

ISSN (Print) 2616-6771
ISSN (Online) 2617-9962

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ BULLETIN

ВЕСТНИК

of L.N. Gumilyov
Eurasian National University

Евразийского национального
университета имени Л.Н. Гумилева

ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ. ЭКОЛОГИЯ сериясы

CHEMISTRY. GEOGRAPHY. ECOLOGY Series

Серия ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ. ЭКОЛОГИЯ

№ 3(152)/2025

1995 жылдан бастап шығады

Founded in 1995

Издается с 1995 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

Астана, 2025

Astana, 2025

Редакция алқасы: Бас редактор (химия): Копишев Э.Е.

х.ғ.к., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

<i>Бас редактор (география):</i>	Рамазанова Н.Е. <i>PhD, қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан</i>
<i>Бас редактор (экология):</i>	Берденов Ж.Г. <i>PhD, қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан</i>
<i>Жауапты хатшы:</i>	Уали А.С. <i>х.ғ.к., қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан</i>

**Редакция алқасы:
Химия**

Адекенов С.М.	х.ғ.д., проф., ҚР ҰҒА академигі, Фитохимия халықаралық ғылыми-өндірістік холдингі, Қарағанды, Қазақстан
Айбульдинов Е.К.	PhD, Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Амерханова Ш.К.	х.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Бакибаев А.А.	х.ғ.д., проф., Томск Политехникалық Университеті, Томск, Ресей
Байкенов М.	х.ғ.д., проф., Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті, Қарағанды, Қазақстан
Джакупова Ж.Е.	х.ғ.к., доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Еркасов Р.Ш.	х.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Маскевич А.А.	ф.-м.ғ.д., проф., Я. Купала мемлекеттік университеті, Гродно, Беларусь
Мустафин Р.И.	PhD, доцент., Қазан Мемлекеттік Медициналық Университеті, Қазан, Ресей
Султанова Н.А.	х.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Филиппов С.К.	PhD, Або Академия университеті, Турку, Финляндия
Хуторянский В.В.	PhD, проф., Рединг Университеті, Біріккен Корольдік
Шатрук М.	PhD, проф., Флорида Мемлекеттік Университеті, Талахасси, АҚШ

География

Атасой Е.	PhD, проф., Бурса-Улудаг Университеті, Бурса, Турция
Джаналеева К.М.	ғ.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Сапаров К.Т.	ғ.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Саипов А.А.	п.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық

	университеті, Астана, Қазақстан
Озгелдинова Ж.О.	PhD, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Жангужина А.А.	PhD, доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Дунец А.Н.	г.ғ.д., проф., Алтай мемлекеттік университеті, Барнаул, Ресей
Самарханов К.Б.	г.ғ.к., «Астана» халықаралық ғылыми кешені, Астана, Қазақстан
Иржи Хлахула	PhD, проф., А. Мицкевич Университеті, Познань, Польша
Останин О.В.	г.ғ.к., доцент, Алтай мемлекеттік университеті, Барнаул, Ресей
Абдиманапов Б.Ш.	г.ғ.д., проф., Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан
Алагуджаева М.А.	PhD, «Қазақстан Ғарыш Сапары» ҰК АҚ, Астана, Қазақстан

Экология

Сафаров Р.З.	х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Саспугаева Г.Е.	PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Инкарова Ж.И.	б.ғ.к., доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Зандыбай А.	б.ғ.к., доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Илеш А.	PhD, проф., Орадя университеті, Орадя, Румыния
Ян А. Вент	Хабