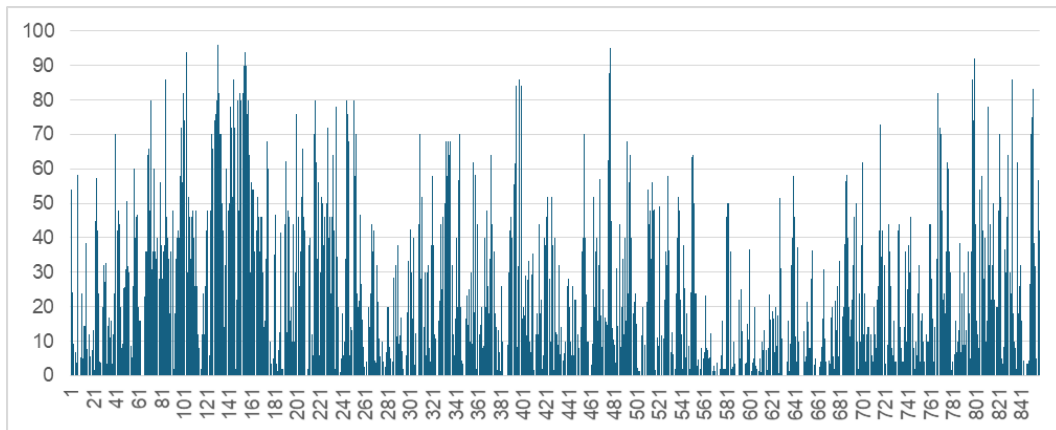
Жанас жыныстар – алевролиттер мен туфогенді түзілімдер — беріктік пен серпімділік модульдерінің төмен мәндерін көрсетеді, бұл олардың өндіру кезінде орнықтылығын

ғының аз екендігін білдіреді. Пуассон коэффициенті 0.15–0.26 аралығында, ал жыныстардың меншікті салмағы 2.71–4.68 т/м³ диапазонында өзгереді (*Bieniawski Z.T. (1989)*).

Жыныс массивінің сапасы қосымша түрде RQD көрсеткіші бойынша бағаланды, ол тереңдігі 30–200 м аралығындағы ұңғымалардан алынған керн негізінде анықталды. Ұңғымалар кернінің сапасы керн шығымы мен RQD мәні бойынша бағаланды (RQD — ұзындығы 10 см-ден асатын керн кесектерінің жалпы ұзындығының керннің жалпы ұзындығына пайыздық қатынасы).

Геотехникалық бұрғылау деректері бойынша орташа RQD мәні 27 % болды, бұл массивтің бұзылу деңгейінің жоғары екенін көрсетеді. 8-суретте ұңғымалар бойынша RQD өзгерісінің гистограммасы берілген (*Palmström A. (2005)*).

Керн сапасын талдау нәтижелері 2–10 м аралығында созылған, жанас жыныстардың сынықтарынан құралған күшті ұсақталу аймақтарының (RQD = 0) бар екенін көрсетті. Қысқа интервалдардағы жарықшақтар кейде тектоникалық балшықтары бар айтарлықтай қуатты ұсақталу аймақтарына ауысуы мүмкін. Жарылу бұзылыстарының айқындылығы әрқелкі: кейбір жағдайларда олар екі жағынан да жарықшақтармен шектелген ұсақталу аймақтары түрінде болса, басқа жағдайларда әлсіз бұзылған жыныстардан қарқынды сақталу аймақтарына біртіндеп ауысулар байқалады.



8-сурет. Барлық ұңғымалар бойынша керн сапасының RQD көрсеткіші гистограммасы

Ескерту – авторлар құрастырған

Интервалдар бойынша:

- 56 % сынамаларда RQD ≤ 30 %,
- тек 2 % үлгілерде — RQD > 80 %,
- RQD = 0 аймақтары 7 % жағдайда тіркелген, бұл ұсақталу және тектоникалық бұзылу аймақтарының бар екенін көрсетеді.

Керн шығымын талдау да геомеханикалық жағдайлардың күрделі екенін дәлелдейді: орташа мән 75 %, сонымен қатар:

- керннің 3 % үлесінде шығым 10 %-дан төмен;
- 85 % үлгілерде — 80 %-дан жоғары, бұл массивтің жергілікті орнықты бөліктерінің бар екенін көрсетеді.

Керн шығымы мен RQD көрсеткіші тектоникалық ұсақталу аймақтарында жарықшақтануы жоғары және әлсіз жыныстар аймағын анықтауға мүмкіндік берді. Бұл құбылыстар ұңғымалар стволдары бойындағы орнықты және орнықсыз жыныстардың алмасуын бейнелейтін фотоматериалдармен де расталады (*Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Shustov D.V., Fandeev A.E. & Ananin A.I. (2010)*).

Алынған деректер Орлов кен орны массивінің айтарлықтай геомеханикалық әртектілігін көрсетеді, бұл өз кезегінде тау-кен қазбаларының орнықтылығына және оларды бекіту тәсілдерін таңдауға елеулі әсер етеді.

Беріктік сипаттамаларын талдау нәтижесінде ең жоғары орнықтылық көрсеткіштеріне тұтас полиметаллды және мыс-мырышты кендер ие екені анықталды. Бұл кендердің бірсызғы сығу кезіндегі беріктік шегі 120 МПа-дан жоғары, байланыс күші 90 МПа-ға дейін, ал ішкі үйкеліс бұрышы 37°-қа дейін жетеді. Алайда бұл кендер жоғары морт сынғыштық коэффициентімен (18,6-ға дейін) сипатталады, бұл олардың кернеу әсерінен морт түрде қирауға бейімді екенін көрсетеді.

Canadian Rockburst Program әдісі және Гриффитс критерийі ($UCS/UTS > 10$) бойынша бағалау нәтижесінде зерттелген жыныстардың 90 %-ы төмен соққы қауіпімен сипатталады. Тек 9 % жыныстар (негізінен альбит-порфирлер) орташа қауіпті аймаққа жатады, ал 1 % (көбінесе тұтас барит-полиметаллды кендер) жоғары қауіпті аймаққа кіреді. Көпшілік жыныстардың соққы қауіптілігі төмен болғанымен, жоғары кернеу жағдайларында жергілікті динамикалық құбылыстардың (қабыршақтану, дискілену) пайда болу мүмкіндігін ескеру қажет (*Canadian Rockburst Research Program (1996.), Brady B.H. & Brown, E.T.(2006)*).

Массив орнықтылығын шектейтін негізгі фактор — жоғары жарықшақтану дәрежесі. Орташа RQD көрсеткіші 27 %, ал зерттелген көлемнің 64 % бөлігінде ол 30 %-дан төмен, бұл массивтің қатты бұзылған күйде екенін дәлелдейді. Ұзындығы 20 м-ге дейінгі тектоникалық балшықтармен бірге жүретін ұсақталу аймақтарының болуы құрылымдық бұзылыстардың айқын көрінісін көрсетеді. Мысалы, 15-Vав ЛШ-3 ұңғымасында ұсақталу аймағының ұзындығы жалпы 175 м ұңғыма ұзындығында 86 м-ге дейін жетеді.

Осылайша, массивтің орнықтылығы тек жыныстардың механикалық қасиеттерімен ғана емес, сонымен қатар олардың жарықшақтану сипаты мен тектоникалық бұзылу дәрежесімен де анықталады. Сондықтан жер асты қазбаларын жобалау кезінде кешенді тәсіл қолдану қажет — бұрғылау деректері негізінде массив сапасын жергілікті бағалау және RQD төмен әрі морт сынғыштық коэффициенті жоғары аймақтарда күшейтілген бекітпе жүйесін пайдалану ұсынылады (*Grimstad E. & Barton N. (1993), Ananin A.I., Tungushbayeva, Z.K., Nurshaiykova G.T. & Kalelova, G.Zh (2022)*).

ҚОРЫТЫНДЫ

Осы зерттеу шеңберінде Орлов кен орны жыныстар массивіне геотехникалық бұрғылау деректері негізінде кешенді геомеханикалық бағалау жүргізілді. Талдаудың негізін керндік материалға жасалған зертханалық сынақтар, керн шығымының визуалды бақылау нәтижелері және массив сапасының RQD көрсеткішін есептеу құрады. Сонымен қатар, жыныстардың морт сынғыштыққа бейімділігі (UCS/UTS коэффициенті арқылы) және соққы қауіпі әлеуеті бағаланды.

Жыныстардың сығылу беріктік шегі 54-тен 149 МПа-ға дейін, ал созылу беріктік шегі 3-тен 18 МПа-ға дейін ауытқитыны анықталды. Көпшілік жыныстар төмен морт сынғыштық коэффициентімен сипатталып, бұл олардың тау-кен қысымының динамикалық әсерлеріне шектеуді бейімділігін көрсетеді. Тек кейбір жыныс түрлері (альбит-порфирлер мен тұтас барит-полиметалл кендері) орташа және жоғары деңгейдегі морт сынғыштыққа бейім екені байқалды.

Массив орнықтылығына әсер ететін негізгі фактор — жарықшақтану дәрежесінің жоғарылығы. Керннің 60 %-дан астамы $RQD < 30$ % мәнімен сипатталады, бұл айқын тектоникалық ұсақталу аймақтарының бар екенін дәлелдейді. Мұндай учаскелерде күшейтілген бекіту шаралары мен қосымша инженерлік шешімдерді қолдану қажет.

Алынған нәтижелер жер асты қазбаларын жобалау кезінде массив орнықтылығын тек механикалық қасиеттер арқылы ғана емес, сонымен қатар оның құрылымдық-текстуралық ерекшеліктері негізінде де бағалау қажеттігін дәлелдеді. Бұл жұмыста қолданылған әдістеме күрделі геологиялық құрылым жағдайларында тиімділігін көрсетті және оны терең деңгейдегі жер асты кеніштерінде жобалау мен мониторинг жүргізу кезінде кеңінен қолдануға болады (*Brady B.H. & Brown, E.T.(2006)*).

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдде қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу 2024–2026 жылдарға арналған бағдарламалық-мақсатты қаржыландыру конкурсы аясында жүзеге асырылып жатқан BR24992854 «Шығыс Қазақстан облысының тау-кен металлургия саласының тұрақты дамуын қамтамасыз етуге бағытталған ғылыми негізделген бәсекеге қабілетті технологияларды әзірлеу және іске асыру» атты жоба есебінен орындалды.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Орлов кенішінің және ВНИИцветмет институтының басшылары мен мамандарына, сондай-ақ Жер туралы ғылымдар мектебінің филиалы жұмыс істейтін осы ұйымдарға керн үлгілері мен зерттеу жабдықтарын ұсынғаны үшін алғыс білдіреміз.

Сонымен қатар, авторлар әдістемелік қолдау мен пайдалы талқылаулар үшін әріптестеріне және мақаланың сапасын арттыруға елеулі үлес қосқан анонимді рецензенттерге ризашылығын білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Мақаланы дайындау барысында авторлар жасанды интеллект (ЖИ) немесе соған байланысты технологияларды, соның ішінде мәтін жазу, редакциялау, деректерді талдау немесе фактілерді тексеру құралдарын пайдаланған жоқ.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Ananin, A. I., Tungushbayeva, Z. K., Nurshaiykova, G. T., & Kalelova, G. Zh. (2022). Top-down cut-and-fill mining method at the Pervomayskiy deposit of the Donskoy mining and beneficiation plant. *News*, 2022(4), 16–27. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.197>
- ASTM D5607-16. (2016). Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force. ASTM International.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Brady, B. H., & Brown, E. T. (2006). *Rock mechanics for underground mining* (3rd ed.). Dordrecht: Springer.
- Canadian Rockburst Research Program. (1996). *Rockburst handbook for underground mines*. CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories.
- Grimstad, E., & Barton, N. (1993). Updating the Q-system for NMT. In *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete* (pp. xx–xx). Oslo, Norway.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.
- Kashnikov, Yu. A., Ashikhmin, S. G., Shustov, D. V., Fandeev, A. E., & Ananin, A. I. (2010). Geomechanical estimate of the rock mass state in the course of deep level mining in terms of the Tishinsk deposit. *Journal of Mining Science*, 46(2), 128–135. <https://doi.org/10.1007/s10913-010-0017-6>
- Palmström, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(4), 362–377.
- ГОСТ 10180–2012. Методы определения прочности по контрольным образцам. (2012). М.: Стандартинформ. // GOST 10180–2012. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nyum

- obraztsam [Methods for determining strength using control specimens]. Moscow: Standartinform. (In Russ.)
- ГОСТ 12248.2–2020. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия. (2020). М.: Стандартиформ. // GOST 12248.2–2020. Opredelenie kharakteristik prochnosti metodom odnoosnogo szhatiya [Determination of strength characteristics by the uniaxial compression method]. Moscow: Standartinform. (In Russ.)
- ГОСТ 12248.3–2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. (2020). М.: Стандартиформ. // GOST 12248.3–2020. Grunty. Opredelenie kharakteristik prochnosti i deformiruемости metodom trekhosnogo szhatiya [Soils. Determination of strength and deformation characteristics by the triaxial compression method]. Moscow: Standartinform. (In Russ.)
- Оника, С. Г., Кузьмич, А. К. (2017). Комплексный метод построения паспорта прочности горной породы. Горная механика и машиностроение, № 2, 19–25. // Onika, S. G., Kuzmich, A. K. (2017). Kompleksnyi metod postroeniya pasporta prochnosti gornoй porody [Integrated method for developing a strength passport of rock]. Gornaya mekhanika i mashinostroenie, No. 2, 19–25. (In Russ.)
- Певзнер, М.Е., Иофис, М.А., Попов, В.Н. (2008). Геомеханика. – М.: Горная книга. 438 с. ISBN 978-5-7418-0528-2. // Pevzner, M.E., Iofis, M.A., Popov, V.N. (2008). Geomekhanika [Geomechanics]. Moscow: Gornaya Kniga Publishing House. 438 p. ISBN 978-5-7418-0528-2. (In Russ.)
- СТ РК 1213–2003. Геомеханика. Методика определения прочностных характеристик пород. (2003). Астана: Госстандарт РК. // ST RK 1213–2003. Geomekhanika. Metodika opredeleniya prochnostnykh kharakteristik porod [Geomechanics. Method for determining strength characteristics of rocks]. Astana: State Standard of the Republic of Kazakhstan. (In Russ.)
- Трофимов, В. Т., Дубровский, Ю. В. (2007). Инженерная геология. М.: Изд-во МГУ. 528 с. // Trofimov, V. T., Dubrovsky, Yu. V. (2007). Inzhenernaya geologiya [Engineering geology]. Moscow: Moscow State University Publishing House. 528 p. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Тунгушбаева Зухра Кыдыргазиновна – т.ғ.к., доцент, «ҚР Минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу Ұлттық орталығы» «ШҒЗТКМИтүстімет», РМК филиалының ғылыми хатшысы, Өскемен қ., Қазақстан

Тунгушбаева Зухра Кыдыргазиновна – к.т.н., доцент, ученый секретарь филиала РГП «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья РК» ВНИИцветмет, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Tungushbayeva Zuxra Kydyrgazinovna – Cand. of tech. sc., docent, Scientific Secretary of filial agency of the National Center for Complex Processing of Mineral Raw Materials, VNIItsvetmet, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: zuhratungushbaeva@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1366-1196>



Кумыкова Татьяна Михайловна – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Кумыкова Татьяна Михайловна – кандидат технических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Kumyukova Tatyana – Candidate of Technical Sciences, Professor, D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: , ktm6010@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0977-0047>,



Нуршайыкова Гульнур Тлеубергенқызы – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Нуршайыкова Гульнур Тлеубергенқызы – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Nurshaiyikova Gulnur Tleubergenkyzy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: GNurshaiyikova@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9915-8315>



Габитова Аяужан Маратовна – техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Габитова Аяужан Маратовна – магистр технических наук, старший преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Gabitova Ayauzhan Maratovna – Master's degree, senior lecturer at D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

e-mail: ayauzhan.gabitova@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7279-0433>



Абдрашева Замира Жомартовна – техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Абдрашева Замира Жомартовна – магистр технических наук, старший преподаватель, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Abdrasheva Zamira Zhomartovna – Master's degree, senior lecturer at D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

e-mail: zamira91189@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8916-1845>






https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_9

SRSTI 89.57.35

USE OF INTEGRAL VEGETATION INDICES IN THE ANALYSIS OF VEGETATION COVER CONDITION AND ITS CHANGE TRENDS BASED ON SATELLITE DATA

СПУТНИКТИК ДЕРЕКТЕР НЕГІЗІНДЕ ӨСІМДІК ЖАМЫЛҒЫСЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫН ЖӘНЕ ОНЫҢ ӨЗГЕРУ ҮРДІСТЕРІН ТАЛДАУ КЕЗІНДЕ ИНТЕГРАЛДЫ ВЕГЕТАЦИЯЛЫҚ ИНДЕКСТЕРДІ ПАЙДАЛАНУ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ПРИ АНАЛИЗЕ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И ТЕНДЕНЦИЙ ЕГО ИЗМЕНЕНИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

I.S. Vitkovskaya ¹, M.Zh. Batyrbayeva ^{1*}, Zh.A. Asylbekov ¹,
Zh.K. Idrisheva ², D.K. Mombekova ¹

¹JSC «National Center of Space Research and Technologies», Almaty, Kazakhstan

²D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

*Corresponding author: Batyrbayeva Madina Zhanayevna, e-mail: m.batyrbayeva@spaceres.kz

keywords:

Remote sensing, vegetation indices, Integral Vegetation Condition Index (IVCI), drought analysis and monitoring, hydrothermal coefficient (HTC), grain yield.

ABSTRACT

Drought phenomena are among the most significant factors determining the productivity of agroecosystems and the resilience of agricultural production under climate change. For Kazakhstan, the majority of whose territory falls within the zone of risky agriculture, drought monitoring, vegetation cover assessment, and the identification of change trends are of particular importance. The increasing frequency and intensity of dry periods lead to substantial losses in cereal crop yields, directly affecting the country's food security.

Traditional methods for assessing agroclimatic conditions are based on ground-based observations of air temperature and precipitation. Despite their informativeness, these data are limited by the spatial discreteness of the meteorological station network and do not fully reflect the spatial diversity of drought conditions. In this regard, remote sensing (RS) methods have gained particular importance, providing systematic and spatially continuous monitoring of vegetation conditions.

Among the tools of remote sensing, vegetation indices have become widely used for assessing vegetation dynamics, detecting stress conditions, and identifying interannual variations.

The aim of this study is to assess the dynamics of vegetation and drought conditions in the northern regions of Kazakhstan (Akmola, Kostanay, and North Kazakhstan regions) for the period 2000–2023 using vegetation indices, including the developed IVCI index, as well as to verify it against ground-based agroclimatic indicators and cereal crop yield statistics.



Түйінді сөздер:

Спутниктік қашықтықтан зондтау, вегетациялық индекстер, өсімдік жағдайының интегралды индексі (IVCI), қуаңшылық жағдайларын талдау және мониторинг, гидротермиялық коэффициент (НТС), дәнді дақылдардың өнімділігі.

ТҮЙІНДЕМЕ

Климаттың аридтенуінің күшеюі мен қуаңшылық құбылыстарының жиілеуі жағдайында өсімдік жамылғысының жай-күйін талдау және оның өзгеру үрдістерін айқындау үшін интегралды вегетациялық индекстерді әзірлеу мен қолданудың маңызы арта түсуде. Зерттеуде түрлі вегетациялық индекстер әдісі пайдаланылды. Ерекше назар авторлар әзірлеген және алғаш рет Қазақстан аумағында қолданылған өсімдік жағдайының интегралды индексіне (IVCI) аударылды. Зерттеу MODIS спутниктік деректеріне (MOD09Q1, 2000-2023 жж.) негізделген және олар жерүсті агроклиматтық көрсеткіштерімен (Селяниновтың гидротермиялық коэффициенті) мен дәнді дақылдардың өнімділік статистикасымен салыстырылды. Талдау нәтижесінде Қостанай облысындағы метеостанциялардың 75 %-дан астамында IVCI мен НТС арасында күшті және өте күшті корреляция байқалды, ал Солтүстік Қазақстан және Ақмола облыстарында орташа және күшті байланыстар басым болды. Ақмола облысы бойынша Манн-Кендалл сынағы мен Сен еңісін бағалау нәтижелері 2000–2023 жылдар аралығында IVCI өзгерісінің статистикалық тұрғыдан мәнді теріс үрдісін растады, ал Қостанай және Солтүстік Қазақстан облыстары бойынша сызықтық трендтер өсімдіктердің жағдайының жалпы нашарлауын көрсетті. IVCI < 0.3 шекті мәні экстремалды қуаңшылық жылдарын (2008, 2010, 2012, 2023) және олардың кеңістіктік таралу аймақтарын айқындауға мүмкіндік берді. Осылайша, IVCI гидротермиялық коэффициенттің спутниктік баламасы ретінде қарастырылып, Қазақстандағы қуаңшылық жағдайларын мониторингтеудің жаңа құралы болып табылады.

Ключевые слова:

Дистанционное зондирование, вегетационные индексы, интегральный индекс условий вегетации (IVCI), анализ и мониторинг засушливых условий, гидротермический коэффициент (ГТК), урожайность зерновых культур.

АННОТАЦИЯ

В условиях усиливающейся аридизации климата и роста частоты засушливых явлений особое значение приобретает разработка и применение интегральных индексов вегетации для анализа состояния растительного покрова и выявления тенденций его изменений. В работе использован метод различных вегетационных индексов. Особое внимание уделено индексу условий вегетации IVCI, разработанному авторами и впервые примененному для территории Казахстана. Исследование выполнено на основе спутниковых данных MODIS (MOD09Q1, 2000–2023 гг.), сопоставленных с наземными агроклиматическими показателями (гидротермическим коэффициентом Селянинова) и статистикой урожайности зерновых культур. Анализ показал, что в Костанайской области для более 75 % метеостанций выявлена сильная и очень сильная корреляция между IVCI и НТС, в Северо-Казахстанской и Акмолинской областях преобладают умеренные и сильные зависимости. Применение теста Манна-Кендалла и оценки наклона Сенна для Акмолинской области подтвердили статистически значимую отрицательную тенденцию в изменении IVCI за период 2000–2023 гг., а линейные тренды для Костанайской и Северо-Казахстанской областей указывают на общее ухудшение условий вегетации. Пороговое значение IVCI < 0.3 позволило выделить годы экстремальных засух (2008, 2010, 2012, 2023) и пространственные зоны их проявления. Таким образом, индекс IVCI может рассматриваться как спутниковый аналог гидротермического коэффициента и представляет собой новый инструмент мониторинга засушливых условий для Казахстана.

INTRODUCTION

Drought phenomena are among the most significant factors determining the productivity of agroecosystems and the resilience of agricultural production under climate change. For Kazakhstan, the majority of whose territory falls within the zone of risky agriculture, drought monitoring, vegetation cover assessment, and the identification of change trends are of particular importance. The increasing frequency and intensity of dry periods lead to substantial losses in cereal crop yields, directly affecting the country's food security.

Traditional methods for assessing agroclimatic conditions are based on ground-based observations of air temperature and precipitation. Despite their informativeness, these data are limited by the spatial discreteness of the meteorological station network and do not fully reflect the spatial diversity of drought conditions. In this regard, remote sensing (RS) methods have gained particular importance, providing systematic and spatially continuous monitoring of vegetation conditions. Among the tools of remote sensing, vegetation indices have become widely used for assessing vegetation dynamics, detecting stress conditions, and identifying interannual variations.

The aim of this study is to assess the dynamics of vegetation and drought conditions in the northern regions of Kazakhstan (Akmola, Kostanay, and North Kazakhstan regions) for the period 2000–2023 using vegetation indices, including the developed IVCI index, as well as to verify it against ground-based agroclimatic indicators and cereal crop yield statistics.

MATERIALS AND METHODS

Kazakhstan is located in the center of the Eurasian continent, spanning latitudes from 40° to 55° N and longitudes from 45° to 87° E. The country includes several natural zones — from forest-steppe to desert — and is characterized by a strongly continental climate. In the northern regions, a moderately continental climate prevails, with sharp temperature fluctuations and insufficient moisture.

A significant portion of Kazakhstan's territory belongs to arid and semi-arid climate zones, where droughts of varying duration and intensity occur almost every year. These events lead to a noticeable decline in grain yields, pasture degradation, and substantial economic losses in the agricultural sector. More than 70 percent of the country's croplands are located in the rain-fed farming zone in the north, where agricultural productivity strongly depends on precipitation and is highly vulnerable to climate risks. (Baisholanov S.S. et al. 2018). The principal grain-producing regions are situated in the northern part of the country. The sown areas account for 24 percent of the total area of Kostanay Region, 34 percent of Akmola Region, and 42 percent of North Kazakhstan Region [VIII National Communication, 2022], Figure 1.

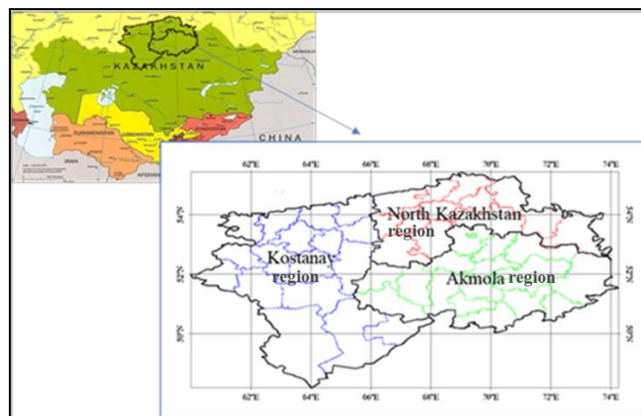


Figure 1. Study area

Note – compiled by the authors

Satellite Data

The study used MODIS Terra surface reflectance data (product MOD09Q1), obtained from Band 1 (red range, 0.620–0.670 μm) and Band 2 (near-infrared range, 0.841–0.876 μm) with a spatial resolution of 250 m. The MODIS composite algorithm produces 8-day images in which the highest-quality observation for each pixel is selected, taking into account viewing angle, cloud cover, shadows, and aerosol load. This minimizes atmospheric and optical distortions and ensures consistency of the time series. To cover the entire territory of Kazakhstan, six tiles (21v03–23v04) were used and merged into a single mosaic. The analysis covered the growing seasons (April–September) from 2000 to 2023, and data processing and index calculations were carried out in the ENVI software environment.

Ground Data

Verification of the satellite-based vegetation indices was carried out using ground-based agro-climatic and statistical data. The Selyaninov Hydrothermal Coefficient (HTC) was calculated for each year from 2000 to 2023 using temperature and precipitation records from meteorological stations of the Kazhydromet network (meteo.kz). In addition, district-level grain yield statistics for the same period were obtained from official sources of the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan (stat.gov.kz).

Research methods

To identify the characteristics of each current season, ground measurements and vegetation indices are used, Table 1, 2.

Table 1. Satellite indices used in space monitoring of vegetation cover in Kazakhstan

Name	Formula and ranges	Purpose	Comment
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse J. W., 1973)	$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$ <p>[-1; 1]</p>	NDVI quantifies differences in reflectance under favorable and stressful vegetation conditions and is used to monitor seasonal changes in plant health	NIR is the reflectance in the near-infrared band and RED is the reflectance in the red band
Vegetation conditions index VCI (Kogan F.N., 1997)	$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$ <p>[0; 1]</p>	Analysis of the impact of weather conditions on vegetation during the growing season; characteristics of weather and humidity conditions	NDVI _i , NDVI _{min} and NDVI _{max} correspond respectively to the instantaneous NDVI and the pixel-wise minimum and maximum NDVI values observed throughout the entire multi-year time series
Integrated Vegetation Index IVI (Spivak, L. et al. 2009)	$IVI = \sum NDVI(t)$ <p>t- number of days in the season</p>	Analysis of inter-seasonal changes in vegetation conditions	IVI represents the accumulated NDVI over a specified period of time
Integral index of vegetation conditions IVCI (Spivak L., 2009)	$IVCI = \frac{IVI_i - IVI_{min}}{IVI_{max} - IVI_{min}}$ <p>[0; 1]</p>	Analysis of inter-seasonal changes in the impact of weather conditions on vegetation	IVI _i , IVI _{min} , and IVI _{max} – current, minimum and maximum values for each pixel on a given date across the entire multi-year observation period

Note – compiled by the authors

Table 2. The HTC calculated from ground-based temperature and precipitation measurements

Name	Formula and ranges	Purpose	Comment
Selyninov Hydrothermal Coefficient (HTC) (Handbook of Drought - WMO, 2016)	$HTC = R \cdot 10 / \Sigma t$	Characterize the moisture supply level R - the total precipitation (in millimeters) during the period with temperatures above +10 °C; Σt - the sum of air temperatures (°C) over the same period	Standard (detailed) classification: $HTC \leq 0.3$ – very severe drought (extreme drought) $0.3 < HTC \leq 0.5$ – severe drought $0.5 < HTC \leq 0.75$ – moderate drought $0.75 < HTC \leq 1.0$ – mild drought / almost normal $1.0 < HTC \leq 1.5$ – sufficient humidity $HTC > 1.5$ – very humid Simplified (often used) scale: $HTC < 0.5$ – drought $0.5-1.0$ – normal/satisfactory conditions $HTC > 1.0$ – wet
<i>Note – compiled by the authors</i>			

In this study, the analysis of vegetation condition and changes was carried out using vegetation indices calculated from MODIS satellite data. These indices represent mathematical combinations of spectral reflectance characteristics in the red and near-infrared bands, allowing for a quantitative assessment of vegetation status in each pixel of the satellite image (Kogan, F.,N. 1990, Kogan, F.,N. 1994, Kronberg, 1988). Both classical indices (NDVI, VCI) and integral indices (IVI, IVCI) were applied, with the latter developed by the authors and used for the first time for the territory of Kazakhstan. As shown in (Vitkovskaya et al., 2024) the use of integral indices made it possible to assess the interannual dynamics and trends of vegetation seasons, as well as to identify periods and regions with extreme drought conditions. An important advantage of these indices is their simplicity of calculation.

When applied in Kazakhstan for the first time, this approach enables detection of the spatio-temporal patterns of drought and the ranking of growing seasons by the degree to which weather conditions affected them (Vitkovskaya et al., 2024).

As (Handbook of Drought - WMO, 2016) notes that the VCI is a primary tool for monitoring drought conditions; it enables assessment of how drought affects vegetation and the determination of the onset, duration, and severity of droughts. VCI is one of the central remote sensing tools for detecting and monitoring drought. The use of VCI in remote sensing helps to understand drought dynamics and to develop mitigation and adaptation measures; the methodology has been tested for Kazakhstan (Gitelson A., et al., 1995; Kogan F., et al., 2003). In practice, a $VCI < 0.3$ (Kogan, 1997) is generally interpreted as indicating drought, and digital VCI maps enable visualization of areas of vegetation stress. Both indices are recognized as classical remote sensing tools and have been widely validated.

These integral indices are used to assess long-term vegetation dynamics: they identify trends of change, rank vegetation seasons by climatic conditions in a multi-year series, and are applicable for long-term forecasting. The Integral Vegetation Conditions Index (IVCI), developed by the authors, is intended to analyze interseasonal variations in the influence of weather on vegetation.

The IVCI index, as an interseasonal analogue of the VCI, is used to analyze drought dynamics and to assess their spatial extent and intensity based on satellite data. It enables ranking vegetation seasons by climatic conditions within a multi-year series and comparing the intensity and duration of droughts across different seasons. Digital IVCI matrices allow visualization of

zones with degraded vegetation conditions and quantitative estimation of their area, which is important for ecosystem monitoring.

Digital IVCI matrices offer a powerful way to map the spatial distribution of areas with degraded vegetation and to quantify the extent of those zones—information that is crucial for ecosystem monitoring and assessment. A threshold value of IVCI < 0.3, analogous to the Vegetation Condition Index (VCI) cutoff, is used to flag regions that experienced climatic stress during the growing season. Long-term index time series are essential for detecting changes in land-surface conditions and for separating climatic trends from short-term weather variability. It should be noted that studies using integral indices, which summarize each vegetation season within a long-term dataset, remain very rare.

Long-term indexes time series are a key requirement for analyzing changes in land surface conditions and for distinguishing the influence of climatic trends from short-term weather fluctuations. At the same time, studies using integral indices that characterize the entire growing season within a long-term observational series are extremely rare.

The process of aggregating data from diverse observational systems is characterized by its own set of unique attributes and challenges.

1. Ground-based meteorological measurements, acquired from a sparse and geographically uneven network of observation stations, constitute point-based data collected at discrete intervals throughout the day, including nocturnal observations. To extrapolate values between these discrete nodes, interpolation techniques are employed; however, such procedures inevitably entail a degree of data loss and concomitant reduction in precision. In characterizing the impact of atmospheric conditions on vegetation dynamics, particularly in the assessment of drought severity through ground-based observations, a variety of indices are utilized as input data. These indices include, for example, the Selyninov Hydrothermal Coefficient (HTC), the Standardized Precipitation Index (SPI), and the Palmer Drought Severity Index (PDSI) (Handbook of Drought 2016), all of which are derived from time series of mean monthly or daily air temperature and monthly precipitation totals.

2. Satellite data provides systematically updated and spatially continuous information, making them indispensable for monitoring and analyzing vegetation cover. In addition, the availability of long-term archived data sets allows for retrospective research. Access to low-resolution data is provided free of charge, which expands the possibilities of their use for scientific and applied purposes.

Remote sensing methods based on the analysis of reflectivity values in the red and near-infrared spectral ranges, as well as in the thermal range, make it possible to calculate vegetation indices. These satellite-based indices are integral indicators of vegetation conditions that correlate with temperature and humidity conditions during the growing season.

Drought indices calculated on the basis of contact measurements of temperature and precipitation at meteorological stations and vegetation indices obtained from satellites are two complementary tools for analyzing the state and dynamics of vegetation cover. The possibility of establishing correlations between these indices is due to common environmental factors that affect the state of vegetation.

To compare point-based ground data from meteorological stations and spatially distributed satellite data, a methodology was developed that includes the use of a digital matrix of the vegetation index (IVCI). This technique, described in the work (Spivak F., et al, 2016), allows for a detailed analysis and integration of data obtained by various methods, which helps to increase the accuracy and reliability of research results.

To validate the proposed integral indices IVI and IVCI, they must be compared with ground observations. The comparative analysis was conducted using correlation analysis and the Chaddock scale (Orlov, 2004). This methodological approach facilitated the quantitative

evaluation of the strength and nature of the relationship between the examined values. The results are presented in Table 3, which underscores the robustness of the correlation findings and their relevance to the research objectives.

Table 3. Strength of Relationship and Correlation Coefficient Value

Correlation Coefficient	Strength of Relationship
0,91 - 1	Very Strong
0.81 - 0.9	Fairly Strong
0.65 – 0.8	Strong
0.45 – 0.64	Moderate
0,25 – 0.44	Weak
< 0.25	Very Weak
«+» Direct Relationship	«-» Inverse Relationship

Note – compiled by the authors

RESULTS AND DISCUSSION

Establishment of Correlations Between Terrestrial and Satellite-Derived Drought Indices

Establishing correlations between ground-based and satellite drought indices is important: comparing satellite-derived vegetation indices with parameters calculated from ground-based data is necessary to confirm their adequacy in describing processes within the vegetation cover.

Satellite indices were validated by comparison with ground data: Selyninov HTC time series (a measure of moisture supply) (meteo.kz) and district cereal yield statistics.

The time ranges for calculating HTC and IVCI were chosen to be identical – May to August of the vegetation season. For a detailed joint analysis of the IVCI and HTC indices, 38 meteorological stations located in the northern regions of Kazakhstan were selected. The results of correlation coefficient calculations between the long-term Integral Vegetation Condition Index (IVCI) and HTC for each meteorological station in the northern regions of Kazakhstan over the observation period 2000–2023 are presented in Table 4.

Table 4. Link between integral vegetation status and hydrothermal drought index

Kostanay Region		Akmola Region		North Kazakhstan Region	
Station	Correlation coefficient	Station	Correlation coefficient	Station	Correlation coefficient
Amangeldy	0.09	Akkol	0.30	Blagoveshchenka	0.73
Bestau	0.45	Arshaly	0.43	Bulaevo	0.70
Dievskaya	0.75	Astana	0.57	Chkalovo	0.51
Karamendy	0.71	Atbasar	0.69	Kishkenekol	0.60
Ekidin	0.58	Balkashino	0.48	Petropavlovsk	0.40
Zheleznodorozhny	0.82	Ereymtau	0.78	Sergeevka	0.59
Zhitikara	0.70	Yesil	0.66	Tayynsha	0.64
Karasu	0.85	Zhaksy	0.85	Timiryazev	0.54
Karabalyk	0.67	Zhaltir	0.65	Vozvyshenka	0.66
Kostanay	0.78	Kokshetau	0.65	Yavlenka	0.51
Kushmurun	0.82	Stepnogorsk	0.70		
Mikhailovka	0.72	Shchuchinsk	0.75		
Presnogoryevka	0.80				
Rudny	0.71				
Tobol	0.73				
Sarykol	0.80				

Note – compiled by the authors

Kostanay Region recorded the highest correlations, with over 75% of stations classified as having strong or very strong relationships. North Kazakhstan showed mainly moderate correlations (~50% of stations) and a substantial share of strong correlations (~40%). Akmola was dominated by moderate correlations (~60%), with strong correlations at roughly 20% of stations.

As for example, a comparison of the vegetation index IVCI with the HTC for several selected districts (Zhaksyn district Akmola region and Auelikolsky district Kostanay region) is presented in Figure 2.

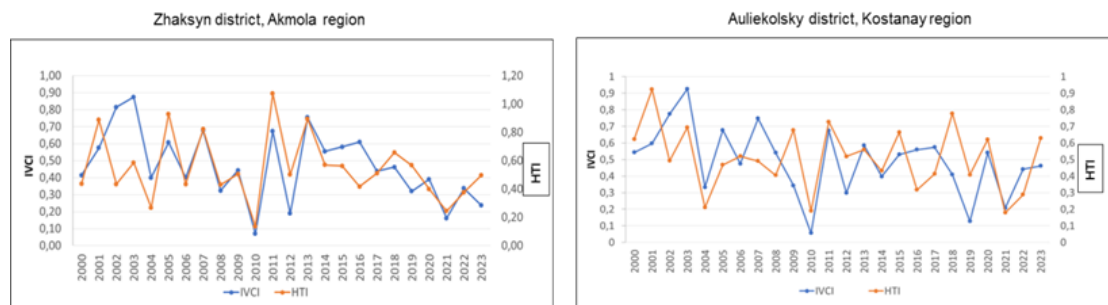


Figure 2. Changes in the HTC coefficient and the IVCI vegetation index (2000-2023)

Note – compiled by the authors

Consequently, the IVCI may be adopted as a remote-sensing proxy for the HTC, facilitating quantitative evaluation of weather-driven vegetation changes when terrestrial data are lacking. Correlation coefficients between the indices and cereal crop yields for multiple districts in northern Kazakhstan (2000–2023) are presented in Table 5.

Table 5. Statistical Association between Integral Vegetation Condition Index and Cereal Yield Averages in Northern Kazakhstan

Region	District	Correlation Coefficient Between IVCI and Cereal Crop Yields	Strength of Relationship According to the Chaddock Scale
Kostanay Region	Zhitikarinsky	0.68	Noticeable
	B. Mailin	0.65	Noticeable
	Kostanay	0.39	Moderate
	Auelikolsky	0.63	Noticeable
	Denisovsky	0.72	High
	Kamystinsky	0.77	High
Akmola Region	Zhaksynsky	0.44	Moderate
	Esilsky	0.72	High
	Atbasarsky	0.54	Noticeable
	Bulandinsky	0.45	Moderate
	Yegindykol	0.54	Noticeable
	Birzhan Sal	0.79	High

Note – compiled by the authors

Analysis of correlation relationships between crop yield data for 12 districts across two regions showed the following: 33% of the analyzed data demonstrated a high degree of correlation, 42% a noticeable degree, and 25% a moderate degree (according to the Chaddock scale). The obtained correlation values were lower than those between HTC and IVCI, which may

be explained by inaccuracies in statistical yield data. A comparison of IVCI and cereal crop yields for two selected districts (Auliekolsky district Kostanay region and Karabalyk district Akmola region) is presented in Figure 3.

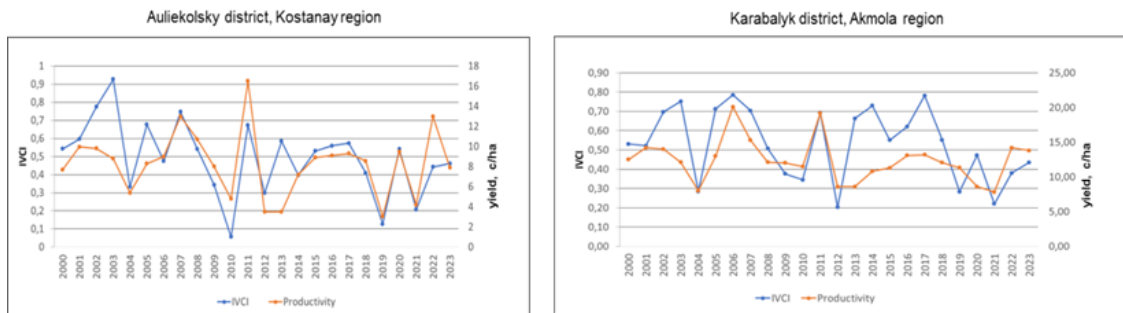


Figure 3. IVCI and average grain yield: temporal comparison (2000–2023)

Note – compiled by the authors

Peculiarities of the Integral Index of Vegetation Conditions IVCI

Index IVCI effectively measures temporal changes in vegetation, allowing trend analysis and identification of extreme seasons driven by weather. Developed as a multi-season VCI analogue (Kogan, 1990; Spivak et al., 2008), it detects and rates drought extent/intensity from satellite data. The IVCI allows for the ranking of growing seasons based on weather conditions in a multi-year data series. An IVCI < 0.3 flags areas under season-long stress. Mapped IVCI values show drought-affected zones in northern Kazakhstan (Figure 4).

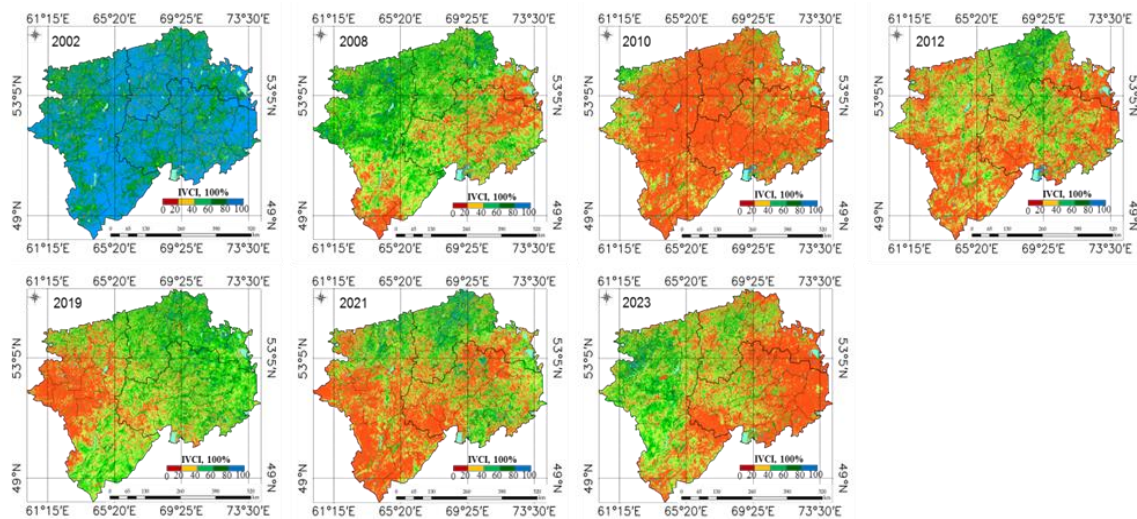


Figure 4. Temporal composite maps of IVCI for chosen growing seasons in northern Kazakhstan

Note – compiled by the authors

Digital IVCI rasters facilitate the spatial delineation and geolocation of areas exhibiting reduced vegetation condition and enable area calculation. Multi-annual IVCI distributions are used to evaluate entire growing seasons and to flag regions with IVCI < 0.3 as season-long vegetation stress.

According to remote sensing data analysis, the years 2002 and 2016 were characterized by the most humid growing seasons across Kazakhstan as a whole. The regions exhibiting the lowest

Integrated Vegetation Condition Index (IVCI) values included: in 2006, the southern part of the Kostanay region; in 2008, approximately two-thirds of the studied area, excluding the northern portions of the Kostanay and North Kazakhstan regions; in 2010, all northern regions of Kazakhstan experienced a severe drought, which was one of the most intensive drought events in the period from 2000 to 2023; and in 2012, the most severe drought in the period from 2000 to 2023 affected all northern (agricultural) and central (pastoral) regions of the republic, leading to significant ecological and economic consequences.

In the context of time series analysis, it is crucial to identify patterns of long-term changes. The underlying trend represents the general pattern of a phenomenon over an extended period, irrespective of random fluctuations. Fluctuations, on the other hand, refer to deviations from this general trend during specific time periods.

The multi-year IVCI values for the growing seasons spanning May to August in the northern regions of Kazakhstan for the period from 2001 to 2023 are presented in Figure 5.

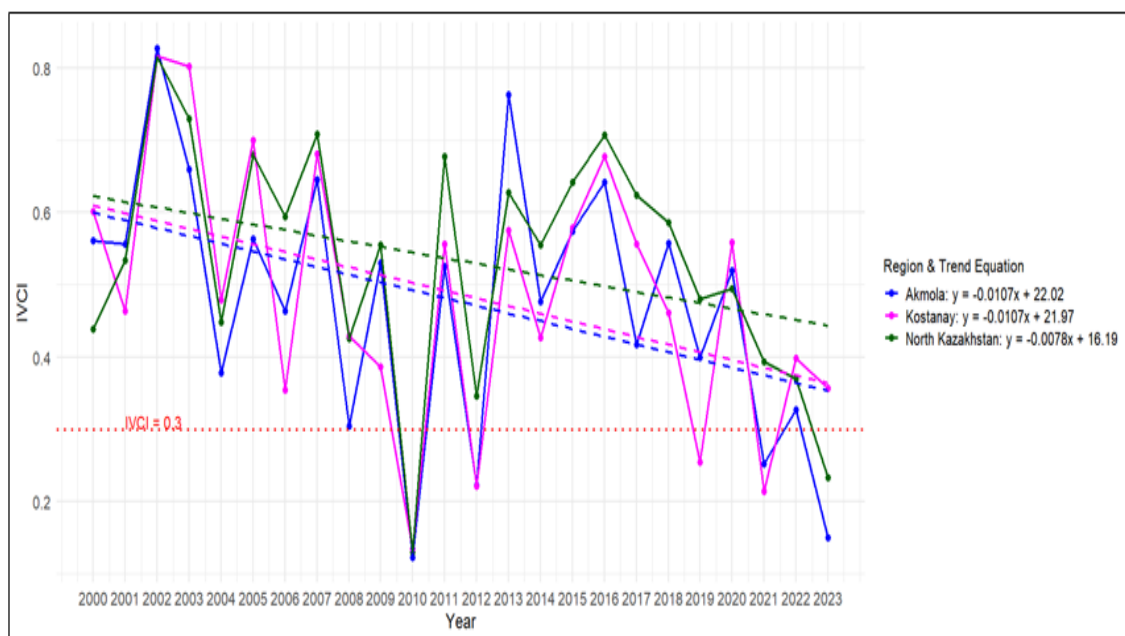


Figure 5. Long-term IVCI values for the territory of the northern regions of Kazakhstan, 2000-2023

Note – compiled by the authors

The graph shows an IVCI value of less than 0.3, which corresponds to arid conditions. Based on this, according to remote sensing data, the following vegetation seasons can be classified as dry to varying degrees: 2008, 2010, 2012, 2023 in Akmola region, 2010, 2012, 2019, 2021 in Kostanay region, 2010, 2023 in North Kazakhstan region.

There is a pronounced negative trends towards a decrease in IVCI values. IVCI linear trend equations (2000–2023): $y = -0.0107 \cdot x + 22.0174$ (Akmola Region); $y = -0.0107 \cdot x + 21.9680$ (Kostanay Region); $y = -0.0078 \cdot x + 16.1885$ (North Kazakhstan Region).

The coefficient k in the linear trend equation ($y = k \cdot x + b$) of the IVCI index distribution characterizes the rate of change in the state of vegetation cover. The highest values of the coefficients for negative IVCI index trends were observed in the Kostanay and Akmola regions. A similar approach is described in (Al Nadabi, et al. 2024).

Analysis of the IVCI Trend in the Akmola Region Using the Mann–Kendall Test and Sen’s Slope (2000–2023).

To assess the direction and stability of changes in the Integral Vegetation Condition Index (IVCI) over the period 2000–2023, a nonparametric trend analysis was performed using the Mann–Kendall (MK) test and Sen’s slope estimator (Mann, H. B., 1945). This method is widely applied to time series data, particularly in ecological and climatic studies, due to its robustness against outliers and lack of assumptions regarding data normality.

The results of the Mann–Kendall test and Sen’s slope estimation for the time series of annual average IVCI from 2000 to 2023 are presented in Table 6. According to the Mann–Kendall test, the obtained τ coefficient = -87.000 indicates the presence of a negative trend in the series of annual IVCI values. The p-value = 0.03239 confirms the statistical significance of this trend at the $\alpha = 0.05$ level. The Z-statistic = -2.1396 also indicates a downward trend, significant within the critical range of the standard normal distribution.

The Sen’s slope estimator showed that IVCI decreased on average by 0.01023 units per year. The 95% confidence interval for the slope was from -0.02083 to -0.00091 , which does not include zero and therefore confirms the stability and reliability of the observed negative trend.

Table 6. Results of the Mann–Kendall Test Application

Indicator	Value
τ Coefficient (Mann–Kendall)	-87.000
p-value	0.03239
Z-statistic	-2.1396
Sen’s Slope (units/year)	-0.01023
95% Confidence Interval (Lower Bound)	-0.02083
95% Confidence Interval (Upper Bound)	-0.00091
<i>Note – compiled by the authors</i>	

Figure 6 presents the annual mean values of IVCI, plotted based on Sen’s slope estimation.

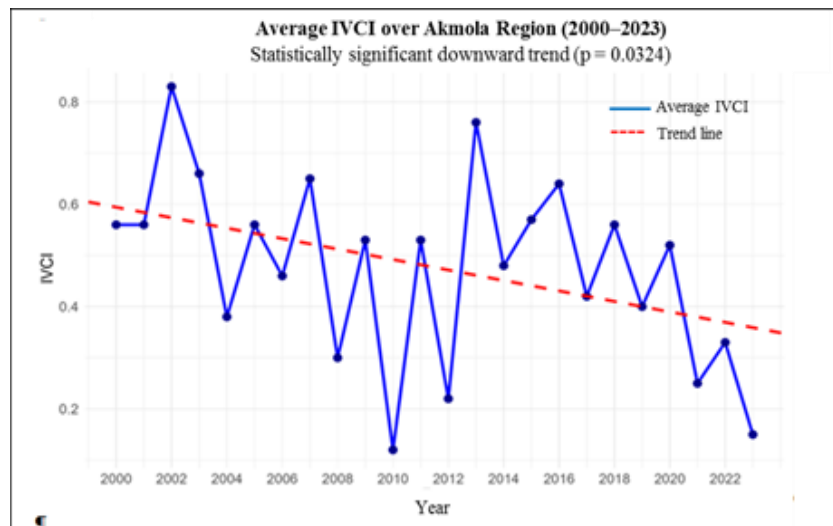


Figure 6. Averaged IVCI over the territory of the Akmola Region and the trend line (linear regression) for the period 2000–2023

Note – compiled by the authors

The dynamics of the annual mean IVCI values presented in Figure 6 clearly demonstrate a long-term weakening of vegetation activity in the Akmola Region. A distinct downward trend is observed, with local fluctuations corresponding to years of extreme drought. The combined

application of the Mann–Kendall test and Sen’s slope estimator revealed a statistically significant and consistent decline in IVCI values in the Akmola Region over the past two decades. Analysis of Figure 6 confirms that the periods of most pronounced vegetation stress occurred in 2008, 2010, 2012, and 2023, and that even after short-term improvements, the overall trend remains negative. The identified negative trend reflects the intensification of arid processes and the degradation of vegetation cover, highlighting the high sensitivity of the Integral Vegetation Condition Index (IVCI) to climatic fluctuations.

Thus, the IVCI index can be regarded as a reliable indicator of long-term changes in vegetation condition and a valuable tool for assessing the consequences of aridization in the northern agricultural regions of Kazakhstan.

CONCLUSION

The validation of the proposed Integral Vegetation Condition Index (IVCI) has demonstrated robust empirical support. Satellite-derived data were meticulously cross-validated against field-based metrics, specifically the Selyninov Hydrothermal Coefficient (HTC) and agricultural yields in non-irrigated regions where crop production is solely dependent on meteorological variables such as precipitation and temperature. This rigorous cross-validation process is essential for ascertaining the accuracy and reliability of remote sensing monitoring techniques. The high degree of correlation between satellite-derived vegetation indices and ground-based measurements underscores the efficacy of these techniques in providing accurate assessments of vegetation health and productivity.

The research confirmed the high informativeness of vegetation indices for assessing vegetation condition and identifying its change trends across Kazakhstan. The IVCI index, which was first developed by the authors to monitor the state of vegetation in Northern Kazakhstan, proved to be very effective. Its comparison with ground-based data — the Selyninov Hydrothermal Coefficient and statistical data on cereal crop yields — revealed significant correlations, confirming the reliability and practical applicability of the proposed methodology.

The application of the Mann–Kendall test and Sen’s slope estimator made it possible to identify a statistically significant negative trend in IVCI changes in the Akmola Region, while linear trends for the Kostanay and North Kazakhstan Regions also indicated a deterioration in vegetation conditions during 2000–2023. The use of the threshold value $IVCI < 0.3$ allowed the identification of years with extreme droughts (2008, 2010, 2012, 2023).

The study deduced from the long-term distribution of the IVCI index that the negative trend in this index indicates an increase in the adverse effects of weather on vegetation. Furthermore, the long-term distribution of the IVCI index clearly identifies the vegetation seasons most severely affected by drought, which are suitable for further investigation.

The IVCI index can be considered a satellite analogue of the Hydrothermal Coefficient (HTC) and serves as a new tool for assessing and monitoring drought conditions in the agricultural regions of Kazakhstan. The obtained results demonstrate the potential of using this index for operational assessment of agroclimatic risks and yield forecasting under limited ground observations.

A promising direction for future research is the integration of IVCI with climate models and higher spatial resolution datasets (e.g., Sentinel, Landsat) to refine the spatial structure of drought phenomena and assess their impact on agroecosystems.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: This work was carried out Scientific Research” program of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for 2025–2027, under the project titled: “Development and Training of a Chatbot for the Analysis and Forecasting of Dynamic

Processes Based on Earth Remote Sensing Data" (Grant No. AP26198325).

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

AI TECHNOLOGY USE STATEMENT: The authors of this scientific article declare that no artificial intelligence technologies were used in the preparation of the manuscript.

REFERENCES

- Al Nadabi M.S.; D'Antonio P.; Fiorentino C.; Scopa A.; Shams E.M.; Fadl M.E. (2024). Utilizing the Google Earth Engine for Agricultural Drought Conditions and Hazard Assessment Using Drought Indices in the Najd Region, Sultanate of Oman. *Remote Sens.* 16, 2960. <https://doi.org/10.3390/rs16162960>
- Baisholanov S.S., Pavlova V.N., Zhakieva A.R., Chernov D.A., Gabbasova M.S. (2018) Agroclimatic resources of Northern Kazakhstan. *Hydrometeorological research and forecasts.*1(367),168-184. <https://cyberleninka.ru/article/n/agroklimaticheskoyerayonirovanie-selskohozyaystvennyh-kultur-v-severnom-kazahstane>
- Gitelson A., Kogan F., Zakarin E., Spivak L., Lebed L. (1995) Estimation of seasonal dynamics of arid zone pasture and crop productivity using NOAA/AVHRR data. Final Report. Submitted to the Office of the Science Advisor USAID. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABY317.pdf
- Kogan F.N. (1990) Remote sensing of weather impacts on vegetation non-homogenous areas. *Int.J.of Remote Sensing.* 11, 1405- 1419 <https://doi.org/10.1080/01431169008955102>
- Kogan F.N. (1994) Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv. Space Res. - Vol. 15. No. 11. P. 91-100.* [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
- Kogan F.N. (1997) Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society.* N 78. P. 621-636. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2)
- Kogan F., Gitelson A., Zakarin E., Spivak L., Lebed L. (2003) AVHRR-Based Spectral Vegetation Index for Quantitative Assessment of Vegetation State and Productivity: Calibration and Validation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.*, 69, 8. 899-906. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.8.899>
- Kronberg, (1988) P. Remote sensing of the Earth. Mir. <https://www.geokniga.org/books/20459>.
- Mann H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Orlov A.I. (2004). *Applied Statistics: Textbook.* Moscow: Exam Publishing House, 656 p. <http://www.aup.ru/books/m163/>
- Rouse J. W., Haas R.H., Schell J.A., and Deering D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3691.8244>
- Spivak L., Vitkovskaya I., Batyrbayeva M. (2008). Analysis of inter seasonal variations of productivity of vegetative cover of Kazakhstan using temporal remote sensing rows. *News of Nat. Acad. of Sci. of Kazakhstan. Phys.-Math.-Ser.*, 4. <https://doi.org/10.31489/2021No2/90-95>.
- Spivak L., Vitkovskaya I., Batyrbayeva M., Terekhov A. (2009). Detection of desertification zones using multi-year rows of remote sensing data// Series "NATO science for peace and security: environmental security". https://doi.org/10.1007/978-90-481-9618-0_26
- Spivak L.F., Batyrbayeva M.Zh., Vitkovskaya I.S., Muratova N.R., Berdygulov N.I., Mombekova D.K., Zhaksybekova K.A., Kapatay Zh.T. (2016). Possibility of using satellite data in assessing aridity in Kazakhstan. *Hydrometeorology and ecology.* 3, 26-36. <https://journal.kazhydromet.kz/index.php/kazgidro/article/view/451/464>

- Vitkovskaya, I., Batyrbayeva, M., Berdigulov, N., & Mombekova, D. (2024). Prospects for drought detection and monitoring using long-term vegetation indices series from satellite data in Kazakhstan. *Land*, 13, 2225. <https://doi.org/10.3390/land13122225>
- Handbook of Drought Indicators and Indices. Integrated Drought Management Programme (IDMP). WMO, (2016). No. 1173, 60 p. https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf
- VIII National Communication and V Biennial Report Republic of Kazakhstan UN Framework Convention about climate change. (2022). http://infkcts.int/site/default/files/-resource/8NS_Kazakhstan_2022v1.0.pdf.
- Meteorological Database website https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/
- Agencies for strategic planning and reforms of the Republic of Kazakhstan <https://stat.gov.kz/ru/region/akmola/dynamic-tables/1485/>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Витковская Ирина Сергеевна – әлеуметтік ғылымдар магистрі, «Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы қ., Қазақстан

Витковская Ирина Сергеевна – кандидат физико-математических наук, АО «Национальный центр космических исследований и технологий», г. Алматы, Казахстан

Vitkovskaya Irina Sergeevna – Candidate of Physico-mathematical Sciences, JSC National Center of Space Research and Technologies, Almaty, Kazakhstan,

e-mail: irinas_vit@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7758-2975>



Батырбаева Мадина Жанаевна – техника ғылымдарының кандидаты, «Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы қ., Қазақстан

Батырбаева Мадина Жанаевна – кандидат технических наук, АО «Национальный центр космических исследований и технологий», г. Алматы, Казахстан

Batyrbayeva Madina Zhanayevna – Candidate of Technical Sciences, JSC National Center of Space Research and Technologies, Almaty, Kazakhstan

e-mail: m.batyrbayeva@spaceres.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8367-4016>



Асылбеков Женисбек Аманбаевич – PhD, «Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы қ., Қазақстан

Асылбеков Женисбек Аманбаевич – PhD, АО «Национальный центр космических исследований и технологий»,

Asylbekov Zhenisbek Amanbayevich – PhD, JSC National Center of Space Research and Technologies, Almaty, Kazakhstan

e-mail: madina-iki@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0095-9409>



Идришева Жанат Кабылбековна – техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің Жер туралы ғылымдар факультеті, Өскемен, Қазақстан

Идришева Жанат Кабылбековна – кандидат технических наук, Факультет наук о земле Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Kazakhstan

Idrisheva Zhanat Kabylbekovna – Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, School of Geosciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: ZhIdrisheva@edu.ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0289-0839>



Момбекова Дамира Кумисбековна – «Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы, Қазақстан

Момбекова Дамира Кумисбековна – АО «Национальный центр космических исследований и технологий», г. Алматы, Казахстан

Mombekova Damira Kumisbekovna, JSC National Center of Space Research and Technologies, Almaty, Kazakhstan

e-mail: damira_mombekova@mail.ru


https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_10

MPNТИ 89.57.21

МИНИМИЗАЦИЯ ПАРАЗИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КАТАДИОПТРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

КАТАДИОПТРИЯЛЫҚ ОПТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ПАРАЗИТТІК СӘУЛЕЛЕНУ ДІ АЗАЙТУ

MITIGATION OF STRAY LIGHT IN CATADIOPTRIC OPTICAL SYSTEMS

Б.Р. Жумажанов ¹, А.Е. Кулакаева ^{1,2*}, А.Т. Жетписбаева ^{1,3}, Б.С. Жумажанов ¹

¹ТОО «Ghalam», г. Астана, Казахстан

²Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева., г. Астана, Казахстан

*Автор-корреспондент: Кулакаева Айгуль Ергалиевна (полностью), e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

Ключевые слова:

BDLI, система Максудова, паразитное излучение, ДЗЗ, бленда, Zemax OpticStudio, катадиоптрическая оптическая система.

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования по моделированию, расчету и минимизации паразитного излучения в катадиоптрических оптических системах, используемых в спутниковых системах дистанционного зондирования Земли. В качестве исследуемого объекта выбрана компактная оптическая система BDLI, построенная по оптической схеме Максудова. Целью работы является оценка эффективности конструктивных решений по снижению паразитного излучения и анализ возможности их применения в условиях ограниченного объема и массы космического аппарата.

Для анализа распространения рассеянного света использовался метод обратной трассировки лучей в программной среде Zemax OpticStudio, что позволило выявить основные паразитные траектории и разработать меры по их блокированию. Были исследованы различные геометрические конфигурации бленд, а также проанализировано влияние светопоглощающих и диэлектрических покрытий. По результатам моделирования установлено, что уровень паразитного излучения может быть снижен до 1,9 % на краю поля зрения и до 0,15 % на оптической оси. Выполненное сравнение с системой более сложной конфигурации подтвердило значительное влияние пространственного размещения компонентов на эффективность экранирования. Полученные данные могут быть использованы при проектировании компактных высокоточных оптических приборов для космических систем наблюдения Земли.

Түйінді сөздер:

BDLI, Максудов оптикалық сұлбасы, паразиттік сәуле шығару, ЖҚЗ, бленда, Zemax OpticStudio, катадиоптриялық жүйе.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада Жерді қашықтықтан зондтауға арналған спутниктік жүйелерде қолданылатын катадиоптриялық оптикалық жүйелердегі паразиттік сәуле шығару процестерін модельдеу, талдау және төмендету нәтижелері қарастырылады. Зерттеу нысаны ретінде Максудов оптикалық сұлбасы негізінде құрастырылған ықшам BDLI оптикалық жүйесі таңдалды. Зерттеудің мақсаты – паразиттік



© 2026 Б.Р. Жумажанов, А.Е. Кулакаева, А.Т. Жетписбаева, Б.С. Жумажанов

Данная работа распространяется на условиях лицензии Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

сәуленуді азайтуға бағытталған конструкциялық шешімдердің тиімділігін бағалау және оларды ғарыш аппараттарында шектеулі көлем мен масса жағдайында қолдану мүмкіндігін анықтау болып табылады. Паразиттік жарықтың таралу жолдарын талдау үшін Zemax OpticStudio бағдарламалық ортада кері трассировка әдісі қолданылды, бұл негізгі паразиттік траекторияларды анықтап, оларды тиімді бөгейтін шараларды әзірлеуге мүмкіндік берді. Өртүрлі бленда геометриялары, сондай-ақ жарық сіңіретін және диэлектрлік жабындардың тиімділігі зерттелді. Модельдеу нәтижелері көрсеткендей, паразиттік сәуле шығару деңгейі көру өрісінің шетінде 1,9%-ға дейін, ал оптикалық ось бойында 0,15%-ға дейін төмендеуі мүмкін. Күрделі конфигурациядағы жүйемен салыстыру кеңістікте оптикалық компоненттерді дұрыс орналастырудың экрандау тиімділігіне елеулі әсер ететінін көрсетті. Бұл нәтижелер Жерді ғарыштан бақылауға арналған ықшам әрі жоғары дәлдікті оптикалық құрылғыларды жобалауда қолдануға жарамды әдіс болып табылады.

keywords:

BDLI, Maksutov design, stray radiation, Earth remote sensing, baffle, Zemax OpticStudio, catadioptric optical system.

ABSTRACT

This article presents the results of a study on the modeling, calculation, and mitigation of stray radiation in catadioptric optical systems used in satellite-based Earth remote sensing applications. The object of investigation is a compact optical system, BDLI, based on the Maksutov optical design. The objective of the study is to evaluate the effectiveness of design solutions aimed at reducing stray radiation and to assess their feasibility under the strict volume and mass constraints of spacecraft.

To analyze the propagation of scattered light, a reverse ray tracing method was employed using the Zemax OpticStudio software. This enabled the identification of primary stray light paths and the development of effective suppression measures. Various geometric configurations of baffles were examined, along with the influence of light-absorbing and dielectric coatings. Simulation results demonstrated that stray radiation can be reduced to 1.9% at the edge of the field of view and to 0.15% along the optical axis. A comparison with a more complex optical system confirmed the substantial impact of spatial component arrangement on shielding efficiency. The obtained findings may be applied in the development of compact, high-precision optical instruments for satellite-based Earth observation systems.

ВВЕДЕНИЕ

Паразитное излучение представляет собой одну из важнейших проблем, возникающих при разработке современных оптических систем, предназначенных, в частности, для полезных нагрузок космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Тенденция миниатюризации КА бросает новые вызовы к компактности оптических систем, при этом сохраняя или даже улучшая качество изображения, получаемого с их помощью. И все более актуальным становится вопрос подавления паразитного излучения в таких оптических системах, так как пространства для конструктивных элементов становится все меньше. Паразитное излучение связано с нежелательным рассеянием или отражением света внутри оптических систем, что существенно ухудшает качество изображений, приводит к появлению шумов и помех и затрудняет последующую обработку и анализ полученных данных. Особенность данного явления состоит в том, что оно не только искажает качество конечных результатов наблюдений, но и снижает общую эффективность работы спутниковых систем, особенно при яркой освещенности наблюдаемых объектов, например, при дневных съемках

поверхности Земли. Для снижения или полного устранения негативных последствий паразитного излучения разработчикам приходится применять дорогостоящие технологические решения, что ведет к увеличению стоимости и усложнению проектирования оптических приборов. Поэтому актуальной становится задача более точного анализа уровня и источников паразитного излучения для разработки эффективных и практически применимых методов его подавления.

Попадание значительного паразитного излучения на детектор оптической системы полезной нагрузки ДЗЗ оказывает комплексное негативное воздействие на качество регистрируемого изображения. Во-первых, происходит снижение контраста изображения вследствие наложения фонового света, что затрудняет визуальное выделение деталей и уменьшает динамический диапазон системы. Это в свою очередь ухудшает пространственное разрешение, делая невозможным распознавание мелких объектов и структур на снимке. Во-вторых, неравномерность распределения паразитного излучения по поверхности детектора приводит к появлению артефактов в виде градиентов яркости и локальных засветок, усложняющих калибровку и геометрическую коррекцию изображений. В-третьих, паразитное излучение, обладая отличным от полезного сигнала спектральным составом, вносит искажения в цветопередачу, что критично для задач спектрального анализа и идентификации материалов. В-четвертых, увеличение уровня шума снижает отношение сигнал/шум, что ограничивает возможность выделения полезной информации из зашумленного изображения. Совокупность таких эффектов существенно ограничивает применимость данных ДЗЗ для решения задач распознавания объектов, мониторинга изменений и картографирования, подчеркивая актуальность исследований, направленных на разработку эффективных методов подавления паразитного излучения в оптических системах КА ДЗЗ.

Учитывая высокую чувствительность оптических систем к паразитному излучению, особенно в условиях ограниченного пространства и повышенных требований к точности измерений, разработка эффективных методов его подавления становится приоритетной задачей. Для обеспечения высокого качества изображений и надежности данных ДЗЗ необходимо не только учитывать паразитное излучение на этапе проектирования, но и глубоко анализировать источники его возникновения, пути распространения, а также оценивать эффективность различных способов его минимизации. В этой связи все большее внимание уделяется современным инженерным и программным подходам к снижению паразитного воздействия в катадиоптрических оптических системах, особенно при работе в инфракрасном диапазоне, где даже незначительные рассеянные потоки могут существенно исказить сигнал от слабых источников. Одним из наиболее эффективных методов анализа паразитного излучения в катадиоптрических оптических системах является непоследовательная трассировка лучей (*non-sequential ray tracing*). Как показано в (Zhu et al., 2015), ее применение в сочетании с оптимизацией экранов и использованием малорассеивающих покрытий позволяет добиться существенного снижения паразитной облученности фокальной плоскости.

Расширением данного подхода является метод обратной трассировки из углов детектора (*corner-departure*), рассмотренный в (Hong et al., 2025), позволяющий выявлять нестандартные и сложно прогнозируемые пути распространения рассеянного света при существенно меньших вычислительных затратах по сравнению с классической непоследовательной трассировкой лучей.

В (Yeon et al., 2025) проведена параметрическая оптимизация геометрии бленд. Показано, что даже небольшие изменения их длины и угла наклона позволяют в 2,7 раза снизить внутреннее паразитное облучение детектора, а также уменьшить угол попадания прямых лучей света с 55° до 10° , существенно повышая эффективность подавления как

внешнего, так и внутреннего паразитного излучения. Внутренние источники паразитного излучения, формируемые самими оптическими элементами и конструкцией, привлекают все больше внимания. Установлено (Lu et al., 2024), что внутреннее тепловое излучение, возникающее от компонентов, работающих при комнатной температуре, является значимым источником паразитного фона в инфракрасных системах и может существенно снижать отношение С/Ш, вплоть до подавления полезного сигнала.

В (Fu et al., 2024) рассматривается применение локального охлаждения зеркал в составе катадиоптрической системы для снижения теплового паразитного излучения. Использование компактной конструкции и высокоэффективного холодного стопа (cold stop) делает такой подход перспективным для малогабаритных космических платформ с ограничениями по массе и энергии.

Более рациональные решения включают пассивные меры подавления, такие как оптимизация конструкции корпуса, бленд и экранирующих элементов. Подобный подход реализован в (Zou et al., 2022), где синхронная многопозиционная система измерения рассеянного светового поля с зенитным диапазоном $\pm 23,5^\circ$ и угловым охватом до 68° позволила точно описать пространственное распределение паразитных потоков. При этом достигнута максимальная относительная погрешность измерения – не более 3,71 %. Однако реализация данного метода на борту космических аппаратов пока ограничена.

Инженерная оптимизация оптической схемы получила развитие в (Zeng et al., 2020), где с помощью гибридного метода были оптимизированы параметры зеркала-квадрики, что позволило значительно снизить абберрации без ухудшения разрешающей способности системы. Другой подход, основанный на обучении нейросетей (REBPNet), продемонстрирован в (Li et al., 2025), где нейросеть адаптируется под температурные колебания и калибрует уровень теплового фона. Несмотря на перспективность, такие методы требуют значительных вычислительных ресурсов и больших объемов обучающих данных, что ограничивает их универсальность.

В (Han et al., 2021) рассмотрена катадиоптрическая система в составе космической лазерной установки (SLDR) для удаления мусора, где особое внимание уделено подавлению рассеянного излучения. Применены инженерные методы: двухступенчатая бленда, боковое смещение оптической оси, подбор черных антирефлексных покрытий и оптимизация направления открытия крышки телескопа. Данные меры позволили достичь уровня подавления паразитного излучения порядка 10^{-9} , что демонстрирует эффективность геометрических решений при работе с яркими объектами вне поля зрения.

Аналогичный подход применен в (Chunlei et al., 2019), где для длинноволновой инфракрасной катадиоптрической системы проведено моделирование рассеянного излучения в TracePro с расчетом PST и тепловых шумов в диапазоне температур от 260 до 320 К. Показано, что при отклонении от оси на угол, превышающий критический, значение PST падает ниже 10^{-8} , что соответствует требованиям к фоновому излучению, а для обеспечения фонового режима наблюдения слабых целей необходима криогенная стабилизация температуры системы.

Продолжая тему тепловой устойчивости инфракрасных оптических систем, в работе (Xing et al., 2019) рассмотрена катадиоптрическая система среднего инфракрасного диапазона (MWIR), оптимизированная для функционирования в широком температурном диапазоне от -40°C до $+40^\circ\text{C}$. Благодаря применению аналитических методов коррекции теплового дефокуса и хроматической абберрации, а также глобальной оптимизации параметров в программной среде Zemax OpticStudio, удалось обеспечить 100 % эффективность холодного экранирования и высокую стабильность фокусного расстояния.

Таким образом, несмотря на широкий спектр существующих решений, проблема паразитного излучения в катадиоптрических системах остается актуальной. Множество

методов, включая непоследовательную трассировку, оптимизацию экранов и тепловую стабилизацию, показывают эффективность, но часто требуют значительных ресурсов или усложняют конструкцию. Это подчеркивает необходимость разработки более универсальных и экономичных подходов.

Целью данного исследования является разработка и оптимизация методов расчета и минимизации паразитного излучения в катадиоптрических оптических системах типа Максудова, применяемых в составе полезных нагрузок спутников ДЗЗ. Для достижения поставленной цели используется программное обеспечение Zemax OpticStudio, обеспечивающее моделирование распространения паразитного света и проведение трассировки лучей с учетом конструктивных и оптических характеристик системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данного исследования была рассмотрена технологическая оптическая полезная нагрузка казахстанского КА KazSTSat. Основной задачей разработки полезной нагрузки являлась отработка технологий постобработки изображений для получения разрешения выше, чем позволяет дифракционный предел телескопа, поэтому полезная нагрузка называется BDLI (Beyond Diffraction Limit Imager – камера с разрешением за пределами дифракционного предела). Данная оптическая система BDLI спроектирована на основе оптической схемы Максудова, включающей сферические зеркала и корректирующие линзы. Выбор таких систем обусловлен их конструктивными преимуществами: компактностью, малыми массогабаритными характеристиками, а также способностью эффективно снижать хроматические и сферические аберрации, что особенно важно при использовании в спутниковых приборах для ДЗЗ.

Методическая часть исследования была направлена на детальный анализ дизайна данной оптической системы с целью выявления основных причин попадания паразитного излучения на детектор. Следует отметить, что большое внимание уделялось недопущению возрастания стоимости прибора, поэтому в первую очередь рассматривались оптические элементы со сферическими поверхностями, и проектировщикам удалось достичь требуемого качества изображения, используя только сферические поверхности зеркал и линз. Проведен детальный анализ траекторий распространения лучей внутри оптической системы с целью выявления путей распространения паразитного излучения. Для снижения его влияния были реализованы меры, направленные на многократное отражение паразитных лучей до их попадания на детектор, что позволило существенно ослабить их интенсивность.

Для проектирования оптической системы и анализа паразитного излучения использовался специализированный программный комплекс Zemax OpticStudio. Оптимизация конструкции оптической системы позволила заблокировать часть нежелательного излучения и ослабить интенсивность оставшихся лучей. Исследована эффективность применения различных типов антибликовых покрытий, наносимых на поверхности оптических элементов, для подавления паразитных отражений.

На каждом этапе проводилась оценка доли паразитного излучения относительно мощности полезного сигнала, а также проверка возможных прямых путей распространения света к детектору. Дополнительно оценивались эффективность различных бленд и влияние светопоглощающих и диэлектрических покрытий на уровень паразитного света.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Компактные оптические системы, такие как системы Максудова, благодаря своим габаритам и коррекции аберраций, находят широкое применение в качестве полезных нагрузок КА ДЗЗ. Однако специфика данной оптической схемы, особенно в условиях

ограниченного пространства и высоких требований к качеству изображения, обуславливает повышенную восприимчивость к паразитному излучению. Данная проблема проявляется в виде снижения контрастности и точности получаемых данных, что критически важно для задач точного земледелия, мониторинга окружающей среды и других применений ДЗЗ.

Сложность эффективного подавления паразитного излучения в оптических системах Максудова обусловлена рядом факторов. Во-первых, компактность конструкции ограничивает возможности применения традиционных методов, таких как использование бленд и перегородок. Во-вторых, наличие множества отражающих поверхностей, включая зеркала и линзы, увеличивает вероятность переотражений. В-третьих, попытки расширения поля зрения ухудшают коррекцию аберраций и приводят к увеличению паразитного излучения от внеосевых источников. Наконец, предотвращение загрязнения оптических поверхностей в условиях космоса остается сложной инженерной задачей.

Данное исследование направлено на разработку новых методов анализа и минимизации паразитного излучения, учитывающих особенности компактных оптических систем Максудова. Рассмотренные варианты минимизации паразитного излучения включали оптимизацию геометрии оптических элементов, использование специализированных просветляющих покрытий и использование материалов с низким коэффициентом рассеяния, а также комбинации данных решений. Отметим, что разработка новых материалов и покрытий не входит в задачи исследования. В условиях растущей конкуренции на рынке высокотехнологичной космической продукции разработчики спутниковых систем стремятся обеспечить максимально возможное качество получаемых данных, что делает задачу минимизации паразитного излучения особенно актуальной. Кроме того, понимание причин его возникновения и характера влияния важно для научного сообщества, так как способствует повышению точности и надежности алгоритмов обработки изображений, получаемых с космоса.

В ходе проектирования оптической системы были учтены требования миссии, интерфейсы с другими подсистемами КА, все возможные механические и тепловые нагрузки. Таким образом была получена оптическая система BDLI с фокусным расстоянием 440 мм, диаметром входной апертуры 27 мм и длиной системы вдоль оптической оси не более 130 мм (без учета камеры и крепежных элементов). Ход лучей в оптической системе представлен на рисунке 1.

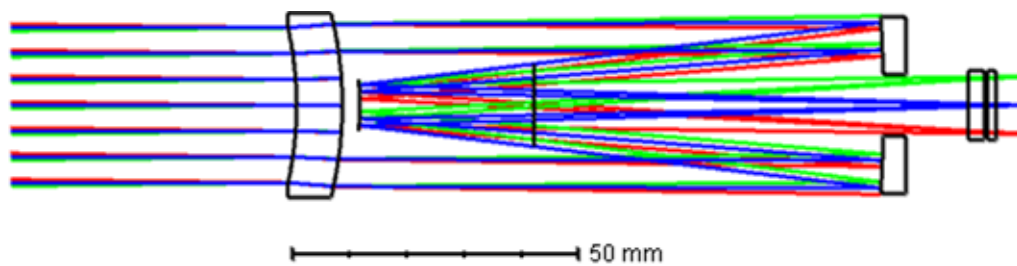


Рисунок 1. Ход лучей в оптической системе BDLI

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

В классической оптической схеме Максудова вторичное зеркало интегрировано с менисковым корректором посредством нанесения отражающего покрытия на центральную часть его внутренней поверхности, что обеспечивает жесткую фиксацию и компактность конструкции. В конструкции оптической системы BDLI вторичное зеркало выполнено в виде отдельного элемента с определенной толщиной и крепится на мениск путем склеивания, как показано на рисунке 2.

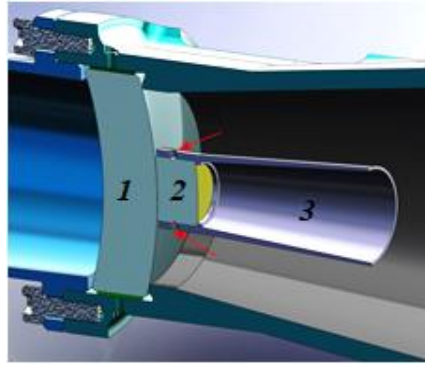


Рисунок 2. Склейка входной линзы и вторичного зеркала: 1 – Мениск (входная линза из Schott BK7G18), 2 – вторичное зеркало, 3 – внутренняя бленда, закрепленная на вторичном зеркале. Красными стрелками указаны отверстия для введения клея для фиксации бленды на вторичном зеркале

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде SolidWorks

В определенной степени это решение тоже связано с минимизацией паразитного излучения. Толщина вторичного зеркала используется как поверхность для крепления внутренней бленды. Диаметр вторичного зеркала также тщательно высчитывался и составляет компромиссное решение между экранированием полезного сигнала и блокировкой паразитного излучения.

Еще одним отличием от классической системы Максудова является то, что данная система будет использоваться в космосе и будет подвергаться жестким условиям радиации. Поэтому для защиты основных элементов оптической системы от воздействия радиационной среды космического пространства в конструкции использовалось радиационно стойкое оптическое стекло Schott BK7G18, обеспечивающее стабильные характеристики в течение длительного срока эксплуатации.

После прохождения через отверстие главного зеркала до попадания на детектор лучи проходят через две корректирующие линзы, предназначенные для устранения остаточных оптических аберраций.

На рисунке 3 показано расположение корректирующих линз относительно главного зеркала и детектора.

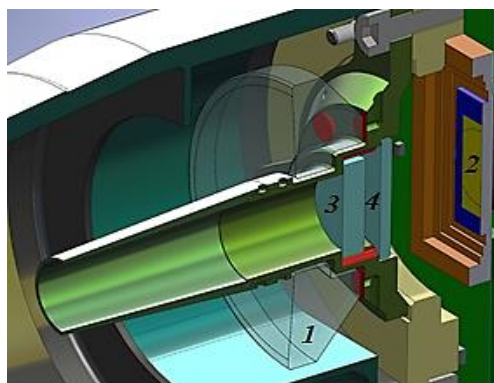


Рисунок 3. Расположение корректирующих линз относительно главного зеркала и детектора: 1 – главное зеркало, 2 – детектор, 3 – корректирующая линза 1, 4 – корректирующая линза 2, изготовлена из стекла N-BK7 с широкополосным антибликовым покрытием и служит также в качестве спектрального фильтра

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде SolidWorks

Изначально предусматривалось нанесение металлических покрытий на обе отражающие поверхности, а также установка двухкомпонентного фильтра для ограничения спектральной полосы пропускания.

Однако в процессе реализации указанных конструктивных решений были выявлены практические сложности при сборке вторичного зеркала. Стандартная процедура центрирования дублетов обычно осуществляется методом оптической юстировки с последующей фиксацией компонентов клеем, отверждаемым под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения. Однако радиационно стойкое стекло, применяемое для изготовления переднего мениска, не пропускает УФ-спектр, а наличие металлического покрытия на поверхности вторичного зеркала дополнительно препятствует прохождению УФ-лучей со стороны зеркала, что делает традиционный метод склеивания неприменимым.

В результате были рассмотрены альтернативные подходы к процессу центрирования и установки вторичного зеркала. Один из вариантов предполагал выполнение центрирования и приклеивания зеркала до нанесения металлического покрытия. Однако при этом возникли трудности с эффективной маскировкой оптических поверхностей для последующего нанесения покрытий. Наиболее рациональным решением стало использование диэлектрических покрытий, обладающих стабильной прозрачностью в УФ-диапазоне. Такой подход не только позволил обеспечить качественную фиксацию зеркала, но и способствовал подавлению внеполосных отражений, повышая общую эффективность оптической системы. В ходе оптимизации оптической схемы было принято решение использовать диэлектрические отражающие покрытия как на первичном, так и на вторичном зеркалах.

Кроме того, применение диэлектрических зеркальных покрытий позволило отказаться от двухкомпонентного фильтра, заменив его на одну линзу из стекла N-BK7 с широкополосным антибликовым покрытием. Это упростило оптическую схему и обеспечило необходимое спектральное разделение без потери эффективности.

На этапе моделирования было проведено количественное исследование паразитного излучения в оптической системе. В результате оптическая схема была детально проанализирована с целью оценки уровня паразитных световых потоков, достигающих детектора. Чтобы дать представление о том, откуда может появиться этот рассеянный свет, ниже приведен рисунок 4, представляющий трассировку луча только с рассеянным светом, отфильтрованным для точки детектора на оси (синие лучи) и точки на краю поля зрения (зеленые лучи). Поскольку все эти лучи имеют множественные отражения перед тем, как попасть на детектор, все они имеют низкую мощность.

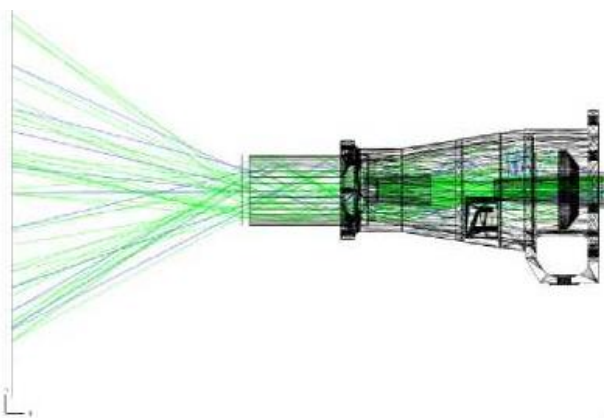


Рисунок 4. Рассеянное излучение, достигающее детектора

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

Источником паразитных лучей с наибольшей интенсивностью оказались прямые лучи, проходящие через входную апертуру и, минуя оптические элементы, попадающие непосредственно на детектор. Пример распространения таких лучей представлен на рисунке 5.

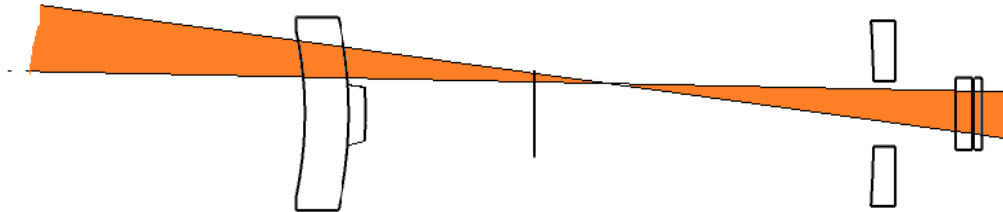


Рисунок 5. Лучи света, напрямую попадающие на детектор

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

Обычно в наземных оптических системах данная проблема решается длинными наружными блендами. Однако в условиях КА, где большое внимание уделяется компактности системы, длина наружных бленд ограничена пространством внутри платформы, выделенным под размещение оптической ПН.

Альтернативным способом минимизации попадания прямых лучей на детектор является увеличение диаметра вторичного зеркала и уменьшение диаметра отверстия в главном зеркале. Однако увеличение вторичного зеркала ведет к увеличению экранирования, тем самым уменьшая количество полезного света, попадающего на детектор, что ведет к уменьшению качества изображения. В то же время уменьшение отверстия в главном зеркале ограничивает ширину угла поля, что тоже нежелательно. Поэтому необходимы новые подходы и решения, которые совместимы с компактностью изделия.

Для предотвращения попадания прямых лучей через переднюю линзу и центральное отверстие главного зеркала на детектор были разработаны и применены специальные экранирующие элементы. Их эффективность оценивалась с использованием непоследовательной модели трассировки лучей в программном комплексе Zemax OpticStudio. Конструкция предусматривала установку двух внутренних бленд: передней, расположенной вокруг вторичного зеркала, и задней, закрепленной на втулке, проходящей через центральное отверстие главного зеркала.

На рисунке 6 представлена модель, демонстрирующая расположение указанных защитных элементов.

В конструкции также предусмотрена внешняя передняя бленда, предназначенная для защиты оптической системы от воздействия широкоугольного освещения. Хотя она не обеспечивает полного экранирования прямых световых путей, ее применение способствует снижению уровня рассеянного света, возникающего от внешних источников, находящихся за пределами основного поля зрения. Диаметр главного зеркала значительно меньше внутреннего диаметра тубуса телескопа, так как необходимо пространство для креплений. Пространство снаружи главного зеркала закрыто экранирующей поверхностью – маской. Поверхность маски так же, как и вся внутренняя поверхность тубуса, покрыта светопоглощающей черной краской Aeroglaze Z306, которая не дает дегазации в космических условиях. Такой подход дополнительно позволяет уменьшить фоновое паразитное излучение, что особенно важно при съемке в условиях высокой внешней освещенности.

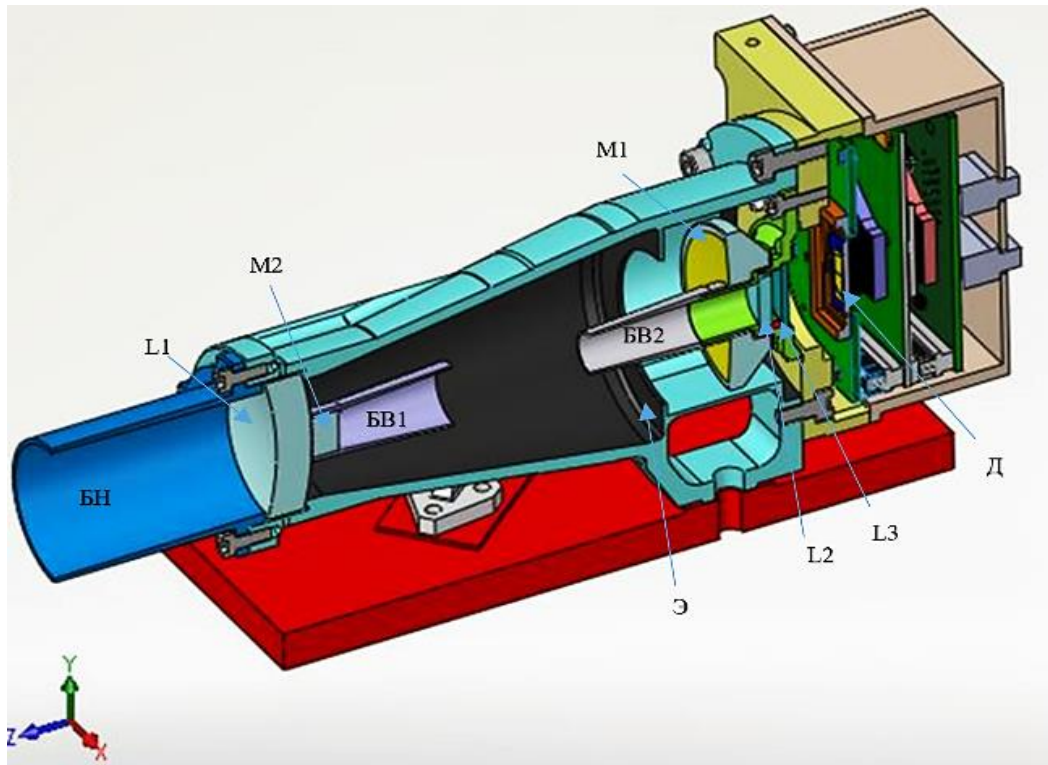


Рисунок 6. Модель размещения защитных элементов в оптической системе BDLI: Элементы оптической системы: М1 – главное зеркало, М2 – вторичное зеркало, L1 – входная линза, L2, L3 – корректирующие линзы, Д – детектор. Защитные элементы: БН – наружная бленда, БВ1 – внутренняя бленда, закрепленная на вторичном зеркале, БВ2 – внутренняя бленда, закрепленная на главном зеркале, Э – экранирующая поверхность (маска)
Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде SolidWorks

Расчет и минимизация паразитного излучения. Рассмотренные в данной работе подходы к расчету и минимизации паразитного излучения основаны на последних инженерных разработках, применяемых при проектировании современных оптических систем. Особое внимание было уделено анализу эффективности внутренних бленд, специализированных покрытий оптических поверхностей, геометрии внутренней поверхности трубы телескопа, а также использованию методов анализа прохождения лучей в программной среде Zemax OpticStudio. Для подтверждения работоспособности предлагаемых решений приводились примеры актуальных проектов, в которых успешно реализованы как механические, так и оптические меры по снижению паразитного влияния.

Анализ паразитного света: обратная трассировка лучей. В рамках данной работы предложен метод анализа паразитного излучения, основанный на предположении, что при равномерном распространении света во всех направлениях путь луча от детектора к входной апертуре идентичен пути луча, входящего через апертуру и достигающего детектора. Поэтому в ходе исследования для анализа паразитного излучения применялся метод обратной трассировки лучей, позволяющий моделировать распространение света от плоскости детектора к входному зрачку оптической системы.

Суть метода состояла в размещении моделируемых источников в плоскости детектора и анализе хода лучей, направленных от детектора к входной апертуре. На некотором расстоянии от входной линзы перпендикулярно ходу лучей ставились детекторы излучения большой площади, которые фиксировали все лучи света, исходящие от смоделированного

источника. Далее моделировался ход лучей полезного сигнала, и между оптической системой и детектором большой площади в точке фокусировки лучей, исходящих от смоделированных лучей света, ставились детекторы микроскопического размера. Количество малых детекторов равнялось количеству смоделированных источников света на детекторе, так как они представляли собой реальные источники излучения. Все лучи, попадающие на малый детектор, рассматривались как полезный сигнал, тогда как лучи, прошедшие мимо него, но зарегистрированные на большом детекторе, рассматривались как паразитное излучение. Интенсивность паразитного излучения рассчитывалась до и после применения каждой меры минимизации, а затем сравнивалась с исходным уровнем для оценки ее эффективности. Таким образом выявлялись все потенциальные нежелательные пути прохождения лучей и применялись меры по их минимизации.

В рамках моделирования были заданы два источника света: один – на оптической оси, второй – на краю поля зрения. Угол конуса излучения составил 65° , что обеспечивало охват всех возможных траекторий распространения света внутри системы. Результаты симуляции паразитного излучения представлены на рисунке 7.

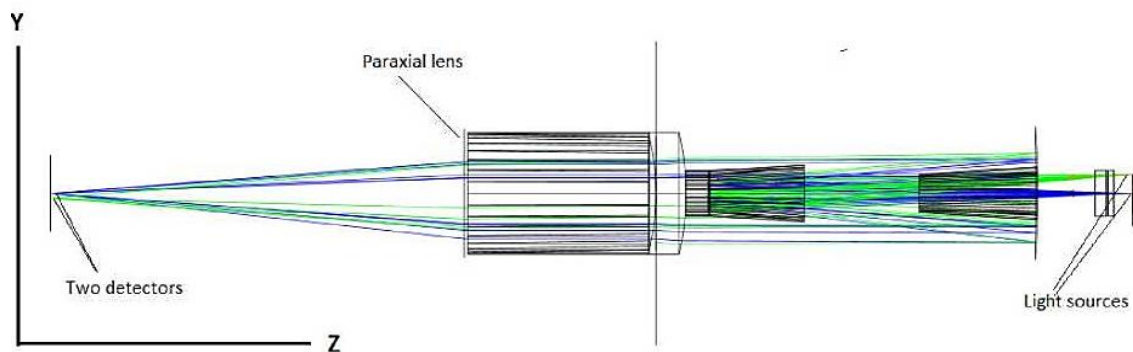


Рисунок 7. Обратная трассировка лучей в непоследовательном режиме Zemax

Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

Результаты моделирования показали, что введенные бленды эффективно блокируют прямые лучи, способные достигать детектора. Уровень паразитного света, обусловленного внутренними отражениями, не превышает 2,1 % от полезного сигнала на краю поля зрения.

Принятые меры по минимизации паразитного излучения. Существенной особенностью предложенного метода является моделирование паразитного излучения с использованием конфигурации двойного детектора и оптимизация параметров внутренних бленд с учетом геометрических ограничений компактной спутниковой платформы. Для минимизации паразитного излучения в оптической системе принят ряд мер. После проектирования каждой из мер проводился повторный расчет паразитного излучения для оценки эффективности принятых решений.

Для ограничения прямых световых путей внутри системы были предусмотрены и установлены две конические бленды. Передняя бленда располагалась вокруг вторичного зеркала, а задняя – на втулке, проходящей через центральное отверстие главного зеркала. Был проведен ряд итераций с разными длинами и углами конусов бленд, после каждой итерации проводился замер уровня паразитного излучения, и таким образом выбраны максимально эффективная форма и длина бленд, которые также не блокируют полезные лучи. Эффективность конструкции бленд была подтверждена моделированием в

программной среде Zemax OpticStudio, которое показало полное отсутствие прямых путей попадания света на детектор.

Дополнительно система оснащена внешней блендой, предназначенной для защиты от широкоугольного освещения и подавления рассеянного света, поступающего от источников, находящихся за пределами основного поля зрения (угол поля зрения $>1,3^\circ$). Незначительное снижение тангенциальной модуляционной передачи (MTF) вне оптической оси, вызванное частичным экранированием конструкцией бленд, было компенсировано за счет оптимизации общей конфигурации оптической схемы.

Для дальнейшего подавления паразитного излучения внутренние поверхности корпуса, включая внутреннюю поверхность трубы телескопа и кольцевые области вокруг отверстий в главных зеркалах, были покрыты светопоглощающей краской Aeroglaze Z306. Это покрытие обладает низким коэффициентом отражения – около 5 %, что эффективно снижает уровень рассеянного света. Анализ показал, что без применения чернения паразитное излучение на краю поля зрения достигало 2,1 % от полезного сигнала, тогда как с покрытием Aeroglaze Z306 этот показатель снизился до 1,9 %. В центральной области поля зрения значения составили 0,2 % без чернения и 0,15 % после нанесения покрытия.

Обратная трассировка лучей в системе BDLI проводилась для двух точечных источников: один был расположен на оптической оси (синие лучи), второй – в краевых зонах поля зрения (зеленые лучи с наклоном, соответствующим половине угла FoV). Угол конуса излучения составлял 65° . Для каждого источника было смоделировано по 100 000 лучей при общей энергии 1 Вт и минимальном пороге мощности 10^{-5} Вт. Результаты моделирования показали полное отсутствие прямых лучей, достигающих детектора, и уровень паразитного света менее 2,1 % на краю поля зрения и менее 0,2 % на оси при отсутствии чернения краев зеркала.

Оптическая система BDLI работает в панхроматическом диапазоне 450–650 нм с центром излучения 575 ± 15 нм. Коэффициент пропускания составляет около 70 %, а модуляционная передача (MTF) превышает 12 % при пространственной частоте 77 пар линий на миллиметр. Вместо традиционного фильтра было использовано окно из стекла N-BK7 с широкополосным антибликовым покрытием, что упростило оптическую схему без ухудшения характеристик. Температурная стабильность системы составляет менее 10 мкм/°С в диапазоне температур 20 ± 5 °С. Так как испытания системы проводились в лабораторных условиях, а система эксплуатируется в условиях космоса, то есть в вакууме, возникает смещение фокуса, которое было вычислено, и в конструкции оптической полезной нагрузки при проектировании и создании предусмотрели съемную прокладку толщиной 0,13 мм, которая компенсирует смещение фокуса при переходе из лабораторных условий в вакуумную среду.

Результаты анализа показывают, что эффективное применение перегородок и специализированных покрытий позволяет снизить уровень паразитного излучения в оптической системе до значений, сопоставимых с результатами, полученными для системы BDLI. Однако абсолютные значения оказываются несколько выше, что обусловлено более сложной траекторией распространения лучей и увеличенным числом внутренних отражений вследствие конструктивных особенностей.

Исследование показало, что при проектировании компактных спутниковых оптических систем необходимо учитывать конструктивные особенности каждой меры по снижению паразитного излучения. Правильно подобранные стратегии экранирования и выбор эффективных материалов позволяют обеспечить высокую точность получаемых данных при сохранении компактности и малой массы приборов. Рисунок 8 демонстрирует, что спроектированные бленды не препятствуют прохождению полезных лучей света.

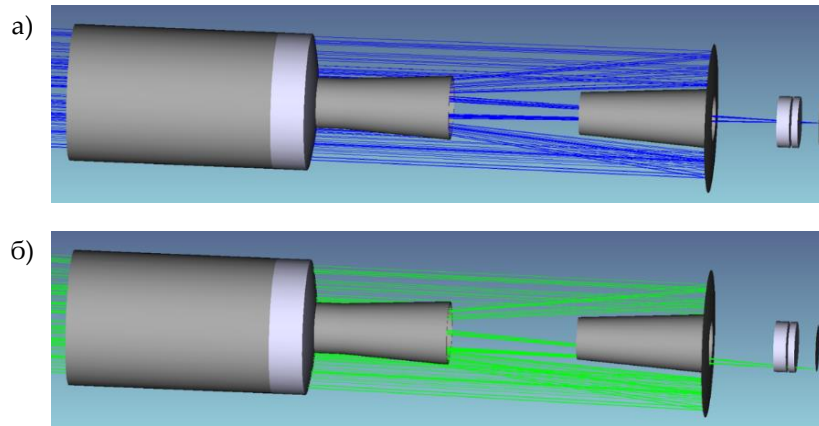


Рисунок 8. Прохождение лучей через оптическую систему с блендами: а – для осевых лучей света; б – для лучей света, попадающих на край поля зрения телескопа
Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

Рисунок 9 демонстрирует, что такие бленды также эффективно блокируют паразитные излучения, не позволяя им достичь детектора. Для примера на рисунке представлены лучи, попадающие в оптическую систему под углом 5 градусов.

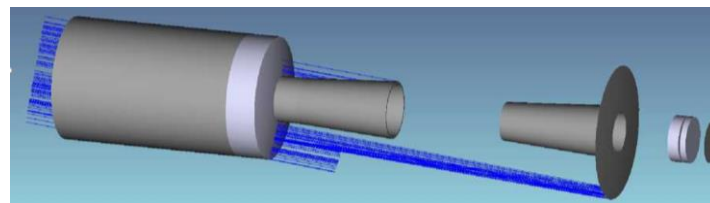


Рисунок 9. Блокировка паразитного излучения блендами
Примечание – составлено авторами на основе моделирования в программной среде Zemax OpticStudio

Благодаря компактной архитектуре, симметричному расположению элементов и применению диэлектрических покрытий, удалось значительно снизить уровень паразитного излучения.

Таким образом, конструктивные различия между системами существенно влияют на эффективность методов минимизации паразитного излучения, что требует индивидуального подхода к проектированию защитных элементов в зависимости от конкретной оптической конфигурации.

Проведенные исследования показали, что минимизация паразитного излучения в катадиооптических оптических системах спутников ДЗЗ возможна за счет комплексного применения методов обратной трассировки лучей, оптимизации конструктивных элементов, а также использования современных диэлектрических и светопоглощающих покрытий. Для оптической системы BDLI уровень паразитного излучения составил менее 2 %, что подтвердило высокую эффективность использования перегородок и внутренних черных покрытий.

Метод обратной трассировки лучей, примененный в ходе моделирования, подтвердил свою эффективность в идентификации нежелательных траекторий распространения света. Такая методика позволила выявить как прямые пути попадания света на детектор, так и многократные внутренние отражения, приводящие к паразитной засветке.

Несмотря на достигнутые результаты, следует учитывать ограничения исследования. В частности, моделирование проводилось при ограниченном числе углов падения. Кроме того, влияние деградации светопоглощающих покрытий под воздействием факторов космической среды требует дополнительной экспериментальной проверки.

Практическая значимость выполненного исследования заключается в возможности применения разработанных конструктивных решений и методик трассировки лучей для проектирования других компактных спутниковых телескопов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования выполнены разработка, моделирование и анализ эффективности конструктивных и оптических решений, направленных на снижение паразитного излучения в катадиоптрических оптических системах спутников ДЗЗ. В качестве объекта моделирования рассмотрена компактная оптическая система BDLI на базе оптической схемы Максутова, для которой реализованы меры экранирования, масок и светопоглощающих покрытий.

Полученные результаты моделирования подтвердили высокую эффективность предложенных мер по снижению паразитного излучения в компактной катадиоптрической оптической системе BDLI. Применение комплекса защитных решений, включающего системы бленд (две внутренние, одна внешняя), а также светопоглощающих покрытий, позволило снизить уровень паразитного света до 1,9 % на краю поля зрения и 0,15 % на оптической оси, что ниже исходных значений 2,1 % и 0,2 % соответственно. Это доказывает, что даже в условиях ограниченного внутреннего объема, характерного для малых космических аппаратов, возможно эффективное подавление рассеянного света без ухудшения оптических параметров, таких как модуляционная передача и коэффициент пропускания.

Сравнительный анализ подтверждает, что увеличение числа отражающих поверхностей и удлинение оптического пути требует дополнительных мер по минимизации рассеянного света. Это подчеркивает необходимость индивидуального проектирования экранирующих элементов с учетом конфигурации каждой оптической системы.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются внедрение сверхчерных покрытий нового поколения, совершенствование методов трассировки лучей с учетом микроскопической шероховатости поверхностей, а также экспериментальная верификация разработанных моделей в условиях, максимально приближенных к реальной космической среде.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR27198365 «Разработка оптикоэлектронной системы в коротковолновой инфракрасной области спектра в контексте развития космических систем ДЗЗ Казахстана»).

Данное исследование финансировалось Аэрокосмическим комитетом Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан (BR21982462 «Разработка и тестирование малого спутника на основе отечественных технологий»).

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: В подготовке данной рукописи инструменты искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zhu, Y., Wu, G., Yang, Z., & Wang, Z. (2015). Internal and external stray radiation suppression for LWIR catadioptric telescope using non-sequential ray tracing. *Infrared Physics & Technology*, 70, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2015.01.003>
- Hong, D. K., Lee, S. H., Park, H. J., & Nam, S. H. (2025). Enhancing the efficiency of stray-light analysis using corner-departure backward ray-tracing. *Current Optics and Photonics*, 9(1), 35–41. <https://doi.org/10.5207/COPP.2025.9.1.035>
- Yeon, H. N., Kim, S. K., & Park, J. H. (2025). Optimized baffle design for suppression of internal and external stray light in LWIR catadioptric payload. *Current Optics and Photonics*, 9(1), 65–71. <https://doi.org/10.5207/COPP.2025.9.1.065>
- Lu, Y., Xu, X., Zhang, N., Lv, Y., & Xu, L. (2024). Study on stray light testing and suppression techniques for large-field of view multispectral space optical systems. *IEEE Access*, 12, 33938–33948.
- Fu, Q., Yan, L., Tan, S., Liu, Y., & Wang, L. (2024). Lightweight and high-stiffness metal optical systems based on additive manufacturing. *Micromachines*, 15(1).
- Zou, Y., Zhang, L., Zhang, J., & Cui, J. (2022). Synchronous measurement method of a multi-angle scattered light field. *Applied optics*, 61(9), 2275–2283.
- Zeng, X., Lan, J., & Gao, X. (2020). The design of a catadioptric omnidirectional thermal imaging system based on the combination of genetic algorithm and gradient descent. *Optics & Laser Technology*, 122, 105861.
- Li, T., Lai, X., Liao, S., Zhao, X., Xia, Y., & Zhou, J. (2025). A REBPNet-based IR radiometric calibration method considering ambient temperature change. *Infrared Physics & Technology*, 145, 105715.
- Han, P., Guo, J., Bao, Q., Qin, T., Ren, G., & Liu, Y. (2021). Optical design and stray light control for a space-based laser space debris removal mission. *Applied optics*, 60(25), 7721–7730.
- Chunlei, S., & Xiaoping, L. (2019). Stray light analysis of catadioptric long-wavelength infrared optical system. *Procedia Computer Science*, 147, 203–209.
- Xing, Y., Peng, J., Wang, S., & Li, L. (2019, December). A passive optical athermalization design of MWIR catadioptric space remote sensor with high resolution in geosynchronous orbit. In *AOPC 2019: Space Optics, Telescopes, and Instrumentation* (Vol. 11341, pp. 494–499). SPIE

**Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors**

Жумажанов Берик Рахымбекович – «Ghalam» ЖШС, пайдалы жүктеме және ғылыми әзірлемелер бөлімінің басшысы, Астана, Қазақстан

Жумажанов Берик Рахымбекович – руководитель отдела полезной нагрузки и научных разработок, ТОО «Ghalam», Астана, Казахстан

Zhumazhanov Berik – Head of the Payload and R&D Department, «Ghalam» LLP, Astana, Kazakhstan

e-mail: b.zhumazhanov@ghalam.kz,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5926-9619>,



Кулакаева Айгуль Ергалиевна – «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан.

Кулакаева Айгуль Ергалиевна – ассоциированный профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан.

Kulakayeva Aigul – Associate Professor of the «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications» department, International Information University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>,



Жетписбаева Айнур Турсынкановна – «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті. «Ghalam» ЖШС, пайдалы жүктеме және ғылыми эзирлемелер бөлімінің ғылыми қызметкері, Астана қ., Қазақстан

Жетписбаева Айнур Турсынкановна – ассоциированный профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева. Научный сотрудник отдела полезной нагрузки и научных разработок, ТОО «Ghalam», г. Астана, Казахстан

Zhetpisbayeva Ainur – Associate Professor of the «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications» department, L.N. Gumilyov Eurasian National University. Researcher of the Payload and R&D Department, «Ghalam» LLP, Astana, Kazakhstan

e-mail: zhetpisbayeva_at_1@enu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4525-5299>



Жумажанов Бексултан Серикович – «Ghalam» ЖШС, Пайдалы жүктеме және ғылыми эзирлемелер бөлімінің Инженер-конструкторы, Астана қ., Қазақстан

Жумажанов Бексултан Серикович – инженер-конструктор отдела полезной нагрузки и научных разработок, ТОО «Ghalam», г. Астана, Казахстан

Zhumazhanov Beksultan – Design Engineer of the Payload and R&D Department, «Ghalam» LLP, Astana, Kazakhstan

e-mail: zhumazhanov.b@ghalam.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9493-7491>

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_11

XFTAP 55.22.19

ТОЗУҒА ТӨЗІМДІ ТАБЫНДАРДЫ БАЛҚЫТЫП ҚАПТАУ ӘДІСІМЕН АЙНАЛМАЛЫ ТАУ-КЕН-ШАХТА ПЫШАҚТАРЫНЫҢ РЕСУРСЫН АРТТЫРУ

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РОТАЦИОННЫХ ГОРНО-ШАХТНЫХ НОЖЕЙ МЕТОДОМ НАПЛАВКИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

INCREASING THE SERVICE LIFE OF ROTARY MINING KNIVES BY MEANS OF SURFACING AND WEAR-RESISTANT COATINGS

М.Т. Капкенова ¹, С.Д. Капаева ¹, Р. Ғабдысалық ^{1*},
Jacek Cieślak ², Ж.А. Бекмырза ³

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

²AGH Станислав Сташиц атындағы ғылым және технология университеті, Краков, Польша

³Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай облыстық университеті, Қостанай қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Риза Ғабдысалық, e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru

Түйінді сөздер:

айналмалы пышақтар;
тау-кен жабдықтары;
тозуға төзімділік;
балқыту; EnDOtec;
карбидті жабындар;
машина жасау

ТҮЙІНДЕМЕ

Тау-кен өнеркәсібінде кескіш құралдың беріктігін қамтамасыз ету пайдалану жағдайында абразивті және соққы тозуының агрессивті әсеріне байланысты негізгі инженерлік проблема болып табылады. Бұл зерттеу жұмыс бетінде механикаландырылған балқыту технологиясы бойынша қатайтатын жабындар жасау арқылы тау-кен жабдығының айналмалы пышақтарының пайдалану сенімділігін арттыруға арналған. Негізгі материалдың тозу кинетикасын талдау негізінде EnDOtec оңтайлы легирленген ұнтақ сымдарын таңдау жүргізілді (болат 45). AGH (Польша) Ғылым және технология университетінің сандық бағдарламалық басқаруы (СББ) бар үш координатты станок кешенінде іске асырылған жоғары дәлдіктегі балқыту әдістемесі әзірленді. Микроқаттылықты металлографиялық зерттеу және өлшеу кешені (МЕТОАЛАБ 502) абразияға төзімділік үшін өте маңызды ультра жоғары қаттылық фазаларының (1705 HV_{0,1}дейін) түзілуін растады. Балқытудың белгіленген технологиялық параметрлері сұйыту коэффициентін және термиялық әсер ету аймағының мөлшерін едәуір төмендетуге мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер әзірленген технологияны Қазақстан Республикасының өнеркәсіптік практикасына имплементациялаудың орындылығын растайды.

Ключевые слова:

ротационные ножи;
горно-шахтное
оборудование;
износостойкость;
наплавка; EnDOtec;

АННОТАЦИЯ

Обеспечение долговечности режущего инструмента в горнодобывающей отрасли представляет собой ключевую инженерную проблему, что обусловлено агрессивным воздействием абразивного и ударного износа в условиях эксплуатации. Данное исследование посвящено повышению эксплуатационной надежности ротацион-



карбидные покрытия;
машиностроение.

ных ножей горно-шахтного оборудования путем создания на их рабочей поверхности упрочняющих покрытий по технологии механизированной наплавки. Проведен выбор оптимальных легированных порошковых проволок EnDOtec на основе анализа кинетики изнашивания основного материала (сталь 45). Разработана методика высокоточной наплавки, реализованная на трехкоординатном станочном комплексе с числовым программным управлением (ЧПУ) Университета науки и технологии AGH (Польша). Комплекс металлографических исследований и замеров микротвердости (МЕТОАЛАБ 502) подтвердил образование фаз ультравысокой твердости (до 1705 $HV_{0.1}$), критичных для сопротивления абразии. Установленные технологические параметры наплавки позволили существенно снизить коэффициент разбавления и размеры зоны термического влияния. Полученные результаты подтверждают целесообразность имплементации разработанной технологии в промышленную практику Республики Казахстан.

keywords:

rotary cutting tools; mining equipment; wear resistance; hardfacing; EnDOtec; carbide coatings; mechanical engineering.

ABSTRACT

Enhancing the service life of cutting tools in the mining industry presents a pivotal engineering challenge, driven by the aggressive effects of abrasive and impact wear encountered during operation. This study focuses on improving the operational reliability of rotary mining-machine cutting tools by applying hardening coatings using mechanized hardfacing technology. The optimal alloyed cored wires (EnDOtec series) were selected based on an analysis of the wear kinetics of the base material (Steel 45). A high-precision hardfacing methodology was developed and implemented on a three-axis Computer Numerical Control (CNC) machine at the AGH University of Science and Technology (Poland). Comprehensive metallographic examinations and microhardness measurements (METOALAB 502) confirmed the formation of ultra-high hardness phases (up to 1705 $HV_{0.1}$), critical for high abrasion resistance. The established hardfacing parameters allowed for a significant reduction in the dilution coefficient and the size of the heat-affected zone. The results support the feasibility of implementing this developed technology within the industrial practice of the Republic of Kazakhstan.

КІРІСПЕ

Жұмыс құралдарының жедел және қарқынды тозуы тау-кен өндіру өнеркәсібіндегі өнімділіктің өсуін тежейтін негізгі факторлардың бірі болып табылады. Мұндай құбылыс, өз кезегінде, өндірістік процестердің тиімділігін төмендетіп, операциялық шығындардың едәуір артуына әкеледі. Тазалау және өтпе жұмыстарында кеңінен қолданылатын ротациялық кескіштер (пышақтар) аса күрделі пайдалану жағдайларында жұмыс істейді. Бұл жағдайлар жоғары дәрежелі абразивтік тозу, айтарлықтай динамикалық соққы әсерлері және температуралық циклдердің ауытқулары сияқты факторлардың үйлесуімен сипатталады (Kotelnikov, 2021). Нәтижесінде кесу жиегінің геометриялық пішінінің жылдам бұзылуы орын алып, жабдықтың апаттық тоқтап қалуына, қымбат тұратын құрамдас бөлшектерді жиі ауыстыру қажеттілігіне алып келеді. Мұның бәрі өндірістік кешеннің техникалық дайындығының жалпы коэффициентін төмендетіп, жүйенің сенімділігі мен экономикалық тиімділігіне кері әсерін тигізеді.

Тозуға төзімді жабындарды балқытып қаптау әдісі арқылы жағу – тозатын бөлшектердің қызмет ету мерзімін арттырудың ғылыми тұрғыдан дәлелденген және экономикалық тұрғыдан тиімді шешімі болып табылады (Sagyndikov et al., 2023). Балқытып қаптау технологиясы тек бөлшектің бастапқы геометриялық пішінін қалпына

келтірумен шектелмей, сонымен қатар жұмыс бетінде негізгі материалдың қасиеттерінен едәуір жоғары трибологиялық сипаттамалары бар қабатты мақсатты түрде қалыптастыруға мүмкіндік береді. Қазақстанның тау-кен өндіру кешенінде мұндай технологиялық тәсілді енгізу саланың жалпы тиімділігін арттыру және өндірістік процестердің сенімділігін қамтамасыз ету тұрғысынан аса маңызды болып табылады (Aubakirov et al., 2023).

Зерттеудің мақсаты: Тозуға төзімді жабындарды балқытып қаптау әдісін қолдану арқылы тау-кен машиналарының ротациялық пышақтарының жұмыс тұрақтылығын қамтамасыз ету.

Қойылған мақсатқа жету үшін төмендегі міндеттер қойылып, шешілді:

- Конструкциялық болаттан жасалған ротациялық тау-кен пышақтарының абразивтік және соққылы тозу механизмдерін жүйелеу және талдау.

- Екіншілік карбидтік фазалардың жоғары концентрациясы бар құрылым қалыптастыруға қабілетті легіріленген балқытып қаптауға арналған материалдарды ғылыми негізде таңдау.

- СББ-жабдықтарын қолдана отырып, жоғары дәлдікті механикаландырылған балқытып қаптау технологиялық режимдерін әзірлеу және оларды сынақтан өткізу.

- Балқытып қаптау арқылы алынған қабаттың механикалық қасиеттері мен микроқұрылымына кешенді талдау жүргізу, соның ішінде микроқаттылық өлшеу.

- Тау-кен өндіру кешені жағдайында құралдың қызмет ету мерзімін ұлғайту және пайдалану шығындарын төмендету тұрғысынан әзірленген технологияны енгізу әлеуетін бағалау.

Тау-кен өнеркәсібінде қолданылатын құралдардың қарқынды тозуы мәселесі отандық және халықаралық ғылыми қауымдастықтардың тұрақты назарында болып келеді. Негізгі іргелі еңбектер тау жынысы массивімен өзара әрекеттесу кезінде кескіш элементтердің деградациясының басты механизмі абразивтік қажалу екенін анықтаған (Pawlik et al., 2022). Алайда, пайдалану барысындағы циклдік жүктемелердің әсерінен туындайтын шаршау және соққылы әсерлер де бұзылу үдерісінде елеулі рөл атқарады.

Тозуға төзімділікті арттыруға бағытталған әдістер, соның ішінде әртүрлі термиялық өңдеу түрлері мен қорғаныш жабындарын жағу технологиялары, қазіргі таңда белсенді ғылыми зерттеулер нысаны болып табылады. Атап айтқанда, электрофалық балқытып қаптау машиналардың, ірі және массивті бөлшектерін нығайтудың ең әмбебап әрі экономикалық тұрғыдан тиімді әдістерінің бірі ретінде қарастырылады. Темір, хром және молибден негізіндегі легіріленген қоспа материалдарды қолдану композиттік микроқұрылым алуға мүмкіндік береді. Мұндай құрылымда жоғары қаттылық Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$ және NbC сияқты бастапқы және екіншілік карбидтік фазалардың түзілуі есебінен қамтамасыз етіледі (Mrowiec et al., 2023).

Балқытып қаптау технологиясының заманауи даму бағыттары СББ жүйелерімен басқарылатын механикаландырылған, соның ішінде роботтандырылған кешендерді интеграциялауды көздейді (Bisenov et al., 2024). Бұл тәсіл балқытып қаптау білігінің қалыптасуында жоғары дәлдікке қол жеткізуге, жылулық әсердің болжамдылығын қамтамасыз етуге және негізгі материалдың балқытылған қабатқа өту үлесінің төмен болуына (сұйылу коэффициентінің төмендігіне) мүмкіндік береді. Сұйылу деңгейінің төмен сақталуы жабынның бастапқыда берілген беріктік сипаттамалары мен химиялық тепе-теңдігін сақтау үшін шешуші мәнге ие. Бірқатар зерттеулерде сұйылу көрсеткішінің 10–15 % шектік мәнінен асуы легірлеуші, карбид түзуші компоненттердің құрамының күрт азаюына әкелетіні дәлелденген. Мұндай құбылыс қарқынды абразивтік тозу жағдайында жабынның тиімділігін төмендетеді.

Өзекшесі толтырылған ұнтақты сымдарды (FCAW) жол-құрылыс және тау-кен техникасы бөлшектерінің қаттылығын арттыру үшін қолдану тәжірибесі ғылыми

әдебиеттерде кеңінен сипатталған, бұл аталған әдістің жоғары нәтижелілігін растайды (Nazarbaev et al., 2023). Жарияланған деректерге жасалған шолу негізгі технологиялық параметрлер (беру жылдамдығы, ток күші, кернеу) мен соңғы балқытылған қабаттың морфологиясы, сондай-ақ қатты фазалардың таралу сипаты арасындағы тәуелділікті тереңірек зерттеудің маңыздылығын көрсетеді. Осыған байланысты, дәл ротациялық пышақтарды жоғары дәлдікпен балқытып қаптауға бағытталған бұл ғылыми-зерттеу жұмысы әлемдік заманауи технологиялық сын-қатерлер жүйесіне толық сәйкес келеді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу нысаны: ротациялық тау-кен пышақтарының тозуға төзімділігін арттыру әдісі. Зерттеу пәні: технологиялық режимдер мен тозуға төзімді балқытып қапталған жабындардың химиялық құрамының пышақтардың жұмыс бетінің құрылымдық-фазалық күйіне және трибологиялық қасиеттеріне әсері.

Ротациялық пышақтарды дайындау үшін негізгі материал ретінде 45 маркалы конструкциялық көміртекті болат қолданылды. Тозуға төзімді жабындарды жағу үшін абразивтік тозу жағдайында балқытып қаптауға арналған Castolin Eutectic компаниясы өндіретін ұнтақты сымдар (FCAW) пайдаланылды: EnDOtec DO*351, EnDOtec DO*332 и EnDOtec DO*11.

Эксперименттік үлгілер мен пышақтардың кесу қырларын балқытып қаптау жұмыстары Краков қаласындағы (Польша) AGH Ғылым және технология университетінде Ян Павлик (Jan Pavlik) әзірлеп, құрастырған сандық бағдарламалық басқаруы (СББ) бар түпнұсқалық роботтандырылған үшқординаталы станоктық кешенде жүзеге асырылды (1-сурет).

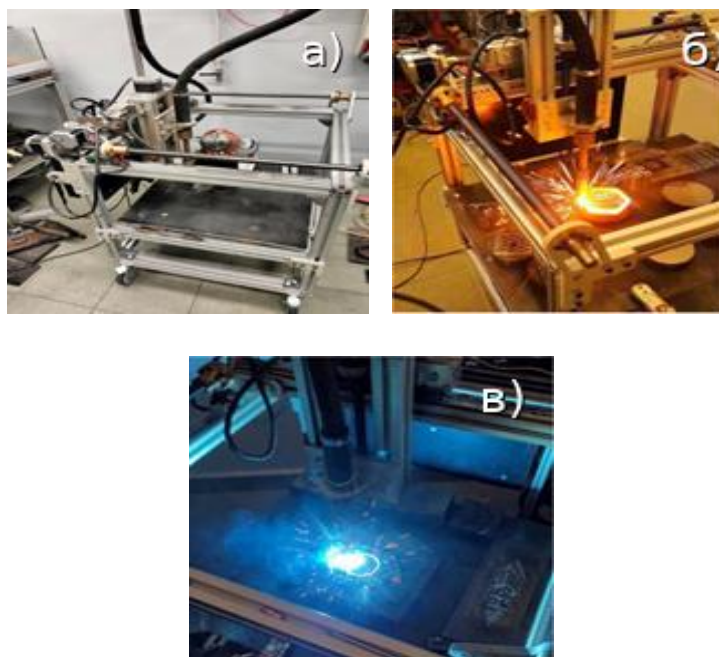


1-сурет. AGH (Польша) Ғылым және технология университетіндегі тау жынысын бұзу процесін модельдейтін ротациялық орындаушы орган:

а) жалпы көрініс; б) тау-кен пышақтары

Ескерту – автор (Капкенова, 2025) негізінде құрастырған

Балқытып қаптау процесі Ян Павлик жобалап, жасап шығарған, АГН Ғылым және технология университетінде 2-суретте орналасқан СББ бар бірегей станокты пайдалану арқылы жүзеге асырылды (Pawlik et al., 2022).



2-сурет. АГН Ғылым және технология университеті (Польша) орналасқан, Ян Павлик жобалап жасаған СББ бар балқытып қаптауға арналған жабдық және балқытып қалыптау процесі кезіндегі а – жалпы көрінісі; б – қаптау процесі; в – жұмыс аймағы
Ескерту – автор (Капкенова, 2025) негізінде құрастырған

Бұл жабдықты қолдану балқытып қаптау сымның берілуін және GMAW дәнекерлеу жанарғысының қозғалу жылдамдығын прецизионды түрде бақылауға мүмкіндік берді. Қосымша төртінші айналу осімен жабдықталған үш осьті станоктың жұмыс аймағы 320×300×170 мм құрайды және балқытып қаптау басының қозғалу жылдамдығын 0,1-ден 200 мм/с дейінгі диапазонда реттеуді қамтамасыз етеді. Қондырғының CAD-моделі мен балқыту процесі кезіндегі жабдықтың фотосуреті жоғарыда келтірілген.

Кескіш басына ротациялық пышақтар орнатылған, олар нағыз эксплуатациялық жүктемелерді имитациялайтын жағдайларда тексеріледі. Бұл материалдардың тозуға төзімділігін және қорғаныштық балқытып қапталған қабаттардың тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

Саңдық бағдарламалық басқаруы бар станокты қолдану жоғары дәлдікті балқытып қаптау әдістемесін іске асыруға мүмкіндік берді. Бұл әдіс технологиялық параметрлерді қатаң бақылауды қамтамасыз етті: сым беру жылдамдығын, жанарғының орын ауыстыру жылдамдығын (V_h), электрлік режим параметрлерін (I , U), сондай-ақ қабатаралық температураны.

Нәтижелерді жан-жақты бағалау үшін келесі әдістер кешені қолданылды:

Микроқаттылықты өлшеу.

Үлгілердің микроқаттылығы МЕТОАЛАБ 502 микроқаттылық өлшегішінде инденторға түсірілетін жүктеме $P = 100$ г (0,98 Н) және ұстап тұру уақыты 10 с кезінде өлшенді. H_m микроқаттылығы ГОСТ 9450–60 (GOST 9450–60, 1960) стандартына сәйкес төмендегі (1) формула бойынша анықталды:

$$H_m = 1,854 \times \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

мұндағы P – инденторға түсірілетін жүктеме (кгс), d – із таңбасының диагоналінің орташа ұзындығы (мм).

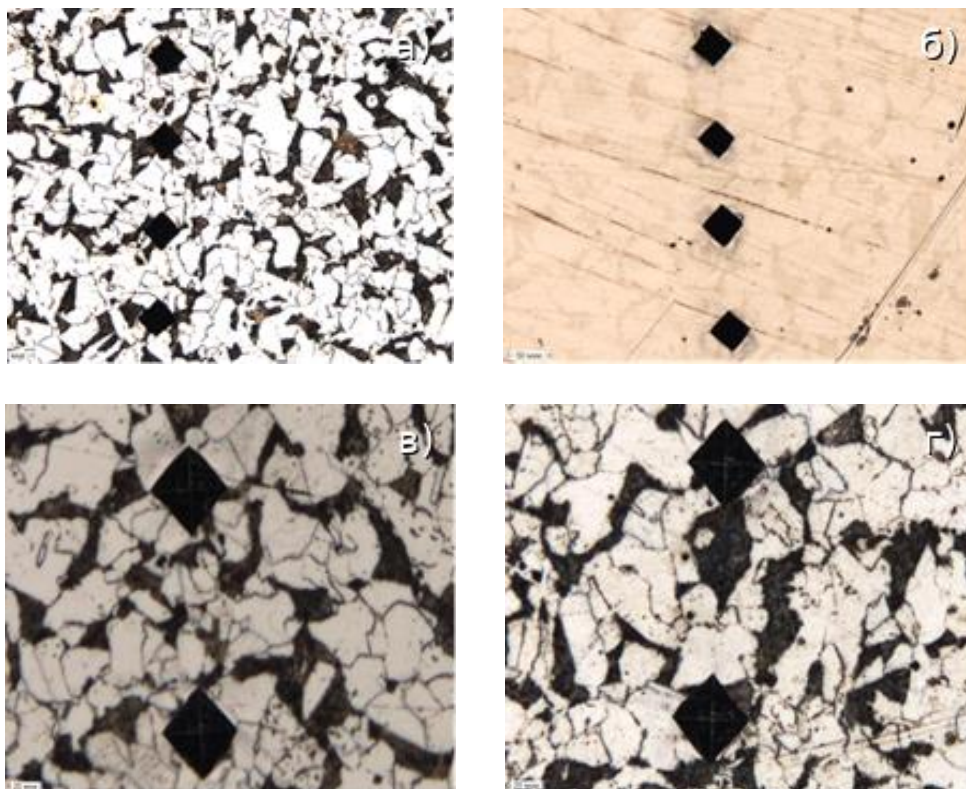
Іздер әрбір 100 мкм сайын қойылды. Статистикалық сенімділікті қамтамасыз ету үшін 5 өлшеу бойынша орташа мәндер анықталды, салыстырмалы қателік 3%-дан аспады. Металлографиялық талдау.

Оптикалық микроскоптарды қолдану арқылы балқытып қапталған қабаттың микроқұрылымы және жылулық әсер аймағы (ЖӘА) зерттелді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Металлографиялық талдау көрсеткендей, DO*351 сымымен балқытып қаптау арқылы жасалған қабат жоғары легіріленген эвтектикалық құрылымды құрайды, ол аустенит-мартенсит матрицасынан және Cr_7C_3 типтес бастапқы хром карбидтерінен тұрады (Smagulov & Abilov, 2024; Badisch & Kirchgassner, 2023).

3-суреттерде негізгі металлдың (45 маркалы болат) микроқұрылымы әртүрлі өлшеу нүктелерінде көрсетілген.



3-сурет. Бастапқы күйдегі негізгі металлдың (45 маркалы болат) микроқұрылымы:

а – Үлгі – пышақтың сол жағы (негізгі металл) $\times 50$; б – Үлгі – пышақтың оң жағы (негізгі металл) $\times 50$; в – Үлгі – пышақтың ортасы (негізгі металл) $\times 20$;

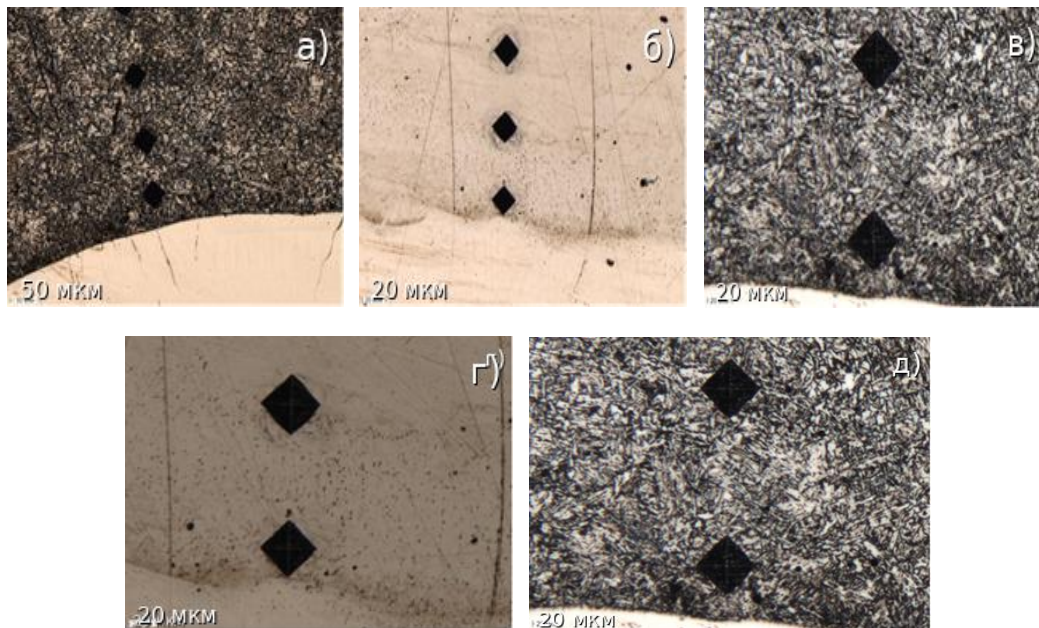
г – Үлгі – пышақтың сол жағы (негізгі металл) $\times 20$

Ескерту – автор (Капкенова, 2025) негізінде құрастырған

Бұл микроқұрылымда феррит-перлиттік фазалардың арақатынасы мен дән шекараларының айқын көрінетіні байқалады. Үлкейту дәрежесінің артуымен түйір өлшемдерінің әркелкілігі және жекелеген аймақтарда құрылымдық гетерогенділік

анықталды. Сонымен қатар, кейбір учаскелерде дисперстік қосындылар мен микрожарықшақ іздері байқалады, бұл материалдың бастапқы күйдегі ішкі кернеулерімен байланысты болуы мүмкін. Жалпы алғанда, алынған металлографиялық нәтижелер негізгі металдың құрылымы біртекті емес екенін және оның механикалық қасиеттеріне әсер ететін микродеңгейдегі айырмашылықтардың бар екенін көрсетеді.

4-суретте жылулық әсер аймағы (ЖӘА) мен ерген аймақтың микроқұрылымы көрсетілген. Бұл негізгі металға балқытып қаптау кезінде болатын жылулық циклдің әсерін бағалау үшін аса маңызды.



4-сурет. Балқытып қапталған қабаттың (EnDOtec) және 45 маркалы болатпен шекаралас жатқан жылулық әсер аймағының (ЖӘА) микроқұрылымы: а – Үлгі – пышақтың сол жағы (еріген аймақ) $\times 50$; б – Үлгі – пышақтың оң жағы (еріген аймақ) $\times 20$; в – Үлгі – ортасы (еріген аймақ) $\times 20$; г – Үлгі – пышақтың оң жағы (ерген аймақ) $\times 20$; д – Үлгі – ортасы (еріген аймақ), $\times 20$
Ескерту – автор (Капкенова, 2025) негізінде құрастырған

Технологиялық режимдерді оңтайландыру және микроқұрылымдық талдау. Жұмыс барысында әрбір сым маркасы үшін оптималды балқытып қаптау режимдері 1-кестеде анықталды. Бұл режимдер балқытып қапталған қабатты минималды сұйылумен (8–10 % дан аспайтын) қалыптастыруға және жарықтардың болмауын қамтамасыз етті.

1-кесте. Балқытып қаптау үшін оптималды технологиялық параметрлер

Балқытып қаптау материалы	Ток, I (A)	Кернеу, U (B)	Балқытып қаптау жылдамдығы (V_h , мм/с)	Сұйылу коэффициенті (%)
EnDOtec DO*351	180-200	25-27	1,8	~ 8
EnDOtec DO*332	160-180	24-26	2,0	~ 9
EnDOtec DO*11	150-170	23-25	2,5	~ 10

Ескерту – Автордың деректері негізінде жасалған (Капкенова М.Т. 2023)

Балқытып қапталған қабаттың микроқаттылығын талдау. Балқытып қапталған металдың микроқаттылығын өлшеу нәтижелері 2-кестеде көрсетілген.

2-кесте. Балқытып қапталған үлгілердің микроқаттылығын өлшеу нәтижелері ($HV_{0.1}$)

Үлгі	Балқытып қаптау материалы	Матрицаның (тігілетін аймақ маңындағы) микроқаттылығы $HV_{0.1}$	Балқытып қапталған қабаттың микроқаттылығы $HV_{0.1}$	Түсініктеме
№ 1	EnDOfec DO*11	320.7	671.4	Балқытып қапталған металдың орташа қаттылығы
№ 2	EnDOfec DO*332	310.2	625.7	Балқытып қапталған металдың орташа қаттылығы
№ 3	EnDOfec DO*351	248.0	1705.0	Қатты карбидтік фазадағы өлшеу ($C_{17}C_3$)
№ 3 (Матрица)	EnDOfec DO*351	-	445.0	Жұмсақ эвтектикалық матрицадағы өлшеу

Ескерту – Автордың деректері негізінде жасалған (Каткенова М.Т. 2023)

Алынған мәліметтер 2-кестеде көрсеткендей, максималды қаттылық мәні 1705 $HV_{0.1}$ үлгі №3 (DO*351) бойынша тіркелген және бұл мән бастапқы карбидтік фазалардың қаттылығына сәйкес келеді, олар абразивтік тозуға жоғары қарсылық көрсетеді. Қоршаған матрицаның қаттылығы (445 $HV_{0.1}$) соққылы жүктемелерге қарсы тұру үшін қажетті иілгіштікті сақтайды. Үлгілердің орташа қаттылық мәндері: №1 үлгі – (671,4 $HV_{0.1}$) және №2 үлгі (625,7 $HV_{0.1}$). Бұл көрсеткіштер негізгі металлдың (45 маркалы болат $\approx 200 HV_{0.1}$) қаттылығынан үш есе және одан да жоғары екендігін білдіреді.

Негізгі металл мен ЖӘА қаттылығын бағалау. Балқытып қаптау кезінде жылулық циклдің негізгі металлға (45 маркалы болат) әсерін бағалау үшін жылулық әсер аймағында (ЖӘА) және алыстағы учаскелерде микроқаттылық өлшеулері жүргізілді (Seitkaziev & Nurbosynov, 2024)

Микроқаттылықты зерттеу нәтижелері, әсіресе қатты фазаларда экстремалды жоғары мәндердің тіркелуі 2-кестеде, композициялық тозуға төзімді жабынның сәтті қалыптасқанын дәлелдейді. Мұндай құрылымдық механизмде қатты карбидтер абразивтік тозуға төтеп берсе, пластикалық матрица соққылы жүктемелерге қарсы тұрады, бұл тау-кен пышақтарының эксплуатация жағдайлары үшін ең тиімді болып табылады (Zimakov, 2021; Mrowiec et al., 2023).

3-кесте. Негізгі металлдың (45 маркалы болат) және ЖӘА-ның $HV_{0.2}$ микроқаттылығын өлшеу нәтижелері

Өлшеу аймағы	Бастапқы материал	Орташа қаттылық $HV_{0.2}$	Стандарттық ауытқу	Түсініктеме
Негізгі металл (сол жақ)	Болат 45	185	4,8	Балқытып қаптау аймағынан алыс
Ерген аймақ/ЖӘА (сол жақ)	Болат 45 + Балқытып қаптау	228	18,0	Жылулық әсер аймағы
Негізгі металл (ортасы)	Болат 45	178	12,5	Балқытып қаптау аймағынан алыс
Ерген аймақ/ЖӘА (ортасы)	Болат 45 + Балқытып қаптау	212	1,0	Жылулық әсер аймағы
Негізгі металл (оң жақ)	Болат 45	170	5,5	Балқытып қаптау аймағынан алыс
Ерген аймақ/ЖӘА (оң жақ)	Болат 45 + Балқытып қаптау	209	8,8	Жылулық әсер аймағы

Ескерту – Автордың деректері негізінде жасалған (Каткенова М.Т. 2023)

Негізгі металлдың (Болат 45) қаттылығы 170–185 $HV_{0.2}$ диапазонында орналасқан, бұл оның бастапқы күйіне сәйкес келеді. Жылулық әсер аймағында (ЖӨА) локалды қаттылық 209–228 $HV_{0.2}$ дейін артады, бұл бақылаулы салқындату циклы нәтижесінде жұқа дисперсті фазалардың түзілуінен туындайтын құрылымдық өзгерістермен түсіндіріледі. Бұл қаттылықтың орташа жоғарылауы жылулық әсерді тиімді минимизациялағанын көрсетеді, бұл пышақтың жалпы беріктігін сақтау үшін маңызды.

ЖӨА талдауы 3-кестеде және микрофотосуреттер 2-суретте көрсеткендей, СББ-жабдықтарын қолдана отырып әзірленген технологиялық режимдер жылулық әсер аймағын минималды деңгейде қамтамасыз етті. ЖӨА-дағы қаттылықтың орташа жоғарылауы (228 $HV_{0.2}$ дейін) қатты қатайтудың немесе металлдың қызып кетуінен туындайтын қаттылықтың күрт төмендеуі белгілері болмай, процестің жылулық балансын сәтті бақылауды көрсетеді. Бұл ротациялық пышақтың негізгі бөлігінің жалпы беріктігі мен иілгіштігін сақтау үшін аса маңызды (Fernández & García, 2018).

Алынған нәтижелер бойынша, құралдың қызмет ету мерзімінің болжамды ұзаруы 80 %-ға дейін тау-кен өндірісінде экономикалық тиімділікті арттырып, Қазақстан жағдайында өндіру тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік береді (Kabdrakhmanov et al., 2023).

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу механикаландырылған балқытып қаптау әдісі арқылы ротациялық тау-кен пышақтарының қызмет ету мерзімін елеулі түрде ұлғайту мүмкіндігі туралы ғылыми гипотезаны растады.

Негізгі қорытындылар:

- EnD0тес дәнекерлеу сымдарын таңдау негізді, себебі олар жоғары қаттылықтағы карбидтік қабаттарды қалыптастырады, бұл абразивтік тозуға тиімді қарсы тұруды қамтамасыз етеді.
- Үшкоординаталы СББ жабдығын қолдану балқытып қаптаудың жоғары дәлдігін қамтамасыз етті, сұйылу коэффициентін 10%-дан аспайтын деңгейде сақтауға мүмкіндік берді және негізгі металлға теріс жылулық әсерді минимизациялады.
- Микроқаттылық өлшеулері ультрақатты фазалардың (1705 $HV_{0.1}$ дейін) түзілуін растады, бұл негізгі металлмен (Болат 45) салыстырғанда тозуға төзімділіктің айтарлықтай өсуіне әкелді. Жылулық әсер аймағындағы қаттылық (209–228 $HV_{0.2}$) пышақтың эксплуатациялық сипаттамаларын сақтауға мүмкіндік береді.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ. Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің грантымен қаржыландырылды (AP22683698 «Ірі шиберлі ысырмалардың түйісетін бөлшектерінің тығыздағыш беттерінің тозуға төзімділігін арттыру»).

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар эксперименттік жабдық (СББ) және технологиялық операцияларды жүргізуге арналған консультациялық қолдау көрсеткен Ян Павликке (Jan Pavlik) және AGH Ғылым және технология университетіне (Польша) шынайы алғыстарын білдіреді.

ӘДИБЕТТЕР ТІЗІМІ

- Kotelnikov, V. V. (2021). Technology of restoration and strengthening of machine parts: Textbook. Moscow: Infra-M.
- Sagyndikov, Zh.M., Burkitbaev, M.M., & Kaliev, B.S. (2023). Wear mechanisms of mining equipment and methods of their prevention. Vestnik Karagandinskogo Tekhnicheskogo Universiteta (Bulletin of Karaganda Technical University), 2(110), 54–62.

- Aubakirov, Zh.K., Sembaev, N.S., & Nurlanov, E.K. (2023). Prospects for the use of wear-resistant coatings in the mining industry of Kazakhstan. *Vestnik KazNRTU*, 5(145), 67–74.
- Pawlik, J., Ciešlik, J., Bembenek, M., Góral, T., Kapayeva, S., & Kapkenova, M. (2022). On the influence of linear energy/heat input coefficient on hardness and weld bead geometry in chromium-rich stringer GMAW coatings. *Materials*, 15(17), 6019. <https://doi.org/10.3390/ma15176019>
- Bisenov, E. I., Abdrakhmanov, S. T., & Zhunisov, K. K. (2024). Welding technologies for mining equipment. *Kazakhstan Mining Journal*, 3(182), 45–52.
- Nazarbaev, T.A., Kozhakhmetov, E.A., & Ospanov, D.S. (2023). Increasing wear resistance of mining machine parts by welding method. *Vestnik KarTU*, 4(112), 89–97. (In Russian).
- Smagulov, D.U., & Abilov, B. T. (2024). Microstructure of chromium coatings produced by GMAW technology. *Metallurgy and Materials Science*, 1(38), 23–31.
- Seitkaziev, A. Kh., & Nurbosynov, D. N. (2024). Experience in implementing coating technologies at enterprises of the Karaganda region. *Mining of Kazakhstan*, 1(89), 78–85.
- GOST 9450–60. (1960). Metals. Method for measuring microhardness by diamond pyramid indentation. Moscow: Izdatelstvo standartov.
- Kuznetsov, A.S., et al. (2023). New materials for surfacing and their application in the mining industry: Monograph. Ekaterinburg.
- Sidorov, A.R. (2023). Methods of quality control of surfaced coatings. *Control. Diagnostics*, 8, 41–47.
- Zimakov, A. V. (2021). Wear and protection methods of mining equipment. Kemerovo: KuzSTU.
- Mrowiec, L. B., et al. (2023). Influence of dilution on wear resistance of hardfaced coatings in mining applications. *Materials*, 16(3), 1123. <https://doi.org/10.3390/ma16031123>
- Fernández, J., & García, A. (2018). Laser cladding of Ni-based alloys for mining tools. *Materials & Design*, 142, 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.047>
- Badisch, E., & Kirchgaßner, M. (2023). Microstructure and wear resistance of chromium-rich hardfacing alloys. *Surface and Coatings Technology*, 454, 129167. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129167>
- Kabdrakhmanov, E. S., Zhaksylykov, T. B., & Muratov, R. M. (2023). Regularities of carbide phase formation in welded coatings. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Chemistry and Technology*, 4(450), 112–120.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Капкенова Мадина Турлыбековна – 8D07102 - «Машина жасау» ББ докторанты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Капкенова Мадина Турлыбековна – докторант по ОП – 8D07102 «Машиностроение», Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Kapkenova Madina Turlybekovna – doctoral student in the educational program 8D07102 – «Mechanical Engineering», East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: MKapkenova@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5979-8083>



Капаева Саркен Джулгазывна – техникалық ғылымдар кандидаты, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Капаева Саркен Джулгазывна – кандидат технических наук, профессор, Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Kapayeva Sarken Dzhulgazyvna – Candidate of Technical Sciences, Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: sarkenkapayeva@yahoo.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2237-6960>



Ғабдысалық Риза – PhD, қауымдастырылған профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Ғабдысалық Риза – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Gabdysalyk Riza – PhD, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9184-0897>



Jacek Ciešlik – PhD, профессор, AGH Станислав Сташиц атындағы ғылым және технология университеті, Краков, Польша

Jacek Ciešlik – PhD, Горно-металлургическая академия им. Станислава Сташица AGH г. Краков, Польша

Jacek Ciešlik – PhD, Professor, AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland

e-mail: cieslik@agh.edu.pl

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0203-5149>



Бекмырза Жұмаш Айтжанұлы – PhD, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай облыстық университеті, Қостанай, Қазақстан

Бекмырза Жұмаш Айтжанұлы – PhD, Костанайский областной университет имени Ахмета Байтурсынулы, Костанай, Казахстан

Bekmyrza Zhumash Aitghanuly – Akhmet Baitursynov Kostanay Regional University, Kostanay, Kazakhstan

e-mail: 5112431@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5086-4127>

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_12

XFTAP 73.31.21

ҚАЙШЫ КӨТЕРГІШ ПЛАТФОРМАСЫНЫҢ ҚАТТЫЛЫҒЫ МЕН САЛМАҒЫНА ПЕРФОРАЦИЯНЫҢ ӘСЕРІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРФОРАЦИИ НА ЖЕСТКОСТЬ И МАССУ ПЛАТФОРМЫ НОЖНИЧНОГО АВТОПОДЪЕМНИКА

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF PERFORATION ON THE STIFFNESS AND WEIGHT OF A SCISSOR LIFT PLATFORM

О.Н. Костюченкова ¹, С.А. Нуркушева ^{1*}, М. Vembenek ²

¹С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан

²AGH Краков университеті, Краков, Польша

*Жауапты автор: Нуркушева Салтанат Амангелдіқызы, e-mail: saltanat.nurkusheva@kazatu.edu.kz

Түйінді сөздер:

көтергіш, оңтайландыру,
беріктік, қаттылық,
деформация, платформа.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл зерттеу ығысу және артық салмақ мәселелерін шешу үшін қайшы көтергіш платформасын жаңартуға бағытталған. Зерттеудің мақсаты – фланецтері бар оңтайландырылған перфорацияны пайдалану арқылы металл шығынын азайту және құрылымдық қаттылықты арттыру. Әдістемеге ANSYS компьютерлік модельдеу және 200 кг-ға дейін жүктелген Ст45 болат сынақ үлгілерімен далалық тәжірибелер кірді. Деформацияны жоғары дәлдіктегі сенсорларды пайдаланып өлшенген. Негізгі нәтижелер: 200 кг жүктеме кезінде оңтайландырылған перфорацияланған платформа берік платформаға қарағанда 2,46 есе төмен ауытқуды көрсетті, салмақ 8 %-ға төмендеді. Күрделі меншікті қаттылық критерийі 2,66 есеге артты. Тесіктердің диаметрі мен көлбеуіне 25%-ға дейінгі тәуелділік анықталды. Зерттеудің ғылыми құндылығы рационалды перфорация арқылы иілу элементтеріндегі массаны азайту және қаттылықты максимизациялаудың біріктірілген үлгісінде жатыр. Тәжірибелік маңыздылығы: ұсынылған әдістеме өндіріс шығындарын азайту және автомобиль көтергіштерінің сенімділігін арттыру үшін тиімді жобалау шешімдерін жасауға мүмкіндік береді.

Ключевые слова:

автоподъемник,
оптимизация, прочность,
жесткость, деформация,
платформа.

АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено модернизации платформы ножничного подъемника для решения проблем смещения и избыточной массы. Цель работы – снижение металлоемкости и повышение жесткости конструкции за счет применения оптимизированной перфорации с бортами. Методология включала компьютерное моделирование ANSYS и натурные эксперименты с опытными образцами из стали Ст45, нагружаемыми до 200 кг. Деформации измерялись высоко-



© 2026 О.Н. Костюченкова, С.А. Нуркушева, М. Vembenek

Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы (CC BY 4.0) бойынша таратылады.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

точными датчиками. Основные результаты: оптимизированная перфорированная платформа при нагрузке 200 кг показала прогиб в 2,46 раза меньше, чем сплошной аналог, при снижении массы на 8 %. Комплексный критерий удельной жесткости увеличился на 2,66 раза. Установлена зависимость снижения массы от диаметра и шага отверстий до 25 %. Научная ценность работы заключается в выявленной закономерности совместной минимизации массы и максимизации жесткости элементов, работающих на изгиб, посредством рациональной перфорации. Практическая значимость – предложена методика, позволяющая генерировать эффективные конструктивные решения для снижения затрат на изготовление и повышения надежности автоподъемников.

keywords:

car lift, optimization,
strength, stiffness,
deformation, platform.

ABSTRACT

This study focuses on upgrading a scissor lift platform to address issues of displacement and excess weight. The objective of this study is to reduce metal consumption and increase structural rigidity by utilizing optimized perforation with flanges. The methodology included ANSYS computer modeling and field experiments with St45 steel test specimens loaded up to 200 kg. Deformations were measured using high-precision sensors. Key results: the optimized perforated platform, under a 200 kg load, demonstrated deflection 2.46 times lower than its solid counterpart, with an 8% weight reduction. The complex specific stiffness criterion increased by 2.66 times. A dependence of up to 25% on the diameter and pitch of the holes was established. The scientific value of the study lies in the identified pattern of combined mass minimization and stiffness maximization in bending elements through rational perforation. Practical significance: the proposed methodology enables the generation of effective design solutions to reduce manufacturing costs and improve the reliability of car lifts.

КІРІСПЕ

Заманауи көлік көтергіштерін пайдалану жұмыс уақытын қысқартуға, автомобиль компоненттеріне қол жетімділікті жақсартуға және жалпы қауіпсіздікті арттыруға мүмкіндік береді (Nurkusheva S., Bembenek M., Kostyuchenkova O). Көлік көтергіштердің жұмысы Техникалық қызмет көрсету мен жөндеу сапасына айтарлықтай әсер етеді. Сонымен қатар, сенімді көтеру жүйелері жұмысшылардың жарақат алу қаупін азайтуға көмектеседі, өйткені олар қызмет көрсету кезінде автомобильдің тұрақты және қауіпсіз орналасуын қамтамасыз етеді. Алайда, артықшылықтарға қарамастан, көлік көтергіштер жұмыс жағдайында бірқатар белгілі мәселелерге тап болады. Ең жиі кездесетіндердің бірі – қайшы көтергіш платформасының көтерілу кезінде ығысуы, бұл төтенше жағдайларға және көлік құралдарының зақымдалуына әкеледі. Сондай-ақ, гидравликалық жүйелерде құрылғының үлкен өлшемдері мен салмағына байланысты проблемалар жиі кездеседі. Басқа мәселелерге техникалық қызмет көрсетудің жеткіліксіздігінен туындайтын компоненттердің тозуы және басқару жүйесінің дұрыс орнатылмауы жатады. Бұл біркелкі емес көтерілуге әкелуі мүмкін.

Бұл мәселелер осы зерттеуді жүргізу қажеттілігін көрсетеді. Көлік көтергіштердің дизайнында қолданылатын технологияларды зерттеу көтергіштердің өнімділігін жақсартып қана қоймай, сонымен қатар автомобильдердің қауіпсіздігі мен қызмет көрсету сапасын едәуір арттырады.

Зерттеудің мақсаты – металл сыйымдылығын төмендету және қаттылықты арттыру үшін қайшы көтергіштің платформасын жаңарту мен платформаның конструкциясын борттық перфорация әдісімен оңтайландыру.

Зерттеу нысаны: пайдалану жүктемелері жағдайында қайшы көтергіш платформасының жұмыс істеу процесі.

Зерттеу пәні: жүктемелерге байланысты көтергіш платформа құрылымының кернеулі-деформацияланған күйінің өзгеру заңдылықтары.

Соңғы жылдары көтергіш технологиясы, әсіресе оларды жасау үшін қолданылатын материалдарға қатысты айтарлықтай алға жылжыды. Дәстүр бойынша, автокөлік көтергіштері беріктігі үшін негізінен болаттан жасалған. Дегенмен, металл конструкцияларының салмағын жеңілдету үшін балама материалдарды пайдалану үрдісі артып келеді (Taub A. I., Babu S. және Taub A. et al). Осындай баламалардың бірі – көтергіштің жалпы салмағының айтарлықтай төмендеуімен жоғары беріктікті қамтамасыз ететін жеңіл қорытпаларды (алюминий, магний) пайдаланады (Jhaveri K. et al.). Баламалы материалдарға көшу автомобильдерге техникалық қызмет көрсету кәсіпорындарында тиімділікті арттыру және энергия шығынын азайту ниетінен туындады. Жеңіл қорытпалар көтергіштерді маневрлеу мен пайдалануды жеңілдетіп қана қоймайды, сонымен қатар энергия сыйымдылығын төмендетуге ықпал етеді. Сонымен қатар, көтергіш қолданылатын материалдарды талдау кез келген ықтимал зақымдануды немесе тозуды анықтау үшін сенсорларды біріктіру арқылы күрделене түсті (Williams B., Hall A., Myers O. Terfenol-D). Бұл датчиктер профилактикалық қызмет көрсетуде шешуші рөл атқарады, көтергіш компоненттерін уақтылы жөндеуге немесе ауыстыруға мүмкіндік береді, осылайша қауіпсіз және сенімді жұмыс жасайды. Мақалада сәтсіздік түрлерін зерттеу үшін екі деректер жиынтығы қолданылады (Bastidas-Rodriguez M. X. et al.). Бастапқы жиынтықта нақты сынықтар туралы мәліметтер бар, ал екінші жиынтықта сканерлеуші электронды сенсор арқылы алынған суреттер бар. Бұл деректер жиынтығындағы жарықтарды жіктеудің тиімділігі объектілер мен текстураларды талдауға арналған стандартты конволюциялық нейрондық желілерді қолдану арқылы бағаланды. Нәтижесінде озық материалдар мен сенсорлық технологиялардың интеграциясы көтергіштер индустриясында төңкеріс жасап, қауіпсіз, тиімді және экологиялық таза шешімдерге жол ашты.

Көлік көтергіштерінің гидравликалық жүйелерін жетілдіру қызығушылық тудыратын өзекті тақырып болып қала береді. Гидравликалық қайшы көтергіш жүйесі, оның құрамына гидравликалық сорғы кіреді, тегіс және дәл тік қозғалысты қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады. Бұл саладағы жақсартулар өнімділіктің жоғарылауына, техникалық қызмет көрсету шығындарының төмендеуіне және энергия тиімділігінің жоғарылауына әкеледі. Мақалада белгіленген көлемді сорғыларды қолдана отырып, қайшыны көтеретін гидростатикалық жүйелердегі жылдамдықты реттеудің жаңа тәсілі ұсынылған. Олардың зерттеулері қайшы көтергіш операцияларының жылдамдығы мен дәлдігін арттыруға бағытталған. Мақалада қайшы көтергіштің платформаларында қос гидравликалық цилиндрлерді синхронды басқару әдісі анық емес пропорционалды-интегралды-дифференциалды реттелді (Zhang L., Li Y.). Олардың зерттеулері көтеру механизмінің синхрондалуы мен тұрақтылығын жақсартуға, жалпы өнімділік пен қауіпсіздікті арттыруға бағытталған. Жұмыста бірнеше гидравликалық цилиндрлерді қалпына келтірудің және қолданудың балама тәсілдері зерттелді (Gong W., Yu Z. J.).

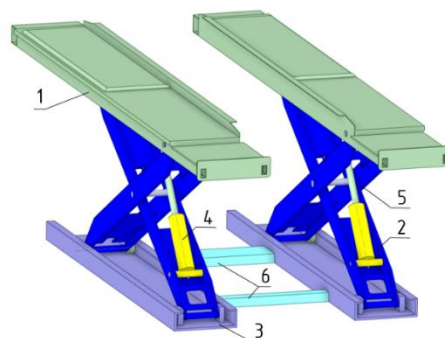
Зерттеу жұмысында гидравликалық жүйелерді ауамен басқаруға арналды (Yan T. P.), ал келесі жұмыста қайшы көтергіштің гидравликалық цилиндрлерін оңтайландыруға бағытталған (Zhang W., Wang X. X., Wang L.). Басқа мақалада қайшы көтергіштің арқылы көрсетілген жүктерді көтеру/түсіру жылдамдығын көлемді реттейтін жаңа жетек жүйесінің эксперименттік зерттеулері талқыланды (Kosucki A. et al.). Ол сондай-ақ қайшы көтергіштің жұмыс жылдамдығына жүктеме өзгерген кезде гидравликалық цилиндр мен платформаның берілген жылдамдығы арасындағы корреляцияны салыстырмалы талдауды қамтиды.

Сонымен қатар, көлік көтергіштерін пайдалану кезінде бірдей маңызды фактор қауіпсіздік болып табылады. Кейде көлік құралының қайталанатын көтерілуі кезінде платформаның ығысуы мүмкін, бұл ықтимал қауіп. Бұл мәселені жеңілдету үшін датчиктер мен контроллерлерді, сондай-ақ гидростатикалық жүйелерде инверторларды қолдануды ұсынады (Stawiński Ł. et al.), нәтижесінде тиімділік жоғарылайды, жеделдету төмендейді және пайдалану қауіпсіздігі жақсарады. Жұмыста (Sanusi H. et al.), көтергіштің ішінде пайда болатын өтемақы күшін реттеу үшін серіппелердің екі түрі ұсынылған. Сонымен қатар, (Takesue N. et al.) басқа жұмыста қауіпсіздік коэффициенттерін, максималды жүктемелерді зерттеді. Бұл шаралар мен талдау көлік көтеру жүйелерінің қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз етуге деген міндеттемені көрсетеді, осылайша осы саладағы маңызды мәселелерді шешеді.

Автокөлікті көтеру жүйелерінің істен шығуын талдау кезінде бірқатар проблемалар туындайды, соның ішінде әлсіз жерлерді, кернеу концентрацияларын және ықтимал істен шығу түрлерін анықтау (Crivelli D., Ghelichi R., Guagliano M.). Автокөлік көтеру жүйелерінің негізгі мәселелерінің бірі – олардың жүк көтергіштігі және энергия құрылымы. Энергияны тұтынуды басқара отырып, әртүрлі массадағы көліктерді тиімді көтеру және қолдау қабілеті күрделі инженерлік міндет болып табылады (Delatte N., 2010 және Delatte N., 2004). Әртүрлі массадағы көліктермен қайшы көтергішті көтеру және түсіру үшін жалпы энергия шығынын жұмыста зерттелінген (Stawinski L. et al., 2021). Көлік көтеру жүйелерінің энергетикалық талаптары мен шектеулерін түсіну олардың өнімділігін оңтайландыру және үнемді жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін қажет.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу аясында қайшы көтергіш моделі жасалып (1-сурет) ANSYS Workbench-те статикалық есептеулер арқылы беріктікке талдау жасалды. Қайшы көтергіштің өлшемдері, материалдық қасиеттері және геометриялық сипаттамалары қолданыстағы 3500 кг Heshbon 51G көтергішінен пайдаланылды. көтергіштің өлшемдері 5660 мм x 2040 мм x 265 мм 1800 кг. есептеулерде S235JR маркалы болат стандарт бойынша пайдаланылды EN 10025-2. Ең төменгі кірістілік шегі 235 МПа құрайды. Химиялық құрамы (%): көміртегі (C) < 0,20% қалыңдығы 40 мм-ден аз, < 0,17% 40 мм-ден жоғары, марганец (Mn) ≤1,40 %; фосфор (P) және күкірт (S) ≤0,035% (ұзақ өнім үшін 0,005% жоғарылауға рұқсат етіледі); азот (N) < 0,12; мыс (Cu) ≤0,45%.

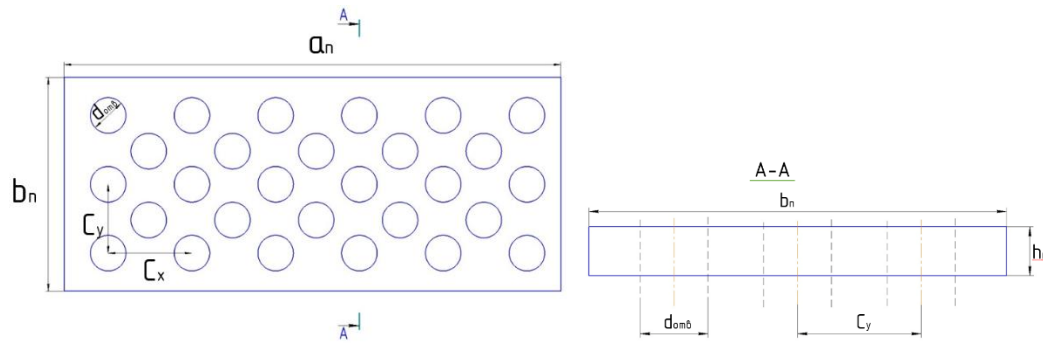


1-сурет. Heshbon 51G қайшы көтергіш моделі:

1-платформа, 2,5-қайшы, 3-төменгі платформа, 4-гидравликалық цилиндр,
6-байланыстырушы арқалықтар

Ескерту – авторлар құрастырған

Зерттеудің мақсаты көтергіштің жоғарғы платформасының дизайнын оңтайландыру болғандықтан, 2-суретте көрсетілгендей зерттеу үшін оның моделі ұсынылды.



2-сурет. Жоғарғы платформаның дизайн моделі: a_n – платформаның ұзындығы, м; b_n – платформаның ені, м; h_n – платформаның қалыңдығы, м; $d_{отв}$ – саңылаудың диаметрі, м; C_x – ұзындығы бойынша саңылаулар арасындағы қашықтық a_n , м; C_y – ені бойынша саңылаулар арасындағы қашықтық b_n , м

Ескерту – авторлар құрастырған

Ұсынылған құрылымдық өзгерістердің тиімділігін сандық бағалау үшін жаңартылған құрылымның массасын бағалауға мүмкіндік беретін математикалық модель жасалды.

Платформаның массасы $M_{плат}$ негізгі мойынтірек тақтасының массасынан және қосымша күшейту элементтерінің массасынан қалыптасады. Жалпы алғанда құрылымның массасы келесі өрнекпен сипатталады:

$$M_{плат} = M_{пл} - M_{уд.м} + M_{рж} \quad (1)$$

$M_{плат}$ – платформаның массасы, кг

$M_{пл}$ – қатты платформаның толық массасы, кг

$M_{уд.м}$ – меншікті масса, кг

$M_{рж}$ – қаттылық шеттерінің жалпы массасы, кг.

Әрбір компонентті егжей тегжейлі есептеу үшін нақтыланған формула қолданылады:

$$M_{плат} = 4M_{пл} - q_m N_{отв} S_{отв} + 4M_{рж} \rightarrow \min \quad (2)$$

q_m – металдың меншікті салмағы, кг/м³

$N_{отв}$ – саңылаулардың жалпы саны, шт.

$S_{отв}$ – бір саңылаудың ауданы, м²

Платформа массасының жиынтық параметрлік формуласы:

$$M_{плат} = 4M_{пл} + M_{рж} - [\rho \cdot h \cdot \left(\frac{a_n}{C_x} + 1\right) \cdot \left(\frac{b_n}{C_y} + 1\right) \cdot \frac{\pi d^2}{4}] \quad (3)$$

$4M_{пл} + M_{рж}$ – бастапқы платформаның массасы

C_x, C_y – айнымалы параметрлер

ρ – материалдың тығыздығы, кг/м³ (болат үшін $\rho = 7850$ кг/м³);

h – материалдың қалыңдығы, 0,004 м.

Мақсатты функция $M_{плат}(d, C_x, C_y) \rightarrow \min$, мұндағы d, C_x, C_y – өзгермелі параметрлер. Массаның төмендеуі материалдың өзіндік құнының төмендеуіне, жетектің қуат тұтынуының төмендеуіне және инерциялық жүктемелердің төмендеуіне тікелей әкеледі.

Шектеулер: құрылымның кез келген элементіндегі беріктік бойынша материалдың рұқсат етілген кернеуінен $[\sigma] = 235$ МПа аспауы керек.

Бұл модель кейінгі параметрлік талдаудың негізі болып табылады және Перфорацияның геометриялық параметрлеріне (саңылаулардың саны мен ауданы) байланысты платформа массасының өзгеруін бағалауға мүмкіндік береді. Қауіпсіз және тиімді инженерлік шешімдерді әзірлеу үшін жүктемедегі металл конструкцияларының мінез-құлқын зерттеу 50, 100, 150 және 200 кг жүктемелерді қолдана отырып жүргізілді.

Эксперименттер жүргізу үшін 2 металл пластина дайындалды: стандартты және перфорацияланған, өлшемдері 700x300x4 мм. Салыстырмалы талдау үшін материал ретінде S235JR маркалы құрылымдық болат қабылданды. Шекаралық шарттар мен жүктеме: консоль тақтасының таза иілу схемасы модельденген. Пластиналар 2 тірекке болды (барлық қозғалыстар мен бұрылыстарға тыйым салынады). Орталықта жүктің 50 кг (490.33 Н), 100 кг (980.67 Н), 150 кг (1471.00 Н) және 200 кг (1961.33 Н) салмағына сәйкес келетін шоғырланған күш қолданылды. Елеулі ауытқулармен дұрыс есептеу үшін үлкен қозғалыстарды ескере отырып, статикалық шешуші қолданылды.

Сенімділікті растау. Прототиптерді жасау үшін қалыңдығы 0,4 мм Ст45 маркалы қаңылтыр құрылымдық болат пайдаланылды. Болаттың бұл маркасы жоғары икемділікпен және жақсы штамптаумен, сондай-ақ жарықтар пайда болмай қарқынды суық деформация қабілетімен сипатталады, бұл кейінгі алау операциясы үшін өте маңызды. Пластиналар арнайы салмақтардың көмегімен 50, 100, 150 және 200 кг жүктемелерге ұшырады. Пластинадағы деформациялар сенсорлар арқылы өлшенді және одан әрі талдау үшін есептелді. Атап айтқанда, сандық дисплейі бар жоғары дәлдіктегі сағат типті индикатор басы (бөлу бағасы 0,01 мм) құрылғылар және сандық дисплейі бар сыртқы және ішкі өлшемдерді өлшеуге арналған электронды штангенциркуль (бөлу бағасы 0,01 мм). Эксперимент жүргізу жүктеме кезінде металл пластинаның жүктеме кезінде иілу әрекеті байқалды.

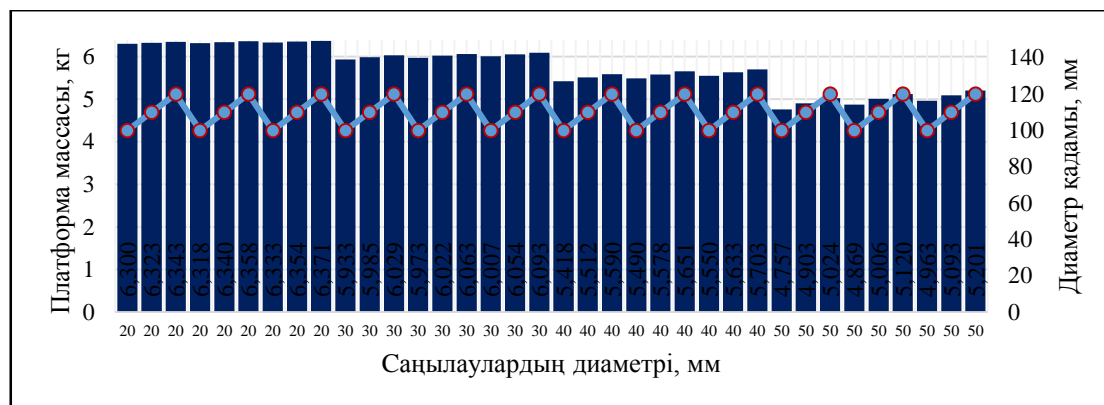
НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Luo L. жұмысында зерттеушілер ANSYS көмегімен шекті элементтер модельдеріндегі параметрлік модельдеуге және торларды бөлуге байланысты мәселелерді сипаттады (Luo L. et al.). Шекаралық нүктелердегі өзгерістер тордың тұтастығын сақтауда қиындықтарға әкеледі, бұл сенімді модельдеу әдістерінің қажеттілігін көрсетеді. Shi D. жұмысында статикалық беріктікке, шаршау беріктігіне және буынның кернеуінің таралуына, сондай-ақ ішкі компоненттердің дірілінің беріліс білігінің мещысуына және жүктеме реакциясына әсері талданды (Shi D. et al.). Сілтеме бұрыштарының қайшы көтергіштің жұмысына әсері ANSYS-те екі өлшемді және үш өлшемді модельдеуді қолдана отырып зерттелді (Turan K.). Көлік көтеру жүйелерін жетілдіру мақсатында олардың дизайны мен өнімділігін жақсарту үшін модельдеу мен талдаудың әртүрлі әдістері зерттелді. Осы мәселелерден басқа, болат (Uhrýński A. et al.) немесе алюминий қорытпалары сияқты қайшыны көтеру компоненттерінің материалдарының қасиеттері материалдың мінез-құлқын модельдеуді қиындатады, соның ішінде икемділік, жорғалау және шаршау. Бұл мәселелерді шешу үшін модельдеу дәлдігін жақсарту үшін сызықтық емес материал модельдері және байланыс алгоритмдері сияқты жетілдірілген шекті элементтер әдістері қолданылды. Бұл әдістер әртүрлі жүктеме жағдайларында модельдеуді шынайы түрде ұсынуға мүмкіндік береді, бұл дизайнды оңтайландыруға және дизайн сипаттамаларын болжауға әкеледі.

Платформаның кернеулі-деформацияланған күйін анықтау үшін оны имитациялық модельдеу жүргізілді. Көтергіш компоненттерін имитациялық модельдеудің ең дәл нәтижелерін алу үшін имитациялық модельдеудегі шекаралық шарттар нақты жағдайларды толығымен көбейту үшін таңдалады. Көлік соқтығысқан кезде автомобиль салмағының жүктемесі біркелкі бөлінбейді, бірақ платформаның бетіне шоғырланады. Көлденең қиманың ауданы ені 165 мм автомобиль дөңгелегі шығаратын ықтимал байланыс аймағына негізделген. Ол үшін 165x50 мм аумақ алынады. Бұрын жүргізілген модельдеу нәтижелері бойынша (Bembenek M. et al.) жоғарғы пластинаның құрылымындағы эквивалентті кернеудің максималды мәні – 56 МПа, максималды орын ауыстыру – 0,77 мм, максималды деформация – 0,0002 мм. Бұл эквивалентті кернеу, орын ауыстыру және деформация

мәндері зерттелетін жоғарғы пластинаның құрылымы үшін айнымалы емес. Осы нәтижелерге сүйене отырып, осы дизайн элементтерінің қауіпсіздік шегі тым үлкен деп қорытынды жасауға болады, бұл материалдың артық шығындалуына және массасы мен құнының өсуіне әкеледі.

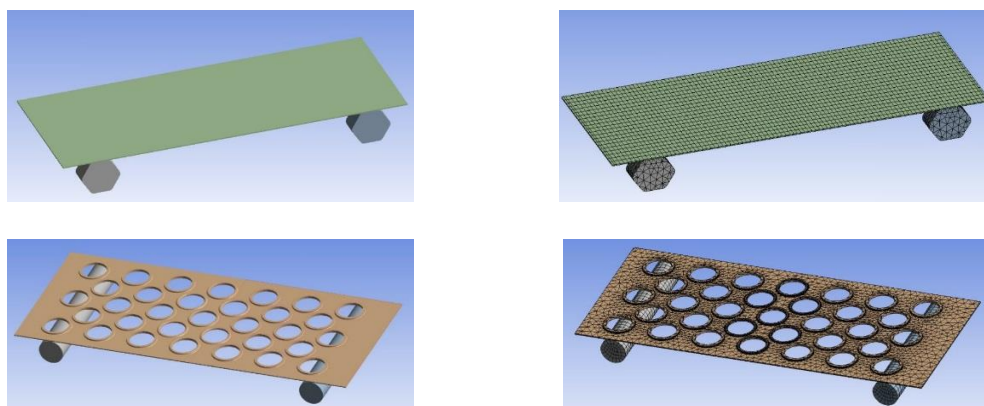
Анықталған тәуелділіктерді көрнекі түрде көрсету және перфорация параметрлерінің платформа массасына әсерін талдауды жеңілдету үшін алынған нәтижелер 3-суретте көрсетілген. Графикалық бейнелеу $d_{отв}$, C_x көрсеткіштерінің өзгеруімен $M_{плат}$ жиынтық массасының өзгеру тенденцияларын нақты бақылауға мүмкіндік береді.



3-сурет. Жаңартылған платформаның параметрлік массасын талдау нәтижелері
Ескерту – авторлар құрастырған

Бұл бөлімде зерттеу барысында алынған негізгі нәтижелер келтірілуі қажет. Ұсынылған деректер анық құрылымдалуы тиіс, қажет болған жағдайда кестелермен, диаграммалармен, суреттермен толықтырылуы мүмкін. Артық сипаттаудан аулақ болып, негізгі байқауларды, өлшеулерді немесе есептеулерді интерпретациялауға назар аудару қажет. Қажет болған жағдайда нәтижелер тақырыптық бөлімшелерге немесе мазмұндық блоктарға бөлінуі мүмкін.

Бұл параметрлік талдау дизайнды оңтайландырудың бірінші кезеңі болып табылады. Алынған мәндер беріктік пен қаттылыққа арналған шекті элементтер әдісті егжей-тегжейлі талдау үшін параметрлердің бірнеше перспективалы комбинацияларын мақсатты түрде таңдауға мүмкіндік береді. Әрбір үлгі үшін ANSYS Mechanical көлемді 3D геометриялық модель құрастырылды және шекті элементтер торы салынды (4-сурет).



4-сурет. Қатты және перфорацияланған пластинаның шекті элементтерінің 3D моделі мен торы

Ескерту – авторлар құрастырған

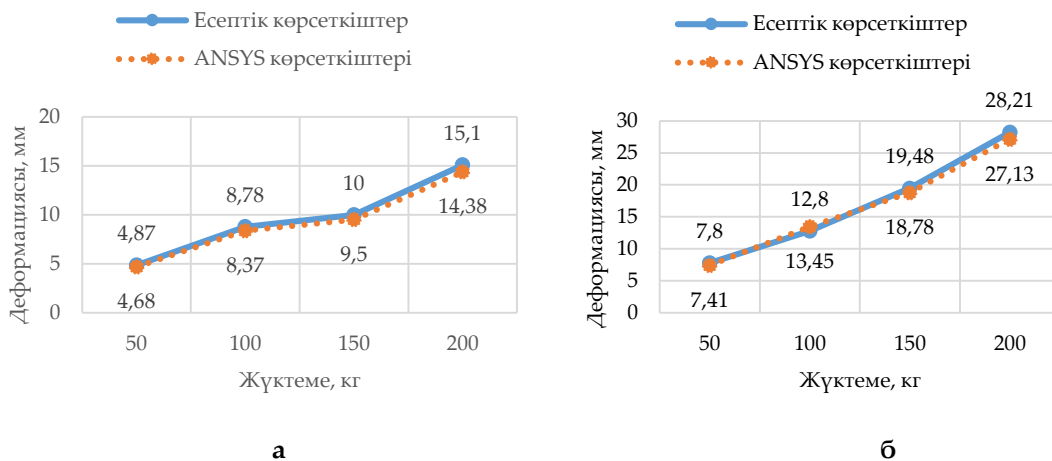
Өртүрлі жүктемелердегі пластинаның бақылау нүктелерінің нәтижелерін салыстыру сәйкестіктің жоғары дәрежесін көрсетілген (1-кесте). Аналитикалық есептеу мен ANSYS деректері арасындағы орташа қателік 5 %-дан аспады, бұл есептеулер үшін рұқсат етілген шектерде және салынған модельдің сәйкестігін, таңдалған шекаралық шарттар мен тор параметрлерінің дұрыстығын растайды.

1-кесте. Қатты пластинаның деформациясының нәтижелері

Қатты пластина	Деформация нәтижелері, мм											
	2			3			4			5		
Жүктеме	50 кг – 490,3325Н			100 кг – 980,665Н			150 кг – 1470,9975Н			200 кг – 1961,33Н		
Аймақ	Пластинаның соңы	Ортасы мен соңы арасында	Ортасы	Пластинаның соңы	Ортасы мен соңы арасында	Ортасы	Пластинаның соңы	Ортасы мен соңы арасында	Ортасы	Пластинаның соңы	Ортасы мен соңы арасында	Ортасы
Есеп айырысу	0	4,87	7,8	0	8,78	12,8	0	10,0	19,48	0	15,1	28,21
ANSYS	0,28	4,68	7,41	0,51	8,37	13,45	0,31	9,5	18,78	0,73	14,38	27,13
Есептеу қателігі	–	3,9 %	5 %	–	4,9 %	5 %	–	5 %	3,59 %	–	5 %	3,83 %

Ескерту – авторлар құрастырған

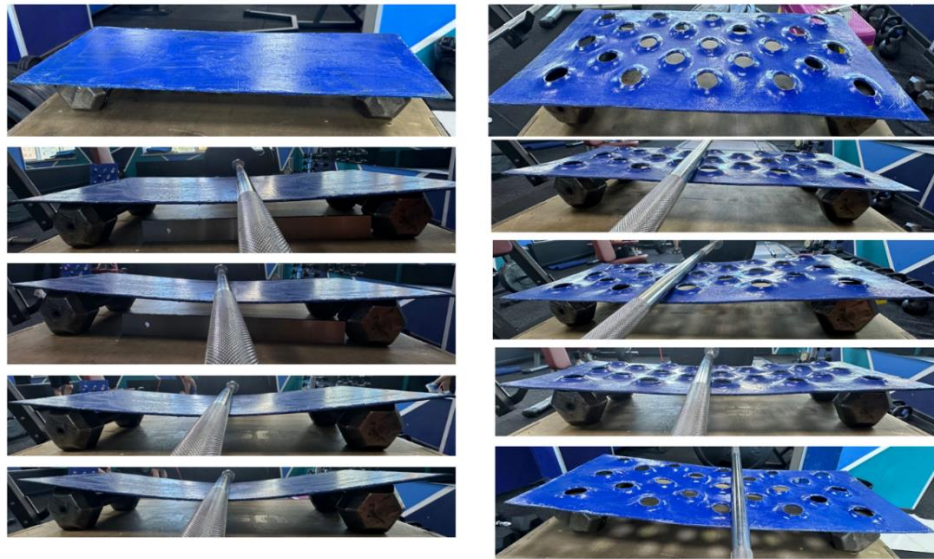
Екі үлгі үшін де геометриялық сызықтық емес тапсырмаға (үлкен қозғалыстарға) тән жүктеменің жоғарылауымен сызықтық емес иілу өсуі байқалады. Модельдеудегі және есептеу әдісіндегі деформация мәндерінің пластинаның ортасы мен соңы арасындағы, сондай-ақ ортасында тәуелділігі 5-суретте көрсетілген.



5-сурет. Пластинаның деформациясы пластинаның ортасы мен соңы арасындағы аймақта (а), пластинаның ортасында (б) қатты пластина үлгісі

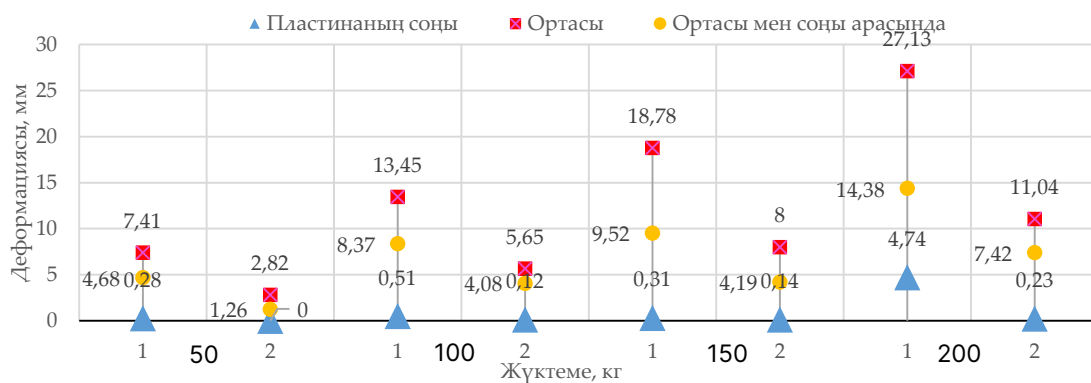
Ескерту – авторлар құрастырған

Кәдімгі қатты пластина үлгісінің салмағы 6,4 кг, ал перфорацияланған пластинаның салмағы 5,9 кг, әдеттегіден 8 % аз. 6-суретте 50, 100, 150, 200 кг жүктеме кезінде деформацияланған үлгілер көрсетілген.

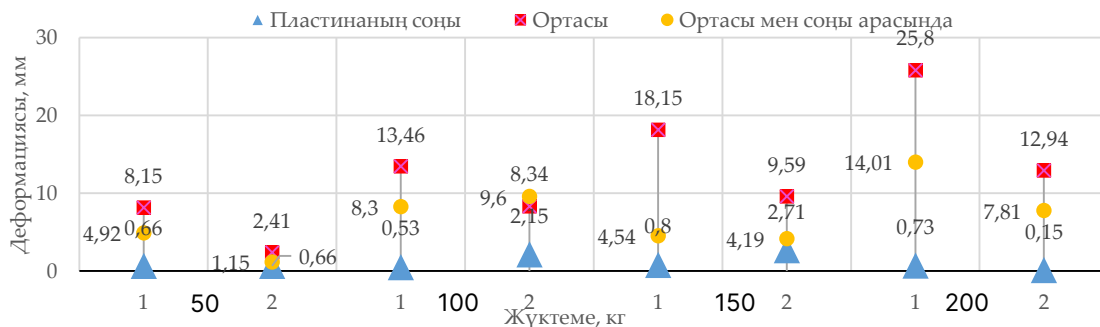


6-сурет. 0, 50, 100, 150, 200 кг жүктеме кезінде пластинаның деформациясы
Ескерту – авторлар құрастырған

Барлық зерттелетін жүктеме диапазонында перфорацияланған пластина қатты пластинаға қарағанда 2.35-2.63 есе аз ауытқуды көрсетеді. Қаттылық үстемдігінің орташа мәні 2.46 құрайды. Төменде модельдеудегі деформация мәндерінің салыстырмалы графиктері және 7-8-суреттегі пластинаның эксперименті (валидациясы) берілген.



7-сурет. ANSYS нәтижелері бойынша 2 пластинаның деформациясы
Ескерту – авторлар құрастырған



8-сурет. Эксперименттен 2 пластинаның деформациясы
Ескерту – авторлар құрастырған

Перфорацияланған пластинаның қаттылығын арттыру контринтуитивті, бірақ деформация механикасы тұрғысынан түсінікті. Кесу әдісімен жасалған перфорация шын мәнінде қатты қиманы торлы құрылымға айналдырады. Иілу кезінде негізгі жүктемені экстремалды талшықтар көтереді. Материалдың таралуын оңтайландыру (оны төмен кернеу аймағынан шығару) бейтарап оське қатысты қиманың тиімді Инерция моментінің жоғарылауына әкеледі, бұл ауытқулардың төмендеуінде көрінеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелерін талдау келесі тұжырымдарды жасауға мүмкіндік береді:

1. Саңылау диаметрінің әсері. $d_{отв}$ диаметрін ұлғайту массаны азайтудың ең тиімді әдісі болып табылады. C_x және C_y тұрақты қадамдарымен диаметрдің 20 мм-ден 50 мм-ге дейін өсуі $M_{плат}$ платформасының массасының 20-25 %-ға төмендеуіне әкеледі. Мысалы, $C_x=100$ мм және $C_y=110$ мм кезінде масса 6,300 кг-нан 4,757 кг-ға дейін азаяды.

2. Екі үлгі үшін де геометриялық сызықтық емес есептерге тән жүктеменің жоғарылауымен сызықтық емес иілу өсімі байқалады.

3. 200 кг жүктеме кезінде перфорацияланған пластина бірдей өлшемдегі қатты пластинаға қарағанда 2,46 есе аз (11,04 мм қарсы 27,13 мм) ауытқуды көрсететіні анықталды.

4. Үлгі массасының 8 %-ға төмендеуі (6,4 кг-нан 5,9 кг-ға дейін) қаттылықтың өсуімен бірге меншікті қаттылықтың кешенді критерийінің 2,66 есе өсуіне әкелді.

Ғылыми-практикалық қорытынды: нәтижелер рационалды перфорация түріндегі мақсатты геометриялық оңтайландыру серпінді кезеңде жүк көтергіштігін жоғалтпай, иілу үшін жұмыс істейтін металл конструкцияларының элементтерінің массасын және қаттылығын бірлесіп азайтудың тиімді әдісі ретінде қызмет ететінін дәлелдейді.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Авторлар түйіндеме мәтінін қысқарту және пайдаланылған әдебиеттер тізімін безендіру үшін жасанды интеллект құралдарын пайдаланған.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Bastidas-Rodriguez, M. X. et al. (2020). Deep Learning for fractographic classification in metallic materials. *Engineering Failure Analysis*, 113, 104532. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104532>
- Bembenek, M. et al. (2025). Study of the stress-strain state of a perforated plate with stiffening ribs. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, 24(2), 18–32. <https://doi.org/10.17512/jamcm.2025.2.02>
- Crivelli, D., Ghelichi, R., & Guagliano, M. (2011). Failure analysis of a shaft of a car lift system. *Procedia Engineering*, 10, 3683–3691. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.606>
- Delatte, N. (2004). Undergraduate Summer Research in Structural Engineering. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 130(1), 37–43. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1052-3928\(2004\)130:1\(37\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1052-3928(2004)130:1(37))
- Delatte, N. (2010). Failure literacy in structural engineering. *Engineering Structures*, 32(7), 1952–1954. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.023>
- Gong, W., & Yu, Z. J. (2014). Mathematical Modeling and Simulation Analysis of Lift for Car Hydraulic System. *Applied Mechanics and Materials*, 490–491, 447–450. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.447>
- Jhaveri, K. et al. (2018). Life cycle assessment of thin-wall ductile cast iron for automotive lightweighting applications. *Sustainable Materials and Technologies*, 15, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.01.002>

- Kosucki, A. et al. (2021). Electro-Hydraulic Drive of the Variable Ratio Lifting Device under Active Load. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 67(11), 599–610. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2021.7320>
- Luo, L. et al. (2019). Number simulation analysis of self-lubricating joint bearing liner wear. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13(1), 23–34. <https://doi.org/10.1007/s12008-018-0471-y>
- Nurkusheva, S., Bembenek, M., & Kostyuchenkova, O. (2023). Overview of the use of lifting equipment in auto maintenance in Astana. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series*, 143(2), 136–146. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2023-143-2-136-146>
- Sanusi, H. et al. (2019). Optimisation of scissor lifting machine structures using finite element analysis (FEA). *AIP Conference Proceedings*, 2111(1), 020003. <https://doi.org/10.1063/1.5118011>
- Shi, D. et al. (2015). Finite element and experimental analysis of pinion bracket-assembly of three gorges project ship lift. *Journal of Central South University*, 22(4), 1307–1314. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2647-y>
- Stawiński, Ł. et al. (2019). A new approach for control the velocity of the hydrostatic system for scissor lift with fixed displacement pump. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(4), 1104–1115. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.06.001>
- Stawiński, L. et al. (2021). Energy Consumption Structure and Its Improvement of Low-Lifting Capacity Scissor Lift. *Energies*, 14(5), 1366. <https://doi.org/10.3390/en14051366>
- Takesue, N. et al. (2016). Scissor lift with real-time self-adjustment ability based on variable gravity compensation mechanism. *Advanced Robotics*, 30(15), 1014–1026. <https://doi.org/10.1080/01691864.2016.1181008>
- Taub, A. I., & Babu, S. S. (2018). Opportunities and challenges for introducing new lightweight metals in transportation. *International Journal of Powder Metallurgy*, 54(2), 27–33.
- Taub, A. et al. (2019). Materials for Automotive Lightweighting. *Annual Review of Materials Research*, 49(1), 327–359. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070218-010134>
- Turan, K. (2013). Joint angle effect on the failure behavior of pinned joint composite plates. *Journal of Composite Materials*, 47(24), 3027–3039. <https://doi.org/10.1177/0021998312461079>
- Uhryński, A. et al. (2024). A Comparative Thermal Analysis of Two Workpiece Materials of Different Machinability When Turning Based on Ir Thermography. *Journal of Machine Engineering*, 24(1), 50–59. <https://doi.org/10.36897/jme/185359>
- Williams, B., Hall, A., & Myers, O. (2020). Terfenol-D Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP): Embedded Sensing for Early Localized Damage Detection. *Proceedings of the ASME 2020 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. <https://doi.org/10.1115/SMASIS2020-2283>
- Yan, T. P. (2011). The Air Controlled Hydraulic System Design of 3201z-Type Dump Truck Lifting Mechanisms. *Advanced Materials Research*, 383–390, 1202–1207. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.1202>
- Zhang, L., & Li, Y. (2020). Synchronous Control of Double Hydraulic Cylinders of Scissors Aerial Work Platform Based on Fuzzy PID. *2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT)*, 349–354. <https://doi.org/10.1109/ICECTT50890.2020.00084>
- Zhang, W., Wang, X. X., & Wang, L. W. (2011). Strength Optimization Design of Box-Shape Arms of a Scissor Lift Mechanism with Single Hydraulic Cylinder. *Applied Mechanics and Materials*, 141, 513–518. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.141.513>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Костюченкова Оксана Николаевна – техникалық ғылымдарының кандидаты, PhD, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің аға оқытушы, Астана қ., Қазақстан
Костюченкова Оксана Николаевна – кандидат технических наук, доктор PhD, старший преподаватель Казахского агротехнического исследовательского университета им.С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан

Kostyuchenkova Oksana Nikolaevna – Candidate of Technical Sciences, PhD, Senior Lecturer of Seifullin University, Astana, Kazakhstan

e-mail: oxy_uno@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2060-7083>



Нуркушева Салтанат Амангелдіқызы – хат-хабар авторы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің докторантты, Астана қ., Қазақстан

Нуркушева Салтанат Амангельдиевна – автор для корреспонденции, докторант Казахского агротехнического исследовательского университета им.С. Сейфуллина, г. Астана, Казахстан

Nurkusheva Saltanat Amangeldiyeva – corresponding author, PhD-student of Seifullin University, Astana, Kazakhstan

e-mail: saltanat.nurkusheva@kazatu.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7263-3797>



Bembenek Michal – техника ғылымдарының докторы, PhD, Краков АГН университетінің профессоры, Краков қ., Польша

Bembenek Michal – доктор технических наук, доктор PhD, профессор АГН Университета в Кракове, г. Краков, Польша

Bembenek Michal – Doctor of Technical Sciences, PhD, Professor, AGH University of Krakow, Krakow, Poland

e-mail: bembenek@agh.edu.pl,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7665-8058>



https://doi.org/10.51885/3134-8009_IES_2026_1_13

SRSTI 86.33.35

DYNAMICS AND STRUCTURE OF OCCUPATIONAL INJURIES IN KAZAKHSTAN AND ENGINEERING MEASURES TO REDUCE THEM

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ӨНДІРІСТІК ЖАРАҚАТТАНУ ДЫҢ ДИНАМИКАСЫ МЕН ҚҰРЫЛЫМЫ ЖӘНЕ ОНЫ ТӨМЕНДЕТУДІҢ ИНЖЕНЕРЛІК ШАРАЛАРЫ

ДИНАМИКА И СТРУКТУРА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА В КАЗАХСТАНЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕРЫ ЕГО СНИЖЕНИЯ

G.R. Kurmasheva ^{1*}, R.B. Shirvanov ², Y.B. Kamal ³

¹West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan, Uralsk, Kazakhstan

²West Kazakhstan University of Innovation and Technology, Uralsk, Kazakhstan

* Corresponding author: Kurmasheva Gulshat Rakhmetullayevna, e-mail: kurmasheva_gulshat@mail.ru

Keywords:

occupational injuries, types of activities, victims, severity, causes

ABSTRACT

Occupational injuries remain an urgent social and economic problem, especially in the most dangerous industries such as construction, mining and manufacturing. The purpose of this study is to study the engineering and organizational and technical factors that cause a high incidence of occupational injuries in the country's enterprises. To solve the problems, methods of statistical data analysis over the past five years have been applied, as well as current regulatory legal acts, international ILO standards and the requirements of the ISO 45001 occupational safety and health management system have been analyzed. It has been established that the main reasons remain the wear and tear of technological equipment, the low level of automation of production processes, the lack of modern alarms and locking devices, as well as the poor qualifications of workers and the lack of training and motivation systems for staff. Based on the analysis, measures are proposed to reduce the level of injuries and improve the safety culture at enterprises.

Түйінді сөздер:

өндірістік жарақаттану, қызмет түрлері, зардап шеккендер, ауырлық дәрежесі, себептері

ТҮЙІНДЕМЕ

Өндірістік жарақаттану, әсіресе құрылыс, тау-кен және өңдеу өнеркәсібі сияқты ең қауіпті салаларда өзекті әлеуметтік және экономикалық проблема болып қала береді. Осы зерттеудің мақсаты-ел кәсіпорындарында өндірістік жарақаттардың жоғары жиілігін анықтайтын инженерлік және ұйымдастырушылық-техникалық факторларды зерттеу. Міндеттерді шешу үшін соңғы бес жылдағы деректерді статистикалық талдау әдістері қолданылды, сондай-ақ қолданыстағы нормативтік құқықтық актілер, ХЕҰ халықаралық стандарттары және ISO 45001 жүйесінің еңбек қауіпсіздігі мен еңбекті қорғауды басқару жөніндегі талаптары талданды. Негізгі себептер технологиялық жабдықтардың тозуы,



© 2026 G.R. Kurmasheva, R.B. Shirvanov, Y.B. Kamal

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

өндірістік процестерді автоматтандырудың төмен деңгейі, заманауи дабыл мен құлыптау құрылғыларының болмауы, сондай-ақ жұмысшылардың біліктілігінің әлсіздігі және оқыту мен персоналды ынталандыру жүйелерінің жетіспеушілігі болып қала беретіні анықталды. Жүргізілген талдау негізінде кәсіпорындарда жарақат алу деңгейін төмендету және қауіпсіздік мәдениетін арттыру бойынша шаралар ұсынылды.

Ключевые слова:

производственный
травматизм, виды
деятельности,
пострадавшие, степень
тяжести, причины

АННОТАЦИЯ

Производственный травматизм остаётся актуальной социальной и экономической проблемой, особенно в наиболее опасных отраслях, таких как строительство, горнодобывающая и обрабатывающая промышленность. Целью настоящего исследования изучение инженерных и организационно-технических факторов, обуславливающих высокую частоту производственных травм на предприятиях страны. Для решения задач были применены методы статистического анализа данных за последние пять лет, а также проанализированы действующие нормативные правовые акты, международные стандарты МОТ и требования системы ISO 45001 по управлению безопасностью и охраной труда. Установлено, что основными причинами остаются износ технологического оборудования, низкий уровень автоматизации производственных процессов, отсутствие современной сигнализации и блокировочных устройств, а также слабая квалификация рабочих и недостаток систем обучения и мотивации персонала. На основе проведённого анализа предложены меры по снижению уровня травматизма и повышению культуры безопасности на предприятиях.

INTRODUCTION

Industrial accidents are one of the most pressing socio-economic problems in the Republic of Kazakhstan. The International Labour Organization (ILO) estimates that about 2.78 million people worldwide die from accidents at work each year (International Labor Organization, 2019). This means that every 15 seconds, one person dies as a result of a work-related incident, and another 160 are injured, which underscores the urgency of this problem not only at the national but also at the global level. According to the ILO, workplace injuries are the third leading cause of death among the working-age population (Osanova, 2012).

The highest levels of injuries and deaths were recorded in industries associated with heavy physical labor, insufficient mechanization and automation, as well as a high degree of occupational risk, such as construction, mining and manufacturing (Statistics on safety and health at work). In particular, in the construction industry, mortality is on average 3-4 times higher than in other sectors of the economy, and in the mining industry, the risks associated with landslides, explosions and exposure to harmful gases lead to serious health consequences and death of workers, such as silicosis and pneumoconiosis. For example, in the United States, total economic losses from occupational injuries and diseases are estimated at about \$250 billion per year, including medical costs, lost productivity, and compensation (Leigh, 2011).

An analysis of occupational injuries in the regions of the Russian Federation shows that there is a relationship between the number of accidents at work and the sectoral specialization of the regional economy (Moskvina, 2024). In countries with well-organized occupational health and safety systems, such as Germany, Canada, and South Korea, the implementation of ISO 45001 standards and the Vision Zero concept has helped significantly reduce injury rates (ISO 45001:2018, Vision Zero 2021). Germany has a mandatory occupational accident insurance system (DGUV), which guarantees insurance for all employees and support for rehabilitation activities

(Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung). In Canada, regional authorities are actively involved in the creation and implementation of occupational safety programs, taking into account the specifics of professions and the typical risks of individual industries (Ministry of Labor, Immigration, Training and Skills Development, Ontario, Canada). South Korea is successfully implementing innovative technologies and employee health monitoring systems to ensure the safety of small and medium-sized businesses (South Korea's National Security Strategy).

This problem is also relevant for Kazakhstan. According to official data, there was a steady increase in the number of industrial accidents in 2019-2023, especially in high-risk industries (Bakishiev and Alikhan, 2024). In 2023, 2,670 accidents were registered, of which 246 resulted in the death of victims (National Bureau of Statistics of the Republic of Kazakhstan). The situation remains particularly acute in the West Kazakhstan region, an important industrial zone with large enterprises in the oil and gas sector, mechanical engineering and construction. In 2023, 57 accidents occurred there, resulting in the deaths of nine workers. Despite the current legal framework, including the Constitution of the Republic of Kazakhstan (1995), the Labor Code (2015) and the law "On Compulsory Insurance of employees against Accidents" (2005), the injury rate in the country remains high. The Constitution of the Republic of Kazakhstan guarantees citizens the right to safe work (article 24). The Labor Code of the Republic of Kazakhstan establishes the obligation of employers to ensure safe working conditions, including risk assessment, employee training and the provision of personal protective equipment (Labor Code of the Republic of Kazakhstan, Article 23). Domestic scientists believe that outdated technologies and the lack of modern safety systems are becoming the main factor in occupational injuries, which leads to an increased risk of accidents (Zhaksybekova and Bermagambetova, 2021). International and domestic experience shows the important role of the human factor in ensuring occupational safety, including the behavior, motivation, fatigue and psychophysical state of workers (Lechiev, 2016). Some experts point to possible attempts by employers to conceal incidents, which affects the accuracy of statistics and complicates regulation (Churanova, 2015).

The ILO argues that injury prevention is much cheaper than accident management and compensation (ILO, 2017), making occupational safety an essential component of social and economic policy.

The purpose of this study is to analyze the dynamics and structure of occupational injuries in the Republic of Kazakhstan in 2019-2023, as well as to identify factors influencing the formation of accidents at work, and to substantiate engineering and organizational measures aimed at reducing the level of occupational injuries.

The practical value of our work lies in the possibility of using the results obtained to develop effective injury prevention programs at enterprises, improve the system of state regulation of labor protection, increase the competence of employees in safety issues and reduce socio-economic losses associated with industrial accidents.

To achieve our goals, we have solved the following tasks:

- we conducted an analysis of the dynamics of occurrence and structure of industrial accidents;
- estimated the distribution of injuries by industry, type, cause, and severity;
- we have determined the influence of organizational, technical and human factors on the injury rate;
- we have formulated recommendations for improving the labor protection system.

The object of the study was the level of occupational injuries in the industry of Kazakhstan.

The object of the study is the level and structure of occupational injuries in the industries of the Republic of Kazakhstan.

The subject of the study was the causes and conditions of accidents at work, leading to varying degrees of severity of injuries.

The research methodology included the analysis of statistical data, comparative methods, content analysis of regulatory documents and generalization of the experience of enterprises.

Thus, the need for a comprehensive study of the causes and factors of occupational injuries in Kazakhstan, as well as the development of effective preventive measures, is obvious. Our research is aimed at identifying the key causes and patterns of occupational injuries.

MATERIALS AND METHODS

This study is devoted to the identification and analysis of occupational injury factors in the Republic of Kazakhstan for the period from 2019 to 2023. The information base of the study was officially published statistical data from the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan, as well as analytical materials from international organizations in the field of occupational safety, containing information on occupational injuries by region and industry. The data analysis was carried out using statistical and comparative analysis methods, which made it possible to identify the main trends and features of the formation of occupational injuries during the study period.

The main indicators used in the study were:

- the total number of victims of industrial accidents in the regions of Kazakhstan;
- the number of dead workers by type of economic activity;
- information about the severity of injuries and the duration of the recovery period;
- dynamics of changes in indicators over a five-year period.

In addition to the official statistical array, regulatory documents defining the procedure for ensuring occupational safety in Kazakhstan were used, including:

- Order of the Minister of Labor and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan No. 340 dated August 27, 2020 "On Approval of the Standard Rules of the Occupational Safety and Health Management System";

- Order of the Minister of Labor and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan No. 363 dated September 11, 2020 "On approval of the Rules for Occupational Risk Management".

The provisions of international standards such as ISO 45001 were also used to compare them with global occupational safety practices.

Data collection and processing were carried out using quantitative and qualitative analysis methods:

Descriptive statistics. Absolute and relative values, proportions, rates of growth and decline were calculated, as well as annual averages, coefficients of frequency and severity of injuries were determined.

Comparative interregional analysis. The differences in the structure and frequency of injuries between the regions of Kazakhstan were assessed.

Dynamic analysis. The assessment of changes in indicators over time was carried out, trends and cyclicity of changes were considered using time series analysis methods.

Structural analysis. The distribution of accidents by severity, types of economic activity and the main causes of their occurrence was studied.

Content analysis of regulatory documents. Regulatory acts and guidance documents were analyzed to assess the completeness of the legal framework and compliance with modern labor protection requirements.

The results of the study formed the basis for recommendations on reducing occupational injuries, developed specifically for entrepreneurs, government services and occupational safety specialists.

The ChatGPT (OpenAI) generative artificial intelligence system was used as a tool for editorial support and stylistic text correction.

RESULTS AND DISCUSSION

The compilation of official statistics on industrial accidents in Kazakhstan, including the West Kazakhstan region, for the period from 2019 to 2023 shows a steady and alarming trend of their increase (table 1). A significant number of incidents have been recorded, resulting in serious injuries and, in some cases, deaths (Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan, 2025).

Table 1. Number of victims of industrial accidents, including fatal accidents

Regions	2019	2020	2021	2022	2023
Abai *	-	-	-	96	125
Akmola	140	118	62	84	107
Aktobe	103	118	129	149	118
Almaty	50	44	43	45	51
Atyrau	81	58	84	77	84
West Kazakhstan	65	77	58	63	57
Zhambyl	83	58	67	67	99
Zhetysu	-	-	-	15	37
Karaganda	433	443	537	460	496
Kostanay	120	122	115	127	118
Kyzylorda	52	41	67	66	62
Mangystau	90	68	65	82	69
Pavlodar	141	128	130	135	129
North Kazakhstan	38	50	43	41	38
Turkestan	58	65	81	54	63
Ulytau*	-	-	-	307	408
East Kazakhstan	302	314	320	233	263
Astana city	142	130	161	128	138
Almaty city	163	134	134	176	181
Shymkent city	50	65	37	44	27
Total	2111	2033	2133	2449	2670

Note: compiled by the authors on the basis of data from the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan. The regions marked with "" were formed after 2021.*

The analysis of the data presented in Table 1 allowed us to record a steady upward trend in the number of victims at work throughout the country. The total number of victims increased from 2,111 to 2,670 over a five-year period. Such data indicate the low efficiency of the labor protection system at enterprises in the republic, and if this trend continues, the number of victims will increase significantly by 2030, which will lead to significant socio-economic losses.

The largest number of accidents was recorded in the Karaganda region, where 496 people were injured in 2023. The high level of injuries in this region is due to the high concentration of enterprises in the coal and metallurgical industries, which are characterized by outdated equipment, difficult working conditions and a high degree of wear and tear of fixed assets.

Unlike the Karaganda region, Shymkent and the North Kazakhstan region have the lowest injury rates, which is due to less developed industry and more favorable working conditions. However, even in these regions, it is necessary to maintain a high level of control over compliance with occupational safety regulations in order to prevent an increase in the number of accidents.

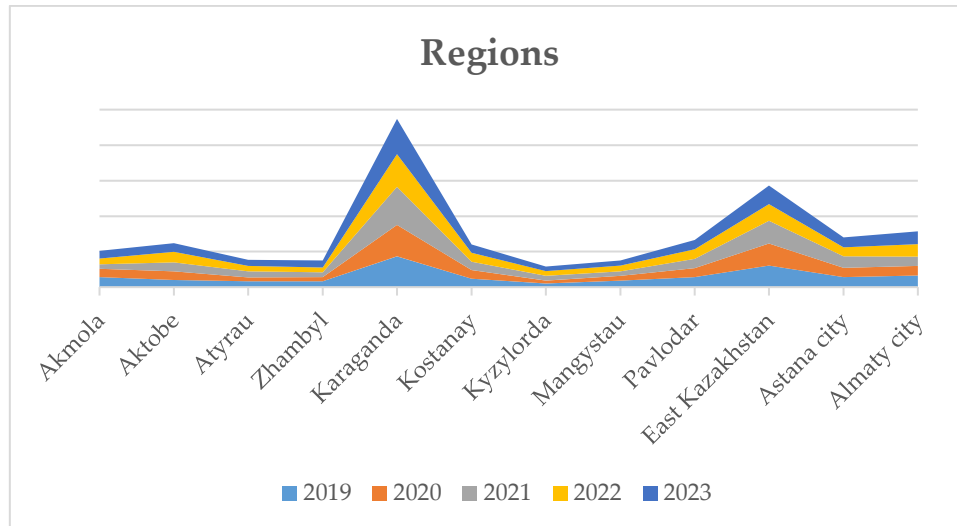


Figure 1. Dynamics of the number of victims of industrial accidents by regions of the Republic of Kazakhstan in 2019-2023

Note – compiled by the authors on the basis of data from the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan.

There are persistently high rates of occupational injuries (Figure 1) in Karaganda, East Kazakhstan and Pavlodar regions, as well as in cities of national significance - Almaty and Astana. In most regions, there is a relative stability of indicators with a moderate upward trend in 2023.

Table 2 shows data on the number of dead workers in production for the same period.

Table 2. Number of deaths at work as a result of accidents

Regions	2019	2020	2021	2022	2023
Abai *	-	-	-	6	20
Akmola	4	20	6	11	12
Aktobe	10	20	19	12	12
Almaty	6	2	4	4	1
Atyrau	3	9	4	5	7
West Kazakhstan	4	4	4	13	9
Zhambyl	7	7	16	12	9
Zhetysu	-	-	-	6	8
Karaganda	20	36	32	33	70
Kostanay	11	8	6	17	10
Kyzylorda	3	6	13	12	16
Mangystau	1	5	2	6	9
Pavlodar	6	5	5	6	4
North Kazakhstan	-	11	11	8	11
Turkestan	4	10	8	5	5
Ulytau*	-	-	-	2	8
East Kazakhstan	8	24	20	8	11
Astana city	12	13	17	21	8
Almaty city	6	12	5	12	10
Shymkent city	6	11	4	6	6
Total	111	203	176	205	246

Note – compiled by the authors on the basis of data from the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan

According to the data presented in table 2, the number of deaths as a result of industrial accidents in Kazakhstan increased from 111 to 246 from 2019 to 2023, i.e. an increase of more than 121%, which once again indicates significant shortcomings in various aspects of ensuring safe working conditions for workers in industrial enterprises.. On average, 188 people died annually during this period.

The Karaganda region, which is consistently the leader in the number of industrial accidents, also ranks first in the number of deaths. Between 2019 and 2023, 191 workers died in the region, with the sharp increase in deaths in 2023, when the death toll reached 70, being particularly alarming. Major industrial accidents, in particular the mine accident in the Karaganda region in 2023, had a significant impact on the increase in mortality rates (Sarybayeva, 2024).

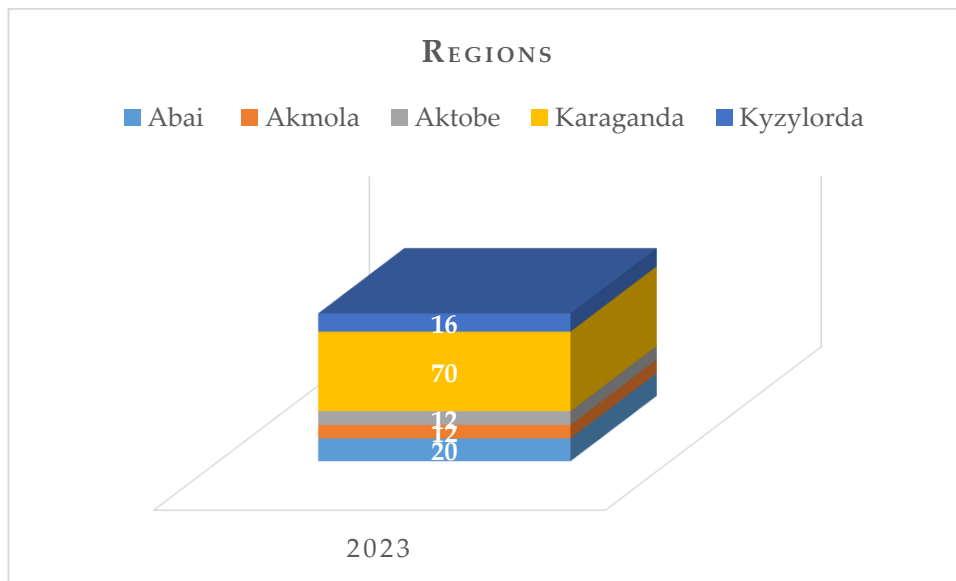


Figure 2. Top 5 regions affected in 2023

Note: compiled by the authors on the basis of data from the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan.

Table 3 shows data on the number of dead workers by type of economic activity for the period from 2019 to 2023.

Table 3. Death toll by type of economic activity

Type of economic activity	2019	2020	2021	2022	2023
Agro-industrial, forestry and fisheries	15	14	7	12	6
Mining and quarrying activities	25	24	31	27	76
Manufacturing industry	32	39	27	33	25
Supply of electricity, gas, steam, hot water, including air conditioning	10	13	15	16	18
Water supply; waste collection, processing, disposal and pollution elimination	10	7	7	11	10
Construction	41	54	34	51	43
Retail and wholesale trade; maintenance, repair of cars and motorcycles	10	6	5	8	6

end of table 3

Transport and equipment	17	17	17	11	17
Provision of accommodation and catering services	1	1	1	2	1
Information and contacts	2	1	1	2	1
Real estate transactions	5	1	2	1	3
Technical, research and professional services	6	5	4	3	4
Work in administration and additional services	7	8	7	8	9
The defense sector, public administration and the compulsory social insurance system	5	6	8	4	19
Education	3	1	2	4	3
Social protection and healthcare system	1	4	8	9	3
Cultural and leisure services	15	1	7	3	1
Provision of other additional services	25	1	31	12	1
Total	190	203	176	205	246

Note – compiled by the authors on the basis of data from the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan

An analysis of the data in table 3 shows that the highest mortality rates are consistently recorded in the construction, mining, and manufacturing industries. This is due to the increased level of danger when performing production operations typical for these industries, insufficient automation of processes and high levels of physical activity. A total of 562 people died in these three industries between 2019 and 2023.

Of particular concern is the sharp increase in deaths during mining and quarrying in 2023, when the death toll increased from 27 to 76 people. This fact may indicate man-made accidents, systemic safety violations, or insufficient effectiveness of control and supervision measures for compliance with safety regulations at mining enterprises. Comparison with statistics from other countries shows that the mortality rate in the mining industry of Kazakhstan significantly exceeds similar indicators in countries with a developed occupational safety and health system.

A relatively positive trend is observed in the agro-industrial sector, where in recent years there has been a decrease in the number of deaths at work. However, this trend may be partly due to changes in the structure of agricultural production and the statistical accounting system. In particular, there is a significant decrease in the proportion of agricultural workers covered by statistical observations, which is associated with an increase in the number of small enterprises, peasant (farmer) and personal subsidiary farms of the population, which do not always fully fall within the scope of official statistical reporting. At the same time, there was a reduction in the number of large agricultural organizations, which were traditionally the main objects of statistical observation (Abikenova, 2023).

Figure 3 shows the distribution of registered industrial accidents by main types of economic activity. The data obtained indicate the need to prioritize preventive and supervisory measures in industries with the highest level of occupational risk.

A comparative analysis shows that the level of fatal occupational injuries in Kazakhstan remains significantly higher than in the countries of the European Union. According to Eurostat, in 2022, the EU average was 1.76 cases per 100,000 employees, while, for example, in the Karaganda region, this figure exceeds 10 cases per 100,000 employees, which is several times higher than the EU average. This difference is explained by a number of factors, including shortcomings in economic development and the state of domestic industry, a low level of safety culture and the effectiveness of state control, etc. In the EU countries, much attention is paid to the prevention of occupational injuries, the introduction of modern technologies and the

formation of a safety culture in which each employee is aware of his responsibility for safety and adheres to safety regulations.

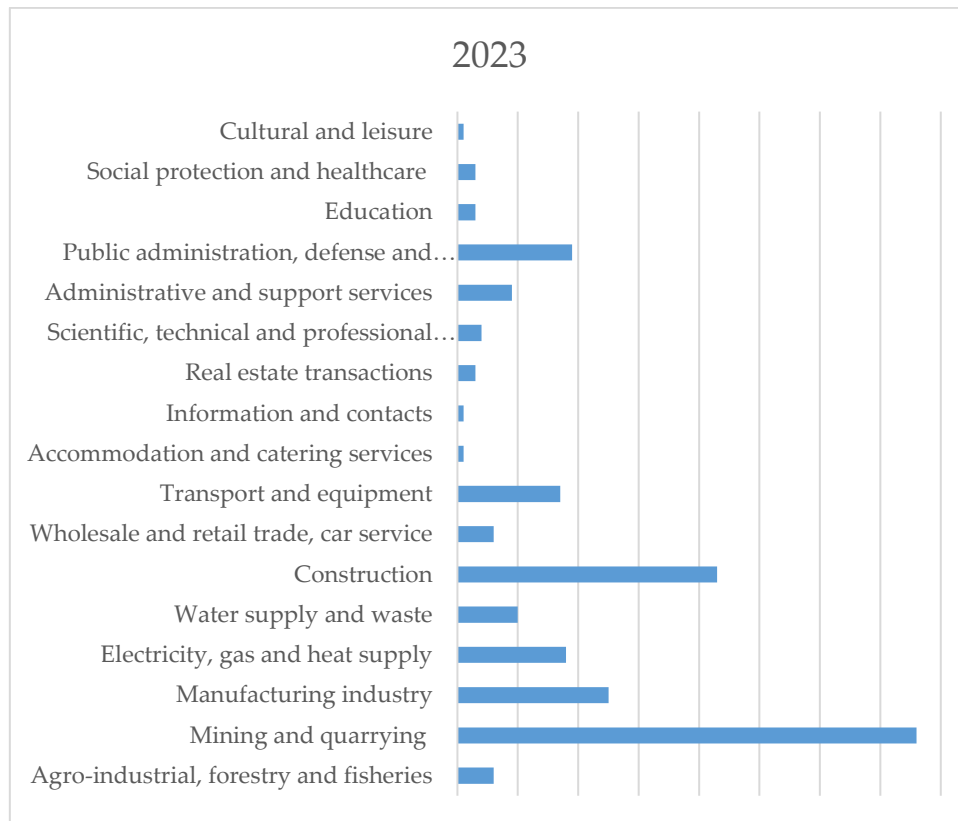


Figure 3. Deaths by type of economic activity in 2023

Note: compiled by the authors on the basis of data from the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan.

An analysis of domestic statistics also shows that a significant proportion of accidents occur in regions and enterprises with an insufficiently developed safety culture (Takala et al., 2014). In such organizations, there is often a lack of management attention to occupational safety issues, a low level of knowledge and awareness of workers about industrial risks, a lack of motivation to comply with safety requirements, as well as weak control over their implementation. The results obtained indicate the need for a more detailed analysis of the causes of occupational injuries, among which there is an insufficient assessment of occupational risks, the inconsistency of the applied preventive measures with the nature of existing industrial threats and an insufficiently developed occupational safety management system. In conditions where workers are not fully aware of the potential dangers and do not comply with established safety requirements, the likelihood of serious occupational injuries increases significantly.

Industries with a high proportion of manual labor, insufficient mechanization, work in difficult conditions (for example, in underground mines) and direct contact with dangerous equipment and substances are most at risk. During construction and installation work, the risk of falling from a height, injury when working with heavy machinery, and exposure to hazardous materials is particularly high. For example, accidents related to falling from heights prevail in the construction industry of Kazakhstan. In underground mines, where work is often carried out in confined spaces, with poor visibility and the presence of dangerous gases, there is a high probability of rock collapse, gas explosions and coal dust. The operation of heavy machinery used

in construction, mining and other industries is also associated with an increased risk of injury, and the main risks associated with the operation of heavy machinery (Nauka.kz, Liter, 2023). It is necessary to take into account the influence of socio-economic factors, such as low wages and shift work, which can negatively affect the motivation of employees to comply with the rules of OSH.

The analysis of official statistical data shows that the structure of occupational injuries in Kazakhstan is formed under the influence of both organizational and technological factors. According to the Ministry of Labor and Social Protection of the Population of the Republic of Kazakhstan and the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan, among the main causes of industrial accidents in recent years are: violation of occupational safety requirements, insufficient control over production processes and the use of outdated equipment.

Based on the analysis of statistical materials and industry reports, the causes of occupational injuries can be conditionally grouped into three main categories:

1. Organizational reasons. This group includes insufficient management control, non-compliance with occupational safety instructions, and insufficient training for employees in safe working practices. According to the State labor protection reports, it is the violation of safety requirements and industrial discipline that accounts for a significant proportion of reported accidents.

2. Technical and technological reasons. This group is related to the condition of the equipment, the level of mechanization and automation of production processes. In a number of industries in Kazakhstan, a significant proportion of manual operations remain, especially during equipment repairs, loading and unloading operations and maintenance of production facilities. The use of outdated production facilities and insufficient automation of technological processes increase the likelihood of injury to workers.

3. The human factor. This group includes staff errors, non-compliance with technological regulations, employee fatigue, and insufficient professional training. Such factors are widely considered in modern occupational safety research.

According to the International Labor Organization, an effective reduction in occupational injuries is possible only with an integrated approach, including the modernization of equipment, the introduction of automated safety control systems, digital technologies for monitoring hazardous areas and working conditions, as well as the development of a culture of safe behavior in enterprises. Modernization of technological processes and the introduction of engineering solutions, such as automated production lines, robotic complexes and emergency stop systems, play an essential role in this process. Practice shows that the introduction of modern technological solutions can significantly reduce the level of injuries in industrial enterprises.

Analysis of statistical materials and research results shows that the formation of occupational injuries is caused by a combination of organizational, technical and behavioral factors. The most common reasons include poor technical condition of the equipment, insufficient level of mechanization and automation of production processes, violation of technological discipline, as well as insufficient assessment of occupational risks in the workplace. An additional factor is an insufficiently formed occupational safety culture, manifested in non-compliance with the requirements of the instructions and insufficient awareness of workers about possible production risks. Such conditions increase the likelihood of dangerous situations and serious work injuries.

The data obtained indicate the need to implement comprehensive measures to reduce occupational injuries, which requires coordinated actions by the state, employers and employees. The key areas are the improvement of the briefing and production control system, the introduction of digital technologies (motion sensors, video surveillance systems and monitoring the use of personal protective equipment), as well as strengthening state and internal industrial

supervision, including improving the skills of inspectors, the introduction of an internal control system at enterprises and the application of stricter sanctions for violations of safety requirements. An important role is played by the formation of a safety culture at enterprises through the development of corporate standards, holding competitions for the best occupational health and safety management system, involving employees in safety processes, as well as regular training and advanced training of personnel. Of particular importance are engineering solutions aimed at modernizing production processes: the introduction of automated production lines and robotic complexes, the use of sensors and monitoring systems for hazardous areas of equipment, the use of locking devices and emergency stop systems, as well as the introduction of occupational health and safety management systems based on the International Organization for Standardization ISO 45001 standard. Practice shows that upgrading technological processes and increasing the level of automation can significantly reduce the number of injuries associated with manual labor and equipment operation (EU-OSHA, 2022).

CONCLUSION

Occupational accidents continue to be one of the most acute and urgent problems in the field of OSH both at industrial enterprises and at the state level as a whole. In these conditions, the formation of effective and scientifically based mechanisms for the prevention of occupational injuries, based on the analysis of statistical data, assessment of occupational risks and the introduction of modern engineering and organizational solutions, is of particular importance. An essential role in reducing injury rates is played by improving the occupational safety culture, developing a system for training employees in safe working methods, and developing sustainable skills for safe behavior in the workplace (Zhou, Fang, & Wang, 2008).

The analysis of statistical data for 2019-2023 showed that an unfavorable situation in the field of occupational injuries persists in the Republic of Kazakhstan. Despite the measures taken to improve the occupational safety and health management system, there has been a tendency to increase the total number of accidents at work during the period under review. The situation is particularly difficult in the Karaganda region, where for several years the highest rates have been recorded both in terms of the number of injured workers and the number of deaths. This is largely due to the industrial specialization of the region, which includes large enterprises of the mining and metallurgical industries, related to activities with a high level of occupational risk.

The analysis of the injury structure suggests that technical and organizational factors play a significant role in the formation of emergency situations. Among them, it is possible to single out the deterioration of a part of the production equipment, an insufficient level of automation of technological processes, the absence or insufficient effectiveness of automatic protection systems, as well as insufficient attention to issues of professional risk assessment and management. In some cases, the human factor also has an impact, including insufficient training of employees, non-compliance with the requirements of occupational safety instructions and an insufficiently formed culture of safe behavior at work.

International experience shows that a steady reduction in occupational injuries is achieved through the formation of a systematic approach to occupational safety management based on a combination of organizational, technical and engineering solutions, as well as the active involvement of employees in workplace safety processes (Armstrong, 2020). In modern conditions, the introduction of technological innovations aimed at reducing the impact of hazardous production factors and minimizing human involvement in potentially dangerous operations is of particular importance.

In order to increase the level of industrial safety and minimize occupational risks at enterprises in Kazakhstan, it seems advisable to focus efforts on the implementation of the following priority areas:

- improvement of the industrial safety system, including modernization of technological equipment, introduction of automated control systems, sensor and video surveillance systems, digitalization of monitoring processes in hazardous areas, as well as training and certification of personnel using modern training and simulation technologies;

- development of a comprehensive occupational risk assessment and management system that provides for regular identification of hazards, analysis of the likelihood of accidents, modeling possible industrial incidents and the development of effective response algorithms;

- implementation of modern engineering solutions aimed at improving the safety of equipment operation, including the use of automatic locking systems, sensors for monitoring process parameters, remote control and monitoring systems, as well as robotic complexes for performing the most dangerous production operations;

- the formation of a sustainable occupational safety culture, involving the active involvement of employees in occupational safety management processes, the development of mechanisms for motivating safe behavior, conducting training events and the introduction of corporate safety standards;

- a systematic analysis of the causes of industrial incidents, followed by the use of the results obtained to improve internal regulations and procedures for occupational safety management, including taking into account the requirements of regulatory acts of the Republic of Kazakhstan;

- regular assessment of the effectiveness of implemented measures aimed at determining their effectiveness, adjusting management decisions and adapting applied safety methods to changing production conditions.

Thus, a sustainable reduction in occupational injuries is possible only with the implementation of an integrated and multi-level approach, including the modernization of production equipment, the introduction of modern engineering and digital safety control technologies, the improvement of the occupational risk management system, as well as the formation of a high safety culture among employees. Coordinated actions by the state, employers and employees can create conditions for the formation of a safe and healthy working environment that meets modern industrial safety requirements and international labor protection standards.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare that there is no conflict of interest.

REFERENCES

- Armstrong, M. (2020). *Armstrong's handbook of human resource management practice* (15th ed.). http://lib.yzu.am/open_books/413644.pdf
- BS ISO 45001:2018. (2018). *Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use*. <https://acgih.ir/wp-content/uploads/2018/03/ISO-45001-2018.pdf>
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV). (2024). <https://www.dguv.de/de/index.jsp>
- European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). (2022). <https://www.fiec.eu/our-projects/current-projects/campaigns/european-agency-safety-and-health-work-eu-osha>
- Eurostat. (2023). *Accidents at work – statistics by economic activity*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_-_statistics_by_economic_activity
- Government of Ontario. (2024). *Ministry of Labour, Immigration, Training and Skills Development*. <https://www.ontario.ca/page/ministry-labour-immigration-training-skills-development>
- Leigh, J. P. (2011). Economic burden of occupational injury and illness in the United States. *Milbank Quarterly*, 89(4), 728–772. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0009.2011.00648.x>
- International Labour Organization. (2019). *Safety and health at the heart of the future of work: Building on 100 years of experience*. <https://safety4sea.com/wp->

- content/uploads/2019/05/ILO-Safety-and-health-at-the-heart-of-the-future-of-work-2019_05.pdf
- Sarybayeva, I. E., Amanova, G. D., Abikenova, Sh. K., & Aitimova, Sh. T. (2024). Analysis of economic losses from occupational injuries and occupational diseases. *Statistics, Accounting and Audit*, 3(94), 153–163. <https://doi.org/10.51579/1563-2415.2024.-3.12>
- International Labour Organization. (n.d.). *Statistics on safety and health at work*. <https://ilostat.ilo.org/topics/safety-and-health-at-work/>
- Takala, J., Hämmäläinen, P., Saarela, K. L., Yun, L. Y., Manickam, K., Jin, T. W., & Lin, G. S. (2014). Global estimates of the burden of injury and illness at work in 2012. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(5), 326–337. <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.863131>
- The Constitution of the Republic of Kazakhstan. (n.d.). https://www.akorda.kz/ru/official_documents/constitution
- The Labor Code of the Republic of Kazakhstan. (2015). <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1500000414>
- The Law of the Republic of Kazakhstan. (2005). Order No. 30 “On compulsory insurance of an employee against accidents in the performance of labor duties”. https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z050000030_
- Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan. (n.d.). <https://stat.gov.kz/>
- Vision Zero. (2024). The link to Vision Zero – EU strategic framework on health and safety at work 2021–2027. <https://visionzero.global/sites/default/files/2024-09/2-Vision%20Zero%20articles-03-Esler.pdf>
- Zhou, Q., Fang, D., & Wang, X. (2008). A method to identify strategies for improving human safety behavior considering safety climate and personal experience. *Safety Science*, 46(10), 1406–1419. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.10.005>
- Абикенова, Ш., Коваль, А., Лилия, Ш., Алимжан, Б., Шынар, А. (2023). Современные условия труда, уровень производственного травматизма на основе данных национальной статистики и других источников информации. *Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан*, 3(403), 281–297. <https://journals.nauka-nanrk.kz/bulletin-science/article/view/5583> // Abikenova, Sh., Koval, A., Liliya, Sh., Alimzhan, B., Shinar, A. (2023). Sovremennye usloviya truda, uroven proizvodstvennogo travmatizma na osnove dannykh natsional'noy statistiki i drugikh istochnikov informatsii [Modern working conditions and occupational injury rates based on national statistics and other sources]. *Vestnik Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan*, 3(403), 281–297. (In Russ.)
- Бакишев, К., Алихан, А. (2024). Травматизм при ведении горных или строительных работ: состояние, динамика, прогноз. *Вестник КазНУ. Серия юридическая*, 109(1), 98–112. <https://doi.org/10.26577/JAPJ2024109110> // Bakishev, K., & Alikhan, A. (2024). Travmatizm pri vedenii gornyykh ili stroitel'nykh rabot: sostoyanie, dinamika, prognoz [Injuries in mining and construction works: state, dynamics, forecast]. *Vestnik KazNU. Seriya yuridicheskaya*, 109(1), 98–112. (In Russ.)
- Жаксыбекова, Г. К., Бермагамбетова, Г. Н. (2021). Показатели травматизма, инвалидности и смертности от травм в Республике Казахстан за 2019–2020 годы. *Traumatology and Orthopaedics of Kazakhstan*, 60(4), 31–38. <https://doi.org/10.52889/1684-9280-2021-4-60-31-38> // Zhaksibekova, G. K., & Bermagambetova, G. N. (2021). Pokazateli travmatizma, invalidnosti i smertnosti ot travm v Respublike Kazakhstan za 2019–2020 gody [Indicators of injury, disability and mortality from injuries in Kazakhstan for 2019–2020]. *Traumatology and Orthopaedics of Kazakhstan*, 60(4), 31–38. (In Russ.)

- Лечиев, А. С. (2016). Роль «человеческого фактора» в обеспечении безопасности жизнедеятельности. Социально-гуманитарные знания, 6, 352–359. <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-chelovecheskogo-faktora-v-obespechenii-bezopasnosti-zhiznedeyatel'nosti/viewer> // Lechiev, A. S. (2016). Rol' «chelovecheskogo faktora» v obespechenii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti [The role of the human factor in ensuring life safety]. Sotsial'no-gumanitarnye znaniya, 6, 352–359. (In Russ.)
- Министр труда и социальной защиты населения Республики Казахстан. (2020). Приказ № 340 «Об утверждении Типовых правил системы управления охраной труда». <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2000021140> // Minister truda i sotsial'noy zashchity naseleniya Respubliki Kazakhstan. (2020). Prikaz № 340 «Ob utverzhdenii Tipovykh pravil sistemy upravleniya okhranoy truda» [Order No. 340 “On approval of standard occupational safety management system rules”]. (In Russ.)
- Министр труда и социальной защиты населения Республики Казахстан. (2020). Приказ № 363 «Об утверждении Правил управления профессиональными рисками». <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2000021197> // Minister truda i sotsial'noy zashchity naseleniya Respubliki Kazakhstan. (2020). Prikaz № 363 «Ob utverzhdenii Pravil upravleniya professional'nymi riskami» [Order No. 363 “On approval of occupational risk management rules”]. (In Russ.)
- Москвина, М. С. (2024). Состояние производственного травматизма с тяжелыми последствиями в разрезе субъектов Российской Федерации. Экономика труда, 11(9), 1507–1526. <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-proizvodstvennogo-travmatizma-s-tyazhelymi-posledstviyami-v-razreze-subektov-rossiyskoy-federatsii/viewer> // Moskvina, M. S. (2024). Sostoyanie proizvodstvennogo travmatizma s tyazhelymi posledstviyami v razreze sub"ektov Rossiyskoy Federatsii [Occupational injuries with severe consequences by regions of the Russian Federation]. Ekonomika truda, 11(9), 1507–1526. (In Russ.)
- Организация Объединенных Наций. (2015). Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/2030_Agenda_ru.pdf // Organizatsiya Ob"edinennykh Natsiy. (2015). Preobrazovanie nashego mira: Povestka dnya v oblasti ustoychivogo razvitiya na period do 2030 goda [Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development]. (In Russ.)
- Оспанова, К. Ш. (2012). Медико-социальные проблемы травматизма в Республике Казахстан. Медицина и экология, 1(62), 44–45. // Ospanova, K. Sh. (2012). Mediko-sotsial'nye problemy travmatizma v Respublike Kazakhstan [Medical and social problems of injuries in the Republic of Kazakhstan]. Meditsina i ekologiya, 1(62), 44–45. (In Russ.)
- Чуранова, А. Н. (2015). Соккрытие несчастных случаев на производстве: причины и последствия. Медицина труда и промышленная экология, 9, 152–153. // Churanova, A. N. (2015). Sokrytie neschastnykh sluchaev na proizvodstve: prichiny i posledstviya [Concealment of occupational accidents: causes and consequences]. Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya, 9, 152–153. (In Russ.)
- Электронное издание «Liter». (2023). Почему казахстанцы травмируются на производстве? <https://liter.kz/pochemu-kazakhstantsy-travmiruiutsia-na-proizvodstve-1690258223/> // Elektronnoe izdanie “Liter”. (2023). Pochemu kazakhstantsy travmiruyutsya na proizvodstve? [Why do Kazakhstan citizens get injured at work?]. (In Russ.)
- Электронное издание «Nauka.kz». (2007). Изучение уровня производственного травматизма и профессиональных заболеваний. https://nauka.kz/page.php?page_id=108&id=16062 // Elektronnoe izdanie “Nauka.kz”.

(2007). Izuchenie urovnya proizvodstvennogo travmatizma i professional'nykh zabolevaniy [Study of occupational injury and disease levels]. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Курмашева Гулшат Рахметуллаевна – техника ғылымдарының магистрі, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан
Курмашева Гулшат Рахметуллаевна – магистр технических наук, Западно-Казакштанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан
Kurmasheva Gulshat Rakhmetullaevna – Master of Technical Sciences, West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan, Uralsk, Kazakhstan
e-mail: kurmasheva_gulshat@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4052-8830>



Ширванов Рашид Булатович – техника ғылымдарының кандидаты, Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университеті, Орал, Қазақстан
Ширванов Рашид Булатович – кандидат технических наук, Западно-Казакштанский инновационно-технологический университет, Уральск, Казахстан
Shirvanov Rashid Bulatovich – Candidate of Technical Sciences, West Kazakhstan University of Innovation and Technology, Uralsk, Kazakhstan
e-mail: wirvanov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7439-600X>



Камал Еркін Бақытжанұлы – техника ғылымдарының магистрі, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті, Орал, Қазақстан
Камал Еркін Бақытжанұлы – магистр технических наук, Западно-Казакштанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан
Kamal Yerkin Bakytzhanuly – Master of Technical Sciences, West Kazakhstan Agrarian and Technical University named after Zhangir Khan, Uralsk, Kazakhstan
e-mail: k_e_b_98@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5657-9312>

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_14



SRSTI 87.53.13

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR RECYCLING OF TECHNOGENIC WASTE

ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРДЫ ҚАЙТА ӨНДЕУДІҢ РЕСУРСТЫ ҮНЕМДЕЙТІН ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ӨЗІРЛЕУ

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕЦИКЛИНГА ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Irina Khlebnikova ¹, Nikolay Egorov ¹, Gulmira Baibekova ¹,

Damir Kurmangaliyev ², Gulzhaz Uazyrkhanova ^{2*},

¹Ulba Metallurgical Plant JSC, Oskemen, Kazakhstan

²D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Kazakhstan

*Corresponding author: Gulzhaz Uazyrkhanova, e-mail: guazyrhanova@edu.ektu.kz

Keywords:

Decontamination,
ultrasound, radioactivity,
uranium, waste, metal,
filter cloths, recycling.

ABSTRACT

The process of decommissioning uranium production equipment and technological tools leads to the formation and accumulation of metallic radioactive waste. The majority of this waste falls into the category of low-level radioactive waste and requires special conditions for storage. The use of ultrasonic treatment of TRW contributes to an increase in decontamination coefficients compared to traditional methods, while reducing the duration of the process. It has been established that the types of filter fabrics considered are subject to regeneration with the possibility of their subsequent use in industrial conditions. The effect of various solutions on the efficiency of the decontamination process of metal TROs has been studied. The possibility of single-stage cleaning of metal TROs in an ultrasonic field using HNO₃ solution to obtain commercial metal with surface contamination of less than 1 alpha particle/cm²·min at an acceptable level of less than 1.2 alpha particles/cm²·min has been demonstrated.

Түйінді сөздер:

Дезактивация,
ультрадыбыс,
радиоактивтілік, уран,
қалдықтар, металл, сүзгі
маталары, қайта өңдеу.

ТҮЙІНДЕМЕ

Уран өндіруде қолданылатын жабдықтар мен технологиялық қондырғыларды пайдаланудан шығару процесі металлдық радиоактивті қалдықтардың түзілуіне және жиналуына әкеледі. Бұл қалдықтардың басым бөлігі төмен деңгейлі радиоактивті қалдықтарға жатады және сақтау үшін арнайы жағдайларды талап етеді. ТРҚ-ны ультрадыбыстық өңдеуді қолдану дәстүрлі әдістермен салыстырғанда дезактивация коэффициенттерінің артуына және процесс уақытының қысқаруына ықпал етеді. Зерттеу нәтижелері бойынша қарастырылған сүзгі маталарының түрлері қайта өңдеуге жатады және оларды өнеркәсіптік жағдайда қайта пайдалануға болады. Металл ТРО-ларды дезактивациялау процесінің тиімділігіне әртүрлі ерітінділердің әсері зерттелді. HNO₃ ерітіндісін



© 2026 I. Khlebnikova, N. Egorov, G. Baibekova, D. Kurmangaliyev, G. Uazyrkhanova

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

қолдана отырып, ультрадыбыстық өрісте металл ТРО-ларды бір сатылы тазалау арқылы бетіндегі ластану деңгейі 1 альфа бөлшек/см²·мин-нен аз, қабылдалатын 1,2 альфа бөлшек/см²·мин-ден төмен коммерциялық металл алу мүмкіндігі көрсетілді.

Ключевые слова:

Дезактивация,
ультразвук,
радиоактивность, уран,
отходы, металл,
фильтровальные полотна,
рециклинг.

АННОТАЦИЯ

Процесс вывода из эксплуатации оборудования и технологической оснастки уранового производства приводит к образованию и накоплению металлических ТРО. Основная доля которых, относится к категории низкоактивных РАО и требует обеспечения особых условий. Применение ультразвуковой обработки ТРО способствует увеличению коэффициентов дезактивации по сравнению с традиционными методами, при этом продолжительность процесса сокращается. Установлено, что рассмотренные типы фильтровальных тканей подлежат регенерации с возможностью последующей их эксплуатации в промышленных условиях. Изучено влияние различных растворов на эффективность процесса дезактивации металлических ТРО. Показана возможность одностадийной очистки металлических ТРО в УЗ поле с использованием раствора HNO₃ для получения товарного металла с поверхностным загрязнением менее 1 альфа-частицы/см²·мин при допустимом уровне менее 1,2 альфа-частицы/см²·мин.

INTRODUCTION

An analysis of the energy sector indicates that nuclear power offers significant advantages over conventional fossil fuel-based energy systems in terms of fuel efficiency, pollutant emissions, and waste generation (Fraenkl et al., 2022; Fränkle et al., 2023; Grković & Doder, 2022; Gurau D. et al., 2023). At the same time, the key factor governing the advancement and optimization of all stages of nuclear energy development is the environmental impact associated with the operation of nuclear fuel cycle (NFC) facilities. The environmental effects of NFC enterprises are diverse and include land allocation for infrastructure development, large-scale withdrawal of freshwater for industrial use, discharges of non-radioactive toxic substances, and long-term storage of radioactive liquid and solid wastes. Consequently, NFC enterprises place particular emphasis on improving methods for radioactive waste management and processing. This approach contributes to the achievement of global sustainable development goals and, in turn, enhances the competitiveness of nuclear energy relative to other energy sources.

Currently, Kazakhstan ranks among the world's leading uranium producers; therefore, the issue of radioactive waste (RW) conversion remains highly relevant. An analysis of the environmental impacts of NFC enterprises has shown that the most challenging aspect is the safe decommissioning of radioactive materials, particularly with respect to their processing and compliance with regulatory limits for radioactive contamination. In addition, the relevance of this issue is driven by several factors:

- the substantial volume of accumulated and newly generated radioactive waste, which raises concerns among the public and regulatory authorities due to the potential radiation hazards associated with RW storage facilities;
- the need to improve existing radioactive waste management practices in response to stricter regulatory requirements and increasingly stringent environmental standards;
- the growing influence of society on decision-making related to environmental aspects of activities carried out by nuclear industry organizations.

The annual accumulation of waste generated by NFC enterprises amounts to tens of thousands of kilograms, while the concentration of valuable components in such waste often

exceeds that found in primary ore materials. Accordingly, the strategic objective is the maximum recycling of technogenic raw materials, which enables the following outcomes:

- increased efficiency in the use of non-renewable natural resources and conservation of depleting mineral reserves;
- enhanced labor productivity through economically viable processing of materials withdrawn from technological production cycles;
- reduction or elimination of sources of environmental contamination;
- development of low-waste, low-operation, and energy-efficient technological processes.

Radioactive contamination of metallic material surfaces is primarily governed by intermolecular interactions, chemical bonding, and various sorption mechanisms, including physical adsorption, cation exchange, chemisorption, and absorption. In general, the extent of contamination depends on the physicochemical properties of the material undergoing decontamination, the condition of its surface, and the nature of the contaminants (Hagedorn et al., 2022).

At present, decontamination methodologies employ a broad range of techniques for radionuclide removal from surfaces. In addition to simple methods, such as surface wiping or mechanical brushing, more advanced technologies requiring specialized equipment are widely applied. In practice, combined physicochemical and mechanical approaches are most commonly used (Liu et al., 2022; Nakahara et al., 2024). Alternative decontamination methods include electropolishing, ultrasonic cleaning, and metal melting.

Ultrasonic (US) cleaning is based on the conversion of high-frequency acoustic energy into mechanical vibrations. From a physical perspective, the fundamental principles governing sound wave propagation are identical across frequency ranges; however, ultrasonic waves exhibit distinct characteristics due to their high frequencies and correspondingly short wavelengths. The primary nonlinear phenomenon occurring in an ultrasonic field is cavitation, during which pulsating bubbles form in a liquid, containing vapor, gaseous products, or their mixtures (Zhang et al., 2025; Zupanc et al., 2023). Depending on the type and characteristics of contamination, cavitation manifests through micro-impact effects, microstreaming, and localized temperature increases.

In technologies for processing uranium-containing compounds, specific types of filter fabrics are employed at various stages (Dubrovskiy & Zenkov., 2024; Kulagina & Shelenkova., 2017). These materials differ in both composition and operating principles and include cotton-based and synthetic fabrics.

During operation, the hydraulic resistance of filter fabrics progressively increases, resulting in a decrease in filtration rate. To maintain the required permeability within specified limits, filter elements are periodically replaced or regenerated (Kuznetsova., & Sakhnenko, 2022; Savkin et al., 2007). Regeneration allows for partial or complete removal of deposited sediments and restoration of the original filtration properties.

Previous studies have reported the decontamination of glass-fiber filters, which serve as alternatives to Petryanov filters used for the removal of technological gaseous wastes generated during the process cycle of FSUE "Mayak Production Association". The proposed decontamination approach involves ultrasonic treatment of glass-fiber filters in nitric acid solutions at elevated temperatures. This method enables the removal of up to 98% of radionuclides from the treated material and provides near-complete recycling of valuable components (Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, 2013).

Optimization of acoustic field parameters, physicochemical properties of the cleaning solution, gas content, and external conditions such as pressure and temperature allows effective

control of the contamination removal process across a wide range of materials and contamination types (Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan, 2020). An additional intensifying factor in refining processes is the acoustic capillary effect, which facilitates penetration of the decontaminating agent into microcracks and pores. Moreover, the mechanical effects of ultrasound significantly enhance dissolution processes and particle detachment from treated surfaces.

The primary objective of this study was to evaluate the efficiency of ultrasonic cleaning for the decontamination of various radioactive materials used in the processing of uranium-containing compounds at Ulba Metallurgical Plant JSC, to identify optimal treatment media, and to assess the feasibility of material recycling after decontamination.

MATERIALS AND METHODS

When deciding on the necessity of decontamination of various materials, the feasibility of the procedure is assessed by substantiating its benefits in relation to the associated costs, as well as by analyzing the amount of secondary waste generated and available disposal methods. At the same time, the level of residual contamination of the materials after decontamination must ensure the safety of personnel and the environment. In accordance with the requirements of Clause 13 of the Sanitary Rules for Ensuring Radiation Safety (SP SETORB) (Grković & Doder, 2022), the following conditions must be met when releasing a batch of scrap metal:

1. the ambient equivalent dose rate (gamma radiation) from the surface of the scrap does not exceed $0.2 \mu\text{Sv/h}$ above the natural background radiation level;
2. the alpha radiation surface contamination density does not exceed 0.04 Bq/cm^2 ;
3. the beta radiation surface contamination density does not exceed 0.4 Bq/cm^2 .

In conducting the present study, the regulatory framework of the Russian Federation was applied. According to document (Liu et al., 2022), a beta surface contamination level of 0.4 Bq/cm^2 corresponds to $12 \text{ particles}/(\text{cm}^2\cdot\text{min})$, while an alpha contamination level of 0.04 Bq/cm^2 corresponds to $1.2 \text{ particles}/(\text{cm}^2\cdot\text{min})$.

The objects selected for decontamination in this study included:

- filter fabrics of various grades used in the processing of natural and enriched uranium;
- scrap metal and structural components manufactured from different steel grades.

Two conceptual approaches were considered during the studies conducted at Ulba Metallurgical Plant JSC:

- “deep” decontamination of filter fabrics aimed at reducing the residual radionuclide content, followed by disposal of the treated materials;
- regeneration of filter fabrics for their subsequent reuse in the technological process.

The objects of investigation comprised two types of filter fabrics used in the filtration stages of uranium-containing solution processing: polypropylene fabric (art. 1002k) and cotton-polyester fabric (art. 2411). Samples of decommissioned filter fabrics collected from several production areas were used to develop decontamination regimes. During the experiments, optimal decontamination conditions for filter fabrics were determined, with particular emphasis on the effects of washing solution composition and ultrasonic treatment duration.

The experimental studies were carried out using the following equipment: an ultrasonic decontamination unit, model MO-646 (manufactured by Alexander Plus, Russia), and a laboratory ultrasonic bath Laborette-17 (FRITSCH).

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 presents fragments illustrating the fiber structure of the filter fabrics before and after the washing process.

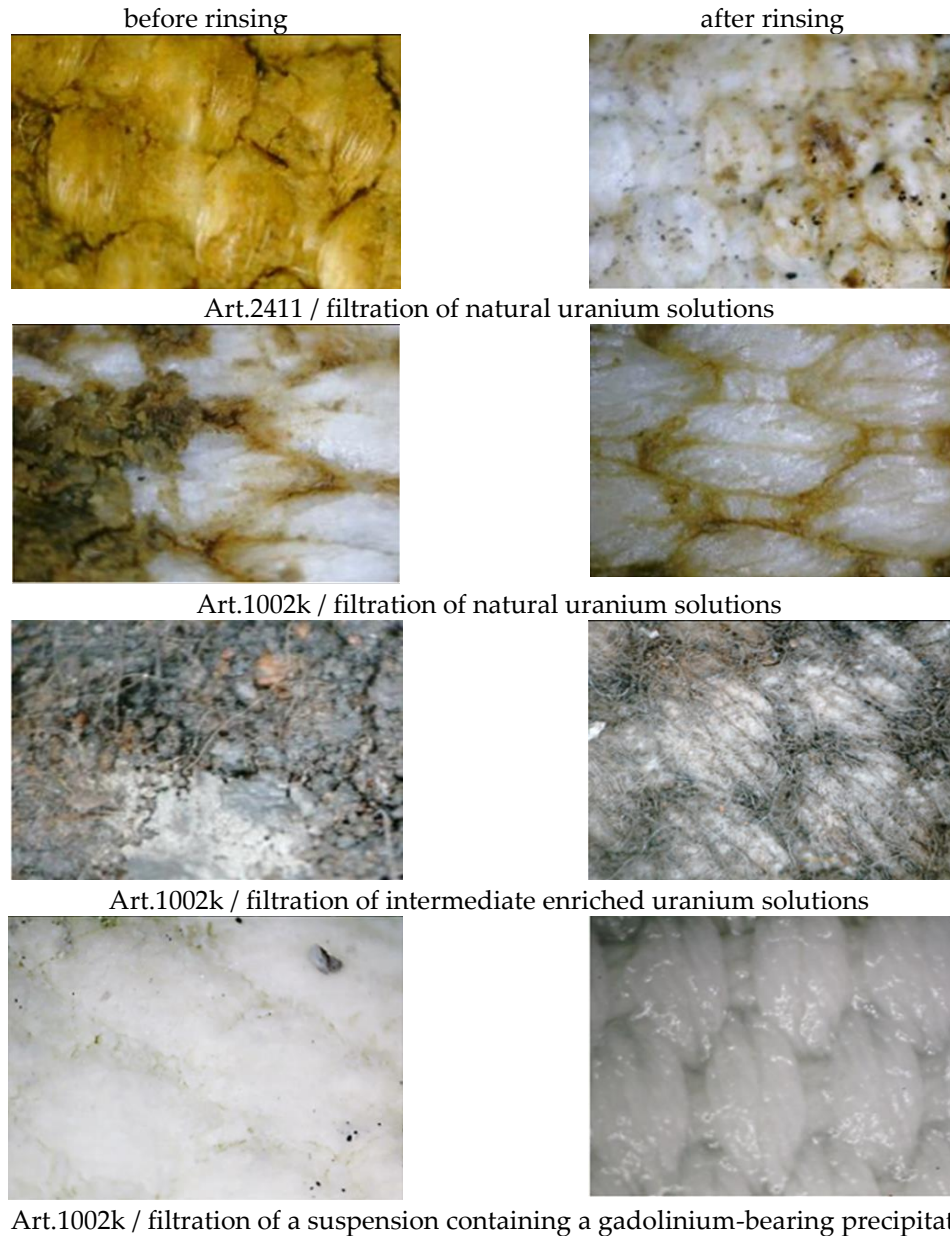


Figure 1. Fragments of filter fabrics from different technological operations before and after decontamination

Note – prepared by the authors

Based on the results of the conducted experiments, optimal decontamination regimes for various filter fabrics were determined. It was established that, for a given duration of ultrasonic treatment and under media of specified composition, the uranium content in filter fabrics can be reduced by a factor of 7 to 70, depending on the initial degree of contamination, achieving uranium concentrations in the material below 0.3 wt.%.

In studies aimed at assessing the feasibility of reusing regenerated filter fabrics, material samples treated by different methods under optimal regimes were employed. The quality criteria for regeneration included water permeability and the content of suspended solids in the filtrates.

Water permeability was evaluated based on the filtration rate of uranium-containing suspensions through the above-mentioned types of filter fabrics. Filtration quality (i.e., the

efficiency of dispersed phase separation) using regenerated filter fabrics was assessed by measuring the optical density of the filtrates with a KFK-2MP photocolormeter.

The obtained results indicate that regeneration efficiency is largely determined by the physicochemical composition of the deposits forming a layer of solid particles on the surface of the filter fabric and/or retained within the pores of the material during filtration of suspensions from different technological units.

Experimental studies demonstrated that all investigated types of filter fabrics, when treated under the most effective processing conditions, can be successfully regenerated and subsequently reused under industrial operating conditions.

Depending on the type of filter fabric and the technological unit in which it is applied, the mass concentration of dissolved uranium in the washing solutions, which represent a suspension, may vary from 0.2 to 1.8 g/L. Processing of solutions generated during filter fabric regeneration should be carried out by sedimentation of the solid phase followed by decantation of the liquid. The resulting sediment is expediently directed to the appropriate processing unit.

When considering radioactive metal waste, it should be noted that the suitability of metals for repeated reuse in the manufacture of new products makes them an important industrial raw material. The absence of effective technologies for the processing and disposal of radioactive metal waste accumulated during the hydrometallurgical processing of uranium-containing raw materials leads to a continuous increase in their volume. An additional challenge arises from the need to perform repair operations on process equipment (e.g., pumps) during industrial operation, which is impossible without prior removal of radioactive contamination from equipment surfaces. Furthermore, certain equipment components and auxiliary fixtures are periodically decommissioned and/or dismantled, resulting in the generation of significant amounts of metal waste, a substantial portion of which contains residual radioactive contamination. To ensure safe disposal of such materials and equipment after dismantling, decontamination is required.

In the experiments, carbon steel samples were treated with various solutions in an ultrasonic field. The compositions of the decontaminating solutions were as follows:

- industrial water;
- nitric acid solution with a concentration of 100 g/L;
- foaming agent solution with a concentration of 5 g/L.

The duration of a single treatment stage was 15 minutes, with a solid-to-liquid mass ratio of T:L = 1:3. After the specified treatment time, a fresh portion of solution was introduced. Following each ultrasonic treatment stage, the mass and thickness of the samples were measured, and the degree of reduction in these parameters was calculated. The obtained results are presented in Table 1.

Table 1. Changes in the parameters of St3-grade steel samples depending on the duration of treatment and the composition of the solution

Processing time, min	Composition of the solution					
	H ₂ O	HNO ₃	A/R	H ₂ O	HNO ₃	A/R
	Mass reduction, %			Thickness reduction, %		
15	0,03	8.14	0.01	0.07	6.69	1.70
30	0.04	17.89	0.02	0.58	8.52	2.01
45	0.04	27.97	0.03	0.65	27.54	2.25
<i>Note – prepared by the authors</i>						

Analysis of the results presented in Table 1 showed that treatment of the samples in nitric acid resulted in the maximum mass loss, reaching up to 28 wt.% of the initial sample mass.

The uranium concentration in the working solutions after decontamination was as follows:

- aqueous solutions: less than 0.003 g/L;
- nitric acid solutions: from 0.128 to 0.410 g/L;
- in foaming agent solutions, uranium concentration was not measured.

The efficiency of the decontamination process after three washing cycles was evaluated based on the residual surface contamination of the samples with alpha-emitting radionuclides. The corresponding values of decontamination efficiency (A_{eff}) and the decontamination coefficient (K_d) were calculated.

Fragments of the surface of a St3-grade steel sample before and after ultrasonic decontamination are shown in Figure 2.

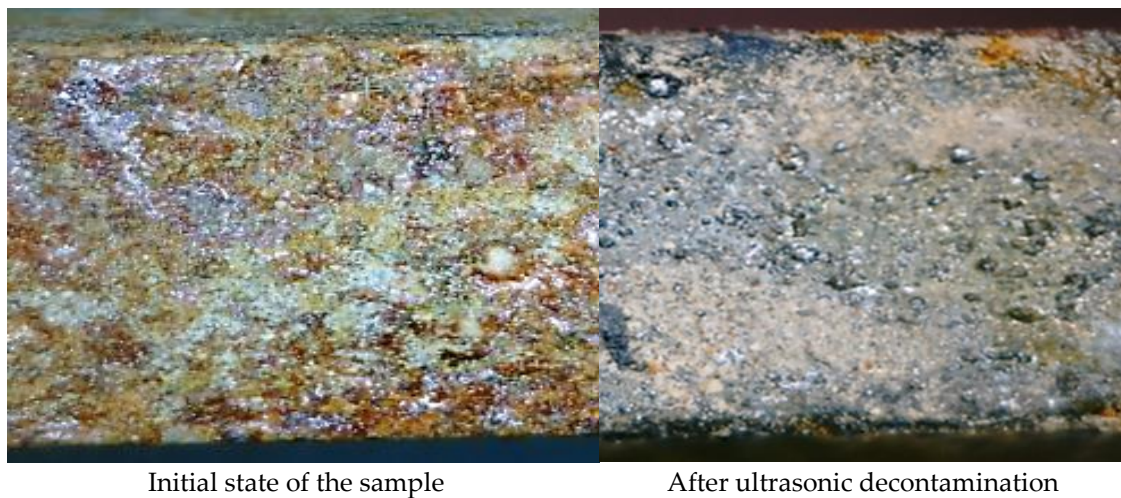


Figure 2. Macrostructural analysis of St3-grade steel sample surface fragments before and after washing

Note – prepared by the authors

As can be seen from the presented images, the initial surface of the sample is characterized by pronounced heterogeneity, as well as the presence of corrosion deposits and surface contaminants. After decontamination, a noticeable reduction in surface contamination, smoothing of the microrelief, and a decrease in the number of inclusions are observed, indicating the effectiveness of the applied washing method. The results of calculations and measurements are presented in Table 2.

Table 2. Effect of solution composition on the decontamination efficiency of St3-grade steel samples

Medium	Alpha particle flux density, particles/(cm ² ·min)	A_{eff} , %	K_d
No treatment	4.2	-	-
H ₂ O	1.8	57.1	2.3
HNO ₃	1.0	76.2	4.2
Foaming agent	1.2	71.4	3.5

Note – prepared by the authors

The results presented in Table 2 indicate that a nitric acid solution is the most effective aqueous agent for the decontamination of the examined sample. However, the significant mass losses of the treated material, reaching up to 28%, render decontamination in a nitric acid medium impractical. The use of a foaming agent solution under the specified processing conditions allows the stated objectives to be achieved.

CONCLUSIONS

It was established that the selection of the most effective regeneration regime for filter fabrics largely depends on the physicochemical composition of the solid phase removed from the solutions. The application of ultrasonic treatment during decontamination makes it possible to reduce the uranium content in filter fabrics by up to a factor of 70. The feasibility of reusing regenerated filter fabrics was investigated, and it was demonstrated that all examined types of filter fabrics are suitable for regeneration with the possibility of subsequent operation under industrial conditions.

The reuse of regenerated filter fabrics in technological processes can significantly extend their service life, reduce material consumption in the processing of uranium-containing compounds, and minimize the generation of radioactive waste. Overall, this contributes to the implementation of low-waste technologies at industrial facilities.

In the decontamination of radioactive metal waste, the influence of various solutions on the efficiency of the decontamination process was investigated. The possibility of single-stage ultrasonic cleaning of radioactive metal waste using an HNO₃ solution was demonstrated, enabling the production of marketable metal with surface contamination levels below the permissible limits.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest.

FUNDING: This article was prepared within the framework of research activities conducted at the Scientific Center of Ulba Metallurgical Plant JSC. The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992854).

ACKNOWLEDGMENTS: The authors express their gratitude to colleagues for methodological support and valuable discussions, as well as to the anonymous reviewers for their constructive comments that contributed to improving the quality of the manuscript.

STATEMENT ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES: The authors declare that artificial intelligence technologies were not used in the preparation of this manuscript

REFERENCES

- Fraenkl, M., et al. (2022). High-quality and easy-to-regenerate personal filter. *PLOS ONE*, 17(6), e0268542. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268542>
- Fränkle, B., et al. (2023). Tailings filtration: Water jet spray cleaning of a blinded iron ore filter cloth. *Minerals*, 13(3), 416. <https://doi.org/10.3390/min13030416>
- Grković, V. R., & Doder, Đ. D. (2022). Competitiveness of power systems with nuclear power plants and with high participation of intermittent renewable energy sources. *Thermal Science*, 26(3A), 2093–2102. <https://doi.org/10.2298/TSCI210214157G>
- Gurau, D., et al. (2023). Minimizing radioactive waste through chemical decontamination techniques. *Romanian Journal of Physics*, 68(7–8).
- Hagedorn, W., et al. (2022). More than recycling: The potential of the circular economy shown by a case study of the metal working industry. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134439>

- Liu, S., et al. (2022). A state-of-the-art review of radioactive decontamination technologies: Facing the upcoming wave of decommissioning and dismantling of nuclear facilities. *Sustainability*, 14(7), 4021. <https://doi.org/10.3390/su14074021>
- Nakahara, M., et al. (2024). Ultrasound-assisted removal of contaminants on stainless steel surfaces using nitrogen ultrafine bubble water. *Progress in Nuclear Energy*, 172, 105195. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.105195>
- Zhang, Y., et al. (2025). Research on decontamination test of radioactive metal items based on ultrasound and electrochemistry. In *Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering* (pp. 757–769). Springer Nature Singapore.
- Zupanc, A., et al. (2023). Sustainable and selective modern methods of noble metal recycling. *Angewandte Chemie International Edition*, 62(5), e202214453. <https://doi.org/10.1002/anie.202214453>
- Dubrovskiy, K. V., & Zenkov, A. V. (2024). Methods of decontamination: advantages and disadvantages. In *Butakov Readings – 2024: Proceedings of the IV All-Russian Youth Conference with International Participation* (Tomsk, December 10–12, 2024). Tomsk Polytechnic University (in Russian).
- Kulagina, T. A., & Shelenkova, V. V. (2017). Methods for decontamination of surfaces contaminated with radioactive substances. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 10(3), 352–363.
- Kuznetsova, N. A., & Sakhnenko, O. A. (2022). Assessment of the possibility of decontamination of glass-fiber filters. *Radioactive Waste*, (3), 30–36.
- Savkin, A. E., Karlina, O. K., Vasiliev, A. P., et al. (2007). Testing of an ultrasonic installation for decontamination of metallic radioactive waste. *Environmental Safety*, (3), 38–41.
- Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (2013). On the organization of work for implementation of the Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation (Resolution No. 43 dated September 16, 2013).
- Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan (2020). Sanitary and epidemiological requirements for ensuring radiation safety (Order No. ҚР ДСМ-275/2020 dated December 15, 2020; reg. No. 21822).

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Хлебникова Ирина Анатольевна – Томск политехникалық университетінің 2.4.9 «Ядролық энергетикалық қондырғылар, отын циклі, радиациялық қауіпсіздік» мамандығы бойынша 3-курс аспиранты.

Хлебникова Ирина Анатольевна – аспирант 3 курса специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность Томского Политехнического университета.

Irina Anatolyevna Khlebnikova – third-year postgraduate student in the specialty 2.4.9 “Nuclear Power Plants, Fuel Cycle, and Radiation Safety” at Tomsk Polytechnic University.

e-mail: KhlebnikovaIA@ulba.kz

ORCID:<https://orcid.org/0009-0000-7562-4289>



Егоров Николай Борисович – химиялық ғылымдар кандидаты, доцент, Ядролық отын циклі кафедрасы, Ядролық инженерия мектебі, Томск политехникалық университеті.

Егоров Николай Борисович - кандидат химических наук, доцент Отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Томского политехнического университета.

Egorov Nikolay Borisovich – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Nuclear Fuel Cycle Department, School of Nuclear Engineering, Tomsk Polytechnic University.

e-mail: egorov@tpu.ru



Байбекова Гүлмира Смайылқызы – Ұлттық ядролық зерттеулер университеті «МЭФИ»-нің «Ядролық өнеркәсіптегі менеджмент» мамандығы бойынша 2-курс магистранты.

Байбекова Гүлмира Смаиловна – магистр 2 курса специальности «Управление в атомной отрасли» НИЯУ «МИФИ».

Baibekova Gulmira Smailovna – Master's student, 2nd year, specialising in 'Management in the Nuclear Industry' at the National Research Nuclear University MEPHI

e-mail: cuieoma@mail.ru



Курманғалиев Дамир Болатович – Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің постдокторанты, Өскемен, Қазақстан.

Курманғалиев Дамир Болатович – постдокторант Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан.

Damir Bolatovich Kurmangaliyev – Postdoctoral researcher at D.Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

e-mail: dkurmangaliyev@edu.ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5022-696X>



Уазырханова Гүлжаз Кенесханқызы – PhD, қауымдастырылған профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Уазырханова Гүлжаз Кенесханқызы – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Gulzhaz Keneskhankyzy Uazyrhanova – PhD, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: guazyrhanova@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9817-9752>

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_1_15

SRSTI 55.22.23

STUDIES OF THE STRUCTURAL AND PHASE STATE OF DETONATION COATINGS BASED ON THE Fe-TiB₂-CrB₂ EUTECTIC SYSTEM AFTER PULSE PLASMA TREATMENT

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО И ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЭВТЕКТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ Fe-TiB₂-CrB₂ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМАЛЫҚ ӨНДЕУ ДЕН КЕЙІН Fe-TiB₂-CrB₂ ЭВТЕКТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕСІ НЕГІЗІНДЕГІ ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ ЖАБЫНДАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЖӘНЕ ФАЗАЛЫҚ КҮЙІН ЗЕРТТЕУ

Daur Kakimzhanov ^{1,2*}, Arystanbek Kussainov ¹, Indira Abizhanova ¹

¹NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²LLP «PlasmaScience», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

*Corresponding author: Daur Kakimzhanov, e-mail: daur_97@mail.ru

Keywords:

pulsed-plasma treatment, coatings, phase composition, structure, detonation sprayin, hardness, eutectic system, wear.

ABSTRACT

Fe-TiB₂-CrB₂ coatings obtained by detonation spraying were modified by pulsed plasma treatment (PPT) to improve their structural and operational properties. A comprehensive analysis of the phase composition, microstructure, microhardness, wear resistance, and corrosion behaviour was performed. X-ray structural analysis confirmed the preservation of the α-Fe, TiB₂ and CrB₂ phases after treatment, with a simultaneous decrease in the proportion of γ-Fe and Cr₂₃C₆ and a redistribution of boride phases. Electron microscope studies revealed a densification of the surface layer and a decrease in interlamellar porosity. Microhardness in the near-surface zone increased from ~15 to 17–18 GPa (by 15–20%), indicating local strengthening. Tribological tests showed a decrease in wear depth, while electrochemical studies revealed a positive shift in corrosion potential by 0.15–0.20 V and a decrease in the rate of anodic dissolution. PPT provides an improvement in mechanical and corrosion characteristics without changing the basic phase composition of the coating.

Түйінді сөздер:

импульсно-плазменная обработка, покрытия, фазовый состав, структура, детонационное напыление, твёрдость, эвтектическая система, износ.

ТҮЙІНДЕМЕ

Покрытия Fe-TiB₂-CrB₂, полученные методом детонационного напыления, были модифицированы с помощью импульсно-плазменной обработки (PPT) с целью улучшения их структурных и эксплуатационных свойств. Проведен комплексный анализ фазового состава, микроструктуры, микротвердости, износостойкости и коррозионного поведения. Рентгеноструктурный анализ подтвердил сохранение фаз α-Fe, TiB₂ и CrB₂ после обработки, при одновре-



© 2026 D. Kakimzhanov, A. Kussainov, I. Abizhanova

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

менном снижении доли γ -Fe и Cr_{23}C_6 , а также перераспределении боридных фаз. Исследования с использованием электронного микроскопа выявили уплотнение поверхностного слоя и уменьшение межламеллярной пористости. Микротвердость в приповерхностной зоне увеличилась примерно с 15 до 17–18 ГПа (на 15–20 %), что свидетельствует о локальном упрочнении. Трибологические испытания показали снижение глубины износа, а электрохимические исследования выявили положительное смещение коррозионного потенциала на 0,15–0,20 В и снижение скорости анодного растворения. Импульсно-плазменная обработка обеспечивает улучшение механических и коррозионных характеристик без изменения основного фазового состава покрытия.

Ключевые слова:

импульстік-плазмалық өңдеу, жабындар, фазалық құрам, құрылым, детонациялық бүрқу, қаттылық, эвтектикалық жүйе, тозу.

АННОТАЦИЯ

Детонациялық бүрқу әдісімен алынған Fe–TiB₂–CrB₂ жабындары олардың құрылымдық және пайдалану қасиеттерін жақсарту мақсатында импульстік-плазмалық өңдеуге (PPT) ұшыратылды. Фазалық құрамы, микроқұрылымы, микроқаттылығы, тозуға төзімділігі және коррозиялық мінез-құлқы кешенді түрде талданды. Рентгенқұрылымдық талдау өңдеуден кейін α -Fe, TiB₂ және CrB₂ фазаларының сақталғанын растады, сонымен қатар γ -Fe мен Cr_{23}C_6 үлесінің төмендеуі және боридтік фазалардың қайта бөлінуі анықталды. Электрондық микроскопиялық зерттеулер беттік қабаттың тығыздалғанын және қабатаралық кеуектіліктің азайғанын көрсетті. Бетке жақын аймақтағы микроқаттылық шамамен 15-тен 17–18 ГПа-ға дейін артты (15–20%-ға), бұл жергілікті беріктенуді көрсетеді. Трибологиялық сынақтар тозу тереңдігінің төмендегенін көрсетті, ал электрохимиялық зерттеулер коррозиялық потенциалдың 0,15–0,20 В-қа оң ығысқанын және анодтық еру жылдамдығының төмендегенін анықтады. Импульстік-плазмалық өңдеу жабынның негізгі фазалық құрамын өзгертпей, оның механикалық және коррозиялық сипаттамаларын жақсартуды қамтамасыз етеді.

INTRODUCTION

In modern industries—mechanical engineering, energy, metallurgy, and transport construction—the resource intensity and durability of structural components remain key factors in technological and economic efficiency (Bhushan & Ko, 2003; Shapagina & Dushik, 2024). Operating conditions for equipment are increasingly characterised by high contact pressures, increased abrasive and adhesive wear, elevated temperatures and aggressive environments, leading to a rapid deterioration in the performance of machine components and assemblies (Shtansky et al., 2005). The increasing demands placed on equipment today, characterised by the combined effects of extremely high temperatures, corrosion and wear, mean that conventional hardening methods—such as solution treatment, changes to component geometry or standard heat treatment—are insufficient to ensure durability (Kiryukhantsev-Korneev et al., 2017).

One of the most promising areas of surface engineering is the application of protective coatings using detonation gun spraying (D-Gun) (Panarin et al., 2016), which provides dense, adhesion-stable layers with minimal porosity and good microstructural bonding between the coating particles and the substrate. This technology allows the formation of coatings with high hardness and wear resistance without significant thermal impact on the substrate, which is critical for thin-walled and heat-sensitive components.

In recent years, detonation coatings based on Fe–CrB₂–TiB₂ have been considered as a hard and extremely wear-resistant alternative to traditional carbide and oxide coatings for parts

operating under conditions of abrasive wear, impact abrasion and friction (Prysyazhnyuk et al., 2025; Shtansky et al., 2005). The demand for these compositions stems from the fact that the refractory compounds TiB_2 and CrB_2 provide exceptional hardness and structural stability under high-temperature conditions. At the same time, the ductile iron base acts as a plastic matrix, which effectively fixes the dispersed strengthening phases and forms a strong framework that prevents brittle fracture. The use of iron also ensures high adhesion and the processability of the coating application, allowing reliable protective layers to be produced using various spraying methods (Wang et al., 2021). In detonation spraying, the high particle velocity contributes to the formation of a lamellar structure with alternating areas of iron matrix and boride phases, which creates a combination of high hardness and resistance to abrasive wear with a moderate tendency to brittle fracture. This is precisely the structural organisation described in recent studies on Fe– TiB_2 – CrB_2 detonation coatings, which emphasise the pronounced lamellar structure and the presence of alternating ‘layers’ of Fe matrix and refractory borides (Sharma et al., 2023; Liang et al., 2022).

The key problem with high-energy spraying is not the potential of the system itself, but the presence of structural heterogeneity and defects that can limit its service life: residual porosity (Rakhadilov et al., 2024), interlamellar boundaries with reduced strength, local microcracks, and ‘imperfect’ connectivity between the matrix and strengthening particles. For this reason, the most promising direction for Fe– CrB_2 – TiB_2 coatings has become the combined route of ‘detonation spraying + subsequent pulsed plasma treatment,’ since post-treatment allows the surface layer to be purposefully brought to a more stable state (Tyurin et al., 2001; Pogrebnyak & Tyurin, 2003; Rakhadilov et al., 2024).

The aim of this work is to conduct a comprehensive study of the structural and phase state of detonation coatings based on the eutectic system Fe– CrB_2 – TiB_2 after exposure to pulsed plasma treatment.

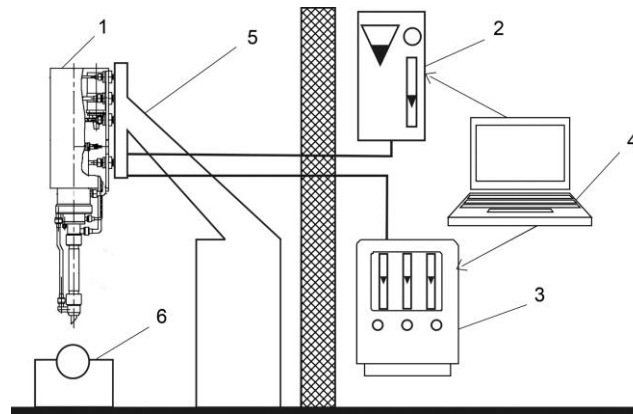
RESEARCH MATERIALS AND METHODS

Structural carbon steel 3 was used as a substrate due to its widespread use in mechanical engineering and agricultural machinery, as well as its satisfactory combination of strength characteristics, manufacturability and low cost. Before spraying, the samples were subjected to mechanical processing, degreasing and abrasive jet cleaning to ensure the required surface roughness. The functional protective layers were formed using a dispersed eutectic alloy, which is an iron-based system reinforced with refractory titanium and chromium diborides. Detailed information on the elemental composition of the cladding material is given in Table 2. The powder used consisted mainly of spherical granules, the size of which was within the range of up to 60 μm .

Table 1. Composition of Fe– TiB_2 – CrB_2 powder. (wt.%):

Fe	Ni, %	Cr, %	Ti, %	B, %	Al, %
base	6÷8	20,0÷20,5	2,4÷2,5	2,5÷2,6	5,6
<i>Note – compiled by the authors</i>					

The coating was applied using a multi-chamber detonation device (MCDD), in which powder particles are subjected to thermal exposure and accelerated to high speeds by the energy of the detonation combustion products of a propane-butane gas mixture with oxygen and air. The parameters of detonation spraying are shown in Table 2.



1 – multi-chamber detonation atomiser; 2 – powder feeder; 3 – low-pressure gas supply panel (max. 0.3 MPa) for supplying oxygen, propane-butane and air; 4 – automated process control system; 5 – automated manipulator for moving the multi-chamber detonation atomiser; 6 – sample holder

Figure 1. Diagram of a detonation device

Note – compiled by the authors

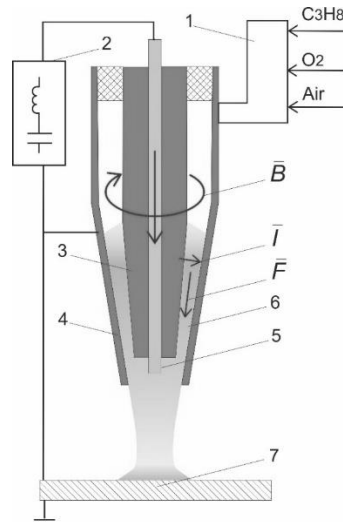
Table 2. Parameters of detonation spraying

Components of the mixture:		Consumption, m ³ /hour
1 chamber	O ₂	2.92
	air	1.33
	C ₃ H ₈	0.66
2 chamber	O ₂	2.93
	air	1.43
	C ₃ H ₈	0.66
Transport gas:		0,9
<i>Note – compiled by the authors</i>		

High-energy pulsed plasma was applied to improve the structural transformation of the formed detonation coatings. The generation of active pulses in the discharge device was based on the realization of transient detonation combustion regimes. The energy of a single pulse is approximately 4.9 kJ. The quantitative parameters of this pulsed plasma treatment (PPT) are show in Table 3.

Table 3. Parameters of pulsed plasma treatment

Parameter	Value
Voltage across the capacitor bank	3200 (V)
Capacitance of the discharge circuit capacitor bank	960 (μF)
Inductance of the discharge circuit	30(μH)
Frequency of plasma pulses	1.2(Hz)
Speed of plasma torch movement relative to the product	3,4 (mm/s)
Distance to the surface	60 (mm)
Number of passes	1
<i>Note – compiled by the authors</i>	



1 – detonation chamber, 2 – power source, 3,4 – coaxial electrodes, 5 – eroded electrode,
6 – plasma, 7 – sample

Figure 2. Diagram of a detonation device

Note – compiled by the authors

A X'Pert PRO system (PANalytical, Netherlands), equipped with a copper X-ray source, was used to perform the phase analysis. The experiment was carried out at operating parameters of 40 kV and 30 mA. Diffraction data in the Cu-K α spectrum ($\lambda=1.541 \text{ \AA}$) were collected over the range $2\theta=20\text{--}90^\circ$. The measurement was carried out using a step-by-step scanning method with a step size of 0.02° , with a signal exposure time of 0.5 s at each point. The experimental diffractograms were interpreted and phase identification was performed using the HighScore Plus software package (version 3.0.5). Scanning electron microscopy, carried out using a Tescan Vega 4 system (Czech Republic), was employed to study the morphology of the cross-sections of the formed protective layers. The anti-corrosion properties were evaluated in an electrolytic cell using a CS300 potentiostat-galvanostat. An aqueous sodium chloride solution (3.5% NaCl) was used as the working medium at a stabilised temperature of $25\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Measurements were carried out using the classical three-electrode configuration, where a silver-chloride cell (Ag/AgCl) served as the reference electrode and a platinum plate as the auxiliary electrode. Quantitative indicators of corrosion resistance, including the corrosion potential (E_{corr}) and current density (i_{corr}), were calculated based on the analysis of potentiodynamic curves using the Tafel extrapolation method. Polarisation curves were recorded over a potential range of $\pm 0.1 \text{ V}$ relative to the open-circuit potential (OCP) at a constant scan rate of 0.5 mV/s. To increase the statistical reliability of the study, it was performed on four samples with three repetitions for each. The experimental results were processed using the specialised software environment CS Studio 6, whose algorithms enable the automatic identification of the working segments of the Tafel curves and the calculation of key electrochemical constants. The microhardness values of the formed coatings were measured using the FISCHERSCOPE HM2000S measuring system (Helmut Fischer GmbH, Germany) in accordance with ASTM E2546. To achieve high reliability and account for possible structural heterogeneity in different zones of the cross-section, at least ten indentation tests were performed for each sample, followed by mathematical averaging of the final data. The tests were carried out at a load of 100 mN and a holding time of 10 s. The amount of wear was determined using a Leica DCM8 non-contact optical profilometer (Leica Microsystems, Wetzlar, Germany). Roughness parameters were evaluated using confocal microscopy with a Leica EPI 20 \times lens and Leica Scan 6.5 software. The obtained profilometric data were processed and analysed using the Mountains software package.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3 shows the X-ray diffraction spectra of coatings formed from an eutectic Fe–TiB₂–CrB₂ alloy using detonation spraying. The coating in its initial state (Fig. 3a) is characterised by the dominance of intense α -Fe lines, which indicates the predominant role of the ferrite base in the material structure. In addition, reflections of γ -Fe and the Cr₂₃C₆ carbide phase formed during the spraying process are observed. At the same time, the peaks corresponding to the refractory boride phases TiB₂ and CrB₂ are weakly expressed, which indicates the limited development of the eutectic structure due to the ultra-rapid cooling of the molten particles. After pulsed plasma treatment (Fig. 3b), a significant change in the phase composition is observed. The intensity of the TiB₂ and CrB₂ diffraction maxima increases noticeably, while the content of γ -Fe and Cr₂₃C₆ decreases. This transformation is due to the effect of high-energy pulses, which promote the additional formation of boride phases and structural relaxation of the coating. As a result of the modification, a more uniform eutectic structure develops, characterised by an increased concentration of dispersed high-hardness TiB₂ and CrB₂ particles distributed in the iron matrix.

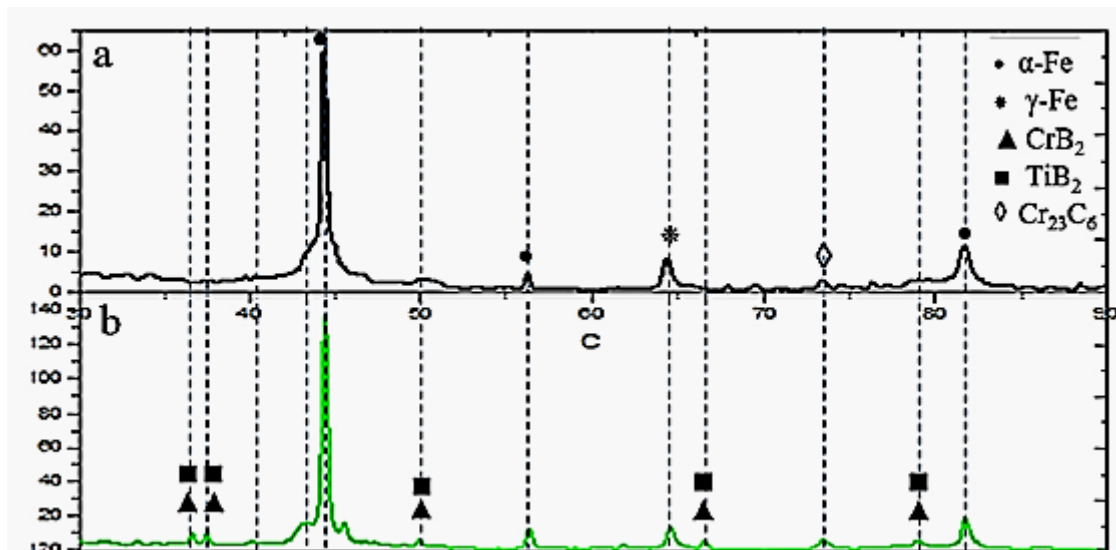


Figure 3. Results of X-ray diffraction analysis of Fe–TiB₂–CrB₂ coatings before (a) and after pulse plasma treatment (b)

Note – compiled by the authors

Figure 4 shows three-dimensional topographical images of wear traces on the Fe–TiB₂–CrB₂ coating system in its initial state (Fig. 4a) and after pulsed plasma treatment (Fig. 4b). The coating in its initial state (Fig. 4a) is characterised by the formation of a pronounced wear track with a noticeable depth and uneven profile. The 3D map shows local depressions and pronounced ridges at the edges of the track, indicating the development of plastic deformation and microcutting. The profilogram shows a significant amplitude of height fluctuations, indicating increased volumetric wear and unstable destruction of the surface layer. After pulse plasma treatment (Fig. 4b), the shape of the wear track becomes more uniform. The depth of the track decreases, the profile smoothes out, and the height differences at the edges of the track are reduced. The 3D image shows a more uniform surface without pronounced areas of chipping. This indicates a reduction in wear and an increase in resistance to plastic deformation. The results of tribological tests show that in the initial sample (before treatment), the average coefficient of friction of the coatings is ~0.56, whereas after PPT treatment, the coefficient of friction decreases to 0.53

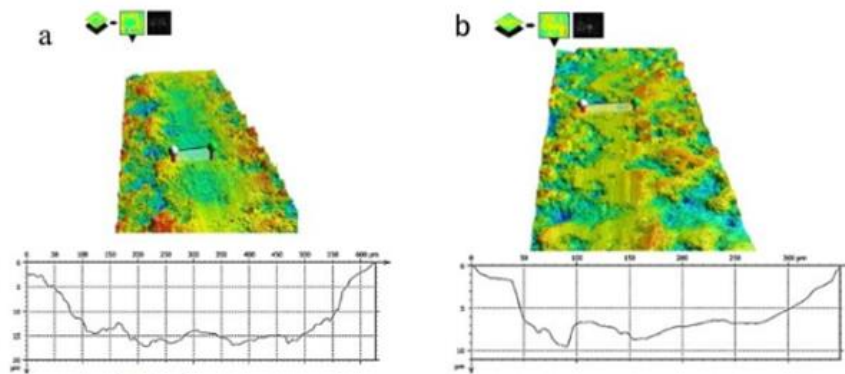


Figure 4. Three-dimensional topographical images of wear traces on coatings in their as-received state (Fig. 4a) and after pulsed plasma treatment (Fig. 4b)

Note – compiled by the authors

Figure 5 shows the potentiodynamic polarisation curves of the Fe–TiB₂–CrB₂ coating obtained under standard three-electrode electrochemical cell conditions. After pulse plasma treatment (curve b), a noticeable shift of the corrosion potential to a more positive region is observed. The observed effect confirms an increase in the coating's corrosion resistance and an improvement in the condition of the surface layer. The decrease in anode current density indicates a decrease in the rate of electrochemical dissolution of the metal matrix due to structural transformations. The increase in corrosion resistance after pulsed plasma treatment is associated with a number of factors. Firstly, the surface layer is compacted and the open porosity is reduced, which limits the penetration of the electrolyte into the deeper areas of the coating. Secondly, grain refinement and stabilisation are observed, ensuring a more uniform distribution of potential across the surface. Thirdly, the microgalvanic interaction between α -Fe and the dispersed boride phases TiB₂ and CrB₂ is reduced. Together, this leads to the formation of a denser and chemically stable surface with a reduced rate of electrochemical degradation. A shift in corrosion potential of 0.15–0.20 V confirms the effectiveness of structural optimisation of the coating without significantly changing its phase composition. The electrochemical test data are consistent with the results of X-ray phase analysis, which demonstrate the preservation of the TiB₂ and CrB₂ phases with a simultaneous reduction in the γ -Fe content.

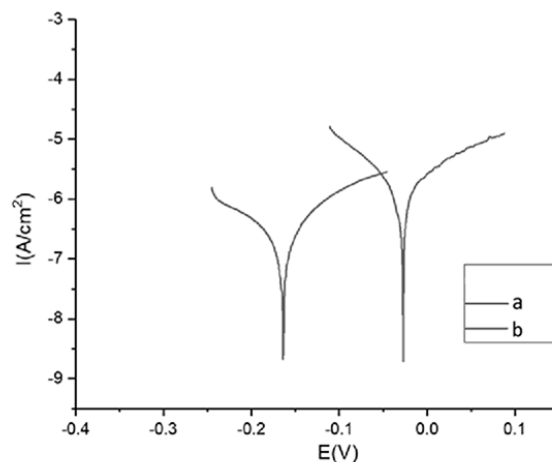


Figure 5. Results of analysis with CS300 potentiostat-galvanostat coatings before (a) and after pulse plasma treatment (b).

Note – compiled by the authors

Figure 6 shows the microhardness distribution profiles with respect to coating depth. The initial state is characterised by a maximum hardness value in the near-surface region, reaching approximately 15 GPa. As the indenter penetration depth increases, a gradual decrease in hardness to a level of 13–12 GPa is observed, which is associated with the transition from the modified surface layer to the bulk of the coating. This dynamic is due to the structural features of the detonation coating, including its lamellar structure, the presence of micropores, and the limited degree of interparticle sintering. The application of pulsed plasma modification results in a significant increase in microhardness in the surface layer to 17–18 GPa, which exceeds the initial values by 15–20%. At depths exceeding 100–150 μm , the values stabilise at 12–13 GPa, indicating that the hardening is local in nature, confined exclusively to the heat-affected zone of the plasma discharge. The structural causes of the improvement in mechanical properties are the intensive compaction of the material, grain refinement, and the uniform distribution of dispersed boride and carbide phases, which is fully confirmed by the results of X-ray structural analysis. Furthermore, an increase in the cohesive strength of the coating is observed due to the elimination of surface defects and the ‘healing’ of interlamellar boundaries upon their partial melting. The sharp drop in hardness at the end of the measurement profile (deeper than 180 μm) is due to the fact that the deformation zone beneath the indenter reaches the metal substrate, which has significantly lower stiffness compared to the protective layer.

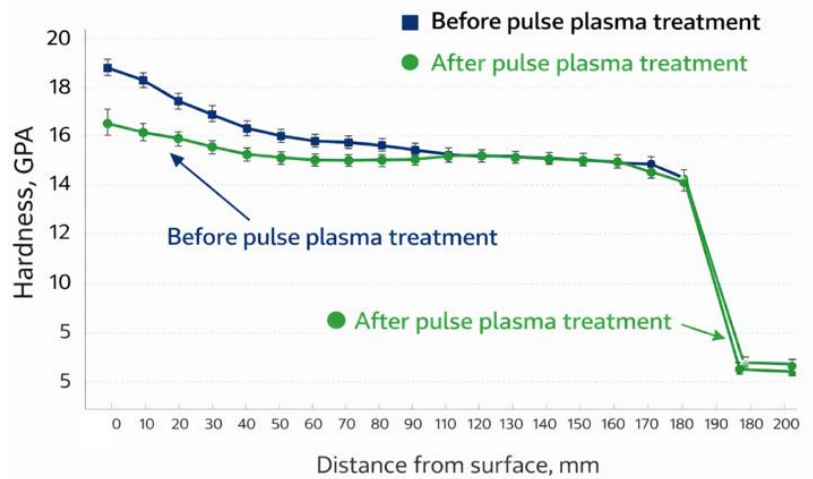


Figure 6. Hardness test results

Note – compiled by the authors

Figure 7 illustrates changes in the morphology of cross-sections of the iron-boride eutectic-based coating under the influence of PPT (7b) compared with the initial state (7a), as well as data from linear scanning of the chemical composition. In the post-deposition state (7a), the layer exhibits a lamellar architecture typical of gas-detonation spraying technologies. The boundaries of the sprayed particles, interlamellar layers and local micropores are clearly visible. The structure is heterogeneous, with some areas having different densities. According to the data of linear elemental analysis, a relatively uneven distribution of alloying elements is recorded, which is due to the ultra-fast crystallisation of molten particles during deposition. A sharp transition in chemical composition is observed near the ‘coating-substrate’ boundary. After pulsed plasma treatment (Fig. b), the morphology of the cross-section changes significantly. The structure becomes denser and more homogeneous, the interlamellar boundaries are partially smoothed, and the number of visible micropores decreases. The surface layer acquires a more compact

structure due to local remelting and subsequent recrystallisation. The linear distribution of elements demonstrates more stable concentration profiles without pronounced fluctuations, which shows a more uniform distribution of chemical elements within the heat-affected zone.

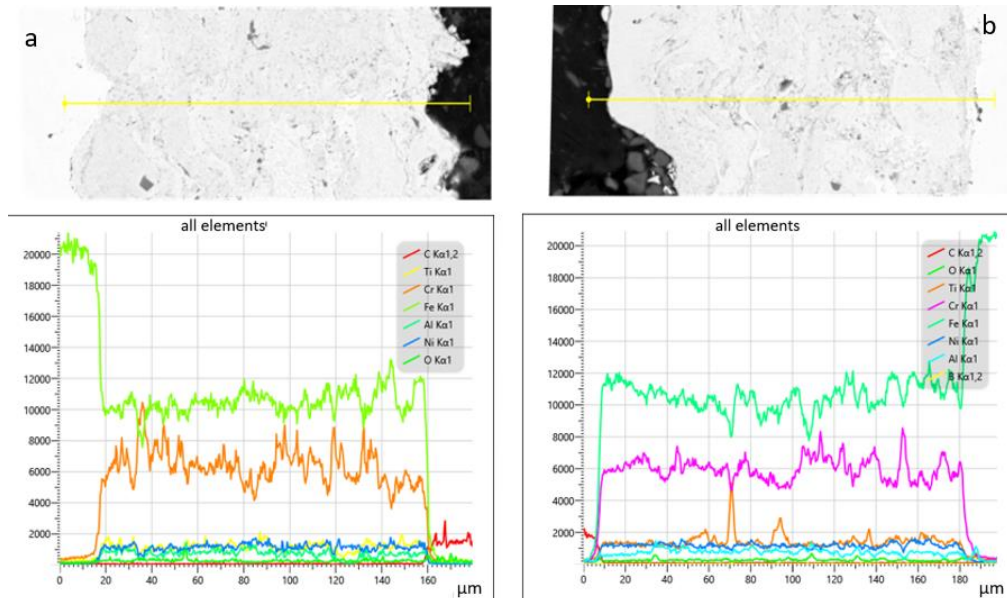


Figure 7. Cross-sectional morphology of coatings before (a) and after pulse plasma treatment (b).

Note – compiled by the authors

CONCLUSION

Based on the results of X-ray structural analysis, microstructural studies, microhardness measurements, tribological and corrosion tests, the following was established.

- X-ray phase analysis showed that after PPT, the phase composition of the coating (α -Fe, TiB_2 , CrB_2) is preserved, while phase redistribution and a decrease in the proportion of γ -Fe and the $Cr_{23}C_6$ carbide phase are observed. At the same time, the intensity of boride phase reflections increases, indicating structural stabilisation and the development of eutectic morphology without phase degradation.

- SEM analysis of the cross-section confirmed that pulse plasma treatment leads to compaction structural densification of the coating, reduction in interlamellar porosity, and local melting of surface defects. A more homogeneous and compact surface layer with reduced concentration heterogeneity is formed.

- Microhardness profiles showed a significant increase in hardness in the near-surface zone — from ~ 15 GPa to 17–18 GPa (an increase of 15–20%). The hardening is localised and limited to the zone of thermal exposure of the plasma pulse. The increase in hardness is associated with the compaction of the structure, grain refinement and an increase in the proportion of dispersed boride phases.

- The results of tribological tests indicate a reduction in the depth and volume of wear after treatment, which indicates an increase in the wear resistance of the coating. The wear mark becomes more uniform, and the intensity of microcutting and plastic deformation decreases.

- Corrosion studies have shown a shift in the corrosion potential to the positive region by 0.15–0.20 V and a decrease in the rate of anodic dissolution. The improvement in corrosion resistance is due to a decrease in open porosity, a decrease in microgalvanic activity between phases, and the formation of a denser and chemically stable surface.

Thus, pulsed plasma treatment is an effective method for modifying Fe–TiB₂–CrB₂ detonation coatings, providing structural optimisation without changing the phase composition and leading to a simultaneous increase in hardness, wear resistance and corrosion resistance..

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare that there is no conflict of interest..

FUNDING: This study was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant number: BR24992854).

REFERENCES

- Bhushan, B., & Ko, P. L. (2003). Introduction to tribology. *Applied Mechanics Reviews*, 56(1), B6–B7.
- Iqbal, A., Siddique, S., Maqsood, M., et al. (2020). Comparative analysis on the structure and properties of iron-based amorphous coating sprayed with thermal spraying techniques. *Coatings*, 10(10), 1006.
- Shapagina, N. A., & Dushik, V. V. (2024). Coatings based on refractory materials for corrosion and wear applications. *Materials*, 17(23), 5936.
- Shtansky, D. V., Kiryukhantsev-Korneev, F. V., Sheveiko, A. N., et al. (2005). Structure and properties of Ti-BN, Ti-Cr-B(N), and Cr-B(N) coatings deposited by magnetron sputtering of targets prepared by self-propagating high-temperature synthesis. *Physics of the Solid State*, 47(2), 252–262.
- Kiryukhantsev-Korneev, F. V., Novikov, A. V., Sagalova, T. B., et al. (2017). A comparative study of microstructure, oxidation resistance, mechanical, and tribological properties of coatings in Mo–B–(N), Cr–B–(N), and Ti–B–(N) systems. *Physics of Metals and Metallography*, 118(11), 1136–1146.
- Panarin, V. E., Tyurin, Yu. N., Kolisnichenko, O. V., et al. (2016). Защитные покрытия из эвтектического сплава на основе железа с тугоплавкими боридами // Zashchitnye pokrytiya iz evtekticheskogo splava na osnove zheleza s tugoplavkimi boridami [Protective coatings from eutectic iron-based alloy with refractory borides]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, (6), 15–20. (In Russ).
- Prysyazhnyuk, P., Biały, W., Bembenek, M., et al. (2025). Improving ballistic resistance of armor steel by FCAW with hardfacing alloys of Fe–Mo–Mn–B–C system. *Management Systems in Production Engineering*, 33, 1–15.
- Wang, Y. W., Sun, X. W., Wang, L., et al. (2021). Microstructure and properties of CrB₂–Cr₃C₂ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 425, 127693.
- Sharma, R. K., Das, R. K., & Kumar, S. R. (2023). HVOF deposition of iron amorphous composite coatings. *Surface Engineering*, 39, 481–494.
- Liang, D., Zhou, Y., Liu, X., et al. (2022). Wettability and corrosion performance of arc-sprayed Fe-based amorphous coatings. *Surface and Coatings Technology*, 433, 128129.
- Rakhadilov, B., Magazov, N., Kakimzhanov, D., et al. (2024). Influence of spraying parameters on steel coatings produced by arc spraying. *Coatings*, 14, 1145.
- Tyurin, Y. N., Zgatkevich, M. L., Pogrebnyak, A. D., & Kolisnichenko, O. V. (2001). Pulse plasma technology and equipment for surface modification. *Surface Modification Technologies XIV*, 14, 123–135.
- Pogrebnyak, A. D., & Tyurin, Y. N. (2003). Pulse-plasma modification of surface properties and coating. *Usp. Fiz. Met.*, 4, 1–71.
- Rakhadilov, B., Kakimzhanov, D., Seitkhanova, A., et al. (2024). Influence of pulsed plasma treatment distance on Fe–TiB₂–CrB₂ detonation coatings. *Coatings*, 14, 1025.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Кәкімжанов Дәуір Нұржанұлы - «Техникалық физика» мамандығының докторанты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан.

Кәкімжанов Дәуір Нұржанұлы — докторант по специальности «Техническая физика», Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан,

Kakimzhanov Daur Nurzhanuly – doctoral student of the specialty "Technical Physics", D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: dauir_97@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9453-0456>



Кусайнов Арыстанбек Ерланович — «Техникалық физика» мамандығының докторанты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан.

Кусайнов Арыстанбек Ерланович — докторант по специальности «Техническая физика», Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан.

Kussainov Arystanbek Erlanovich – doctoral student of the specialty "Technical Physics", D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: arys20055@gmail.com ,

ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-4623-4681>



Абижанова Индира Кенжебековна— докторант по специальности «Металлургия», научный сотрудник Научного центра «Защитные и функциональные покрытия», Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан.

Абижанова Индира Кенжебековна — «Металлургия» мамандығының докторанты, «Қорғаныш және функционалдық жабындар» ғылыми орталығының ғылыми қызметкері, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан.

Abizhanova Indira Kenzhebekovna – doctoral student of the specialty "Metallurgy", Research Scientist at the Scientific Center for «Protective and Functional Coatings», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: iabizhanova@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3218-7246>

М А З М Ұ Н Ы

<i>Ахметов Б.Ж., Шуленбаева Ф.А., Кульмаганбетова А.С., Жагинарова Т.Т., Жанбусинова М.Х.</i> Ауыл шаруашылығы мақсатындағы жерлер: тенденциялар мен перспективалар	5
<i>Вдовин В.Н., Машекенова А.Х., Дүйсен А.Р., Suresh Alapati</i> Кластерлеу алгоритмдерін пайдалана отырып, тасымалдау маршруттарын қалыптастыру	17
<i>Жұматаева Ж.М., Мукалиев Ж.К., Оналбаева Д.С., Касымханова К.Ж., Турганалиев С.Р.</i> Ауылшаруашылық жерлерін бақылау және басқару жүйесіндегі ГАЖ құралдарының тиімділігі	30
<i>Құспеков Қ.Ә.</i> Автомобиль жолдарының көлік-логистикалық желілерін салудағы шағын бөліктерін оңтайландырудың геометриялық модельдері	42
<i>Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г., Алькина А.Д., Дунаев П.А., Мусагажинов М.Ж.</i> Талшықты-оптикалық ақпарат беру желілеріндегі оптикалық қуат деңгейін төмендету бойынша эксперименттік зерттеулер	52
<i>Рамазанова Ж.М., Замалитдинова М.Г., Камет А.Ж., Абдикаримов Б.Д.</i> Ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігін болжау үшін жерді қашықтықтан зондтау деректерін қолдану	64
<i>Серая Н.В., Литвинов В.В., Даумова Г.К., Советханов Д.Е., Баймурзина М.М.</i> Үйінділердің жылудан қорғайтын жабындарына арналған геокомпозиттердің төзімділігі және микроқұрылымдық зерттеулері	73
<i>Тунгушбаева З.К., Құмықова Т.М., Нуриайықова Г.Т., Габитова А.М., Абдрашева З.Ж.</i> Ұңғымаларды геотехникалық бұрғылау деректері бойынша тау жыныстарының тұрақтылығын бағалау	87
<i>Витковская И.С., Батырбаева М.Ж., Асылбеков Ж.А., Идришева Ж.К., Момбекова Д.К.</i> Спутниктік деректер негізінде өсімдік жамылғысының жағдайын және оның өзгеру үрдістерін талдау кезінде интегралды вегетациялық индекстерді пайдалану	99
<i>Жумажанов Б.Р., Құлакаева А.Е., Жетписбаева А.Т., Жумажанов Б.С.</i> Катадиооптриялық оптикалық жүйелердегі паразиттік сәулеленуді азайту	114
<i>Капкенова М.Т., Капаева С.Д., Ғабдысалық Р., Ciešlik Jacek, Бекмырза Ж.А.</i> Тозуға төзімді табындарды балқытып қаптау әдісімен айналмалы тау-кен-шахта пышақтарының ресурсын арттыру	130
<i>Костюченкова О.Н., Нуркушева С.А., Ветбенек М.</i> Қайшы көтергіш платформасының қаттылығы мен салмағына перфорацияның әсерін эксперименттік зерттеу	141
<i>Курмашева Г.Р., Ширванов Р.Б., Камал Е.Б.</i> Қазақстандағы өндірістік жарақаттанудың динамикасы мен құрылымы және оны төмендетудің инженерлік шаралары	153
<i>Хлебникова И.А., Егоров Н.Б., Байбекова Г.С., Курманғалиев Д.Б., Уазырханова Г.К.</i> Техногендік қалдықтарды қайта өңдеудің ресурсты үнемдейтін технологияларын зерттеу және әзірлеу	168
<i>Кәкімжанов Д.Н., Қусайнов А.Е., Абижанова И.К.</i> Импульстік-плазмалық өңдеуден кейін Fe-TiB ₂ -CrB ₂ эвтектикалық жүйесі негізіндегі детонациялық жабындардың құрылымдық және фазалық күйін зерттеу	178

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ахметов Б.Ж., Шуленбаева Ф.А., Кульмаганбетова А.С., Жагипарова Т.Т., Жанбусинова М.Х.</i> Земли сельскохозяйственного назначения: тенденции и перспективы	5
<i>Вдовин В.Н., Машекенова А.Х., Дуйсен А.Р., Suresh Alapati</i> Формирование развозочных маршрутов с использованием алгоритмов кластеризации	17
<i>Жұматаева Ж.М., Мукалиев Ж.К., Оналбаева Д.С., Касымханова К.Ж., Турганалиев С.Р.</i> Эффективности ГИС-инструментов в системе мониторинга и управления сельскохозяйственными землями	30
<i>Куспеков К.А.</i> Геометрические модели локальной оптимизации трассировки транспортно-логистических сетей автомобильных дорог	42
<i>Мехтиев А.Д., Нешина Е.Г., Алькина А.Д., Дунаев П.А., Мусагажинов М.Ж.</i> Экспериментальные исследования уменьшения уровня оптической мощности в оптоволоконных линиях передачи информации	52
<i>Рамазанова Ж.М., Замалитдинова М.Г., Камет А.Ж., Абдикаримов Б.Д.</i> Применение данных дистанционного зондирования земли для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур	64
<i>Серая Н.В., Литвинов В.В., Даумова Г.К., Советханов Д.Е., Баймурзина М.М.</i> Микроструктурные исследования и долговечность геокомпозитов для теплозащитных покрытий отвалов	73
<i>Тунгушбаева З.К., Кумыкова Т.М., Нуриайыкова Г.Т., Габитова А.М., Абдрашева З.Ж.</i> Оценка устойчивости пород по данным геотехнического бурения скважин	87
<i>Витковская И.С., Батырбаева М.Ж., Асылбеков Ж.А., Идришева Ж.К., Момбекова Д.К.</i> Использование интегральных вегетационных индексов при анализе состояния растительного покрова и тенденций его изменений по спутниковым данным	99
<i>Жумажанов Б.Р., Кулакаева А.Е., Жетписбаева А.Т., Жумажанов Б.С.</i> Минимизация паразитного излучения в катадиоптрических оптических системах	114
<i>Капкенова М.Т., Капаева С.Д., Габдысалық Р., Cieřlik Jacek, Бекмырза Ж.А.</i> Повышение ресурса ротационных горно-шахтных ножей методом наплавки износостойких покрытий	130
<i>Костюченкова О.Н., Нуркушева С.А., Ветбенек М.</i> Экспериментальное исследование влияния перфорации на жесткость и массу платформы ножничного автоподъемника	141
<i>Курмашева Г.Р., Ширванов Р.Б., Камал Е.Б.</i> Динамика и структура производственного травматизма в Казахстане и инженерные меры его снижения	153
<i>Хлебникова И.А., Егоров Н.Б., Байбекова Г.С., Курмангалиев Д.Б., Уазырханова Г.К.</i> Исследования и разработка ресурсосберегающих технологий рециклинга техногенных отходов	168
<i>Кәкімжанов Д.Н., Кусайнов А.Е., Абижанова И.К.</i> Исследование структурного и фазового состояния детонационных покрытий на основе эвтектической системы Fe–TiB ₂ –CrB ₂ после импульсно-плазменной обработки	178

CONTENT

<i>Akhmetov B.Zh., Shulenbayeva F.A., Kulmaganbetova A.S., Zhagiparova T.T., Zhanbusinova M.Kh.</i> Agricultural land: trends and prospects	5
<i>Vdovin V., Mashekenova A., Duisen A., Suresh Alapati</i> Creating delivery routes using clustering algorithms	17
<i>Zhumatayeva Zh., Mukaliyev Zh., Onalbayeva D., Kassymkhanova K., Turganaliyev S.</i> The effectiveness of Gis tools in the agricultural land monitoring and management system	30
<i>Kuspekov K.A.</i> Geometric models of local optimization of tracing transport and logistics networks of highways	42
<i>Mekhtiyev A., Neshina E., Al'kina A., Dunayev P., Musagazhinov M.</i> Experimental studies of reducing the optical power level in fiber-optic information transmission lines	52
<i>Ramazanova Zh.M., Zamalitdinova M.G., Kamet A.Zh., Abdikarimov B.D.</i> Application of earth remote sensing data for predicting agricultural crop yields	64
<i>Seraya N.V., Litvinov V.V., Daumova G.K., Sovetkhanov D.Ye., Baimurzina M.M.</i> Microstructural studies and durability of geocomposites for thermal protection coatings of landfills	73
<i>Tungushbayeva Z.K., Kumykova T., Nurshaiykova G.T., Gabitova A.M., Abdrasheva Z.Zh.</i> Assessment of rock resistance based on geotechnical drilling data	87
<i>Vitkovskaya I.S., Batyrbayeva M.Zh., Asylbekov Zh.A., Idrisheva Zh.K., Mombekova D.K.</i> Use of integral vegetation indices in the analysis of vegetation cover condition and its change trends based on satellite data	99
<i>Zhumazhanov B., Kulakayeva A., Zhetpisbayeva A., Zhumazhanov B.</i> Mitigation of stray light in catadioptric optical systems	114
<i>Kapkenova M.T., Kapaeva S.D., Gabdysalyk R., Ciešlik Jacek, Bekmyrza Zh.A.</i> Increasing the service life of rotary mining knives by means of surfacing and wear-resistant coatings	130
<i>Kostyuchenkova O.N., Nurkusheva S.A., Bembenek M.</i> An experimental study of the effect of perforation on the stiffness and weight of a scissor lift platform	141
<i>Kurmasheva G.R., Shirvanov R.B., Kamal Y.B.</i> Dynamics and structure of occupational injuries in Kazakhstan and engineering measures to reduce them	153
<i>Khlebnikova I., Egorov N., Baibekova G., Kurmangaliyev D., Uazyrkhanova G.</i> Research and development of resource-saving technologies for recycling of technogenic waste	168
<i>Kakimzhanov D., Kussainov A., Abizhanova I.</i> Studies of the structural and phase state of detonation coatings based on the Fe–TiB ₂ –CrB ₂ eutectic system after pulse plasma treatment	178

**EKTU Journal
of Engineering Sciences**

Ғылыми журнал
2026 жылдан шыға бастады.
Қазақстан Республикасы мәдениет және ақпарат министрлігінде тіркеліп,
2025 ж. 16 қыркүйегінде № KZ93VPY00129402 куәлігі берілген.

**EKTU Journal
of Engineering Sciences**

Научный журнал
Издается с 2026 г.
Зарегистрирован Министерством культуры и информации
Республики Казахстан. Свидетельство № KZ93VPY00129402 от 16 сентября 2025 г.

**EKTU Journal
of Engineering Sciences**

Scientific journal
Published since 2026
Registered with the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan. Certificate No.
KZ93VPY00129402 dated September 16, 2025.

Редакторлар – Редакторы
О.Н. Николаенко, С.С. Мамыраздыкова
Корректорлар – Корректоры
О.Н. Николаенко, С.С. Мамыраздыкова
Руководитель редакционно-издательского центра О.Н. Николаенко
Editors O. Nikolaenko, S. Mamyrazdykova
Copy editors O. Nikolaenko, S. Mamyrazdykova
Head of the editorial and publishing center O. Nikolaenko

Материалдарды компьютерде терген және беттеген С.С. Мамыраздыкова
Набор, верстка, изготовление оригинал-макета С.С. Мамыраздыкова
Text Layout, lead out production of the original layout S. Mamyrazdykova

Басуға 31 наурыз 2026 ж. қол қойылды.
Форматы 84×108/16. Офсет қағазы.
Көлемі: шартты баспа табағы 20,16, есептік баспа табағы 20,21.
Баспа нұсқасы. Таралымы 30 дана. № 54-2026 тапсырыс.
Бағасы келісім бойынша.

Подписано в печать 31 марта 2026 г.
Формат 84×108/16. Бумага офсетная.
Объем: усл. печ. л. 20,16, уч.-изд. л. 20,21.
Печатная версия. Тираж 30 экз. Заказ № 54-2026.
Цена договорная.

Signed to print on March 31, 2026.
Format 84'108/16. Offset paper.
Volume: conventional printing plate 20.16, estimated printing plate 20.21.
Printed version. Circulation 30 copies. Order No. 54-2026.
The price is negotiable.

Шығыс Қазақстан техникалық университеті. 070004, Өскемен қаласы, Протозанов көшесі, 69.
Восточно-Казахстанский технический университет. 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69.
D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. 070004, Ust-Kamenogorsk, 69 Protozanov Street.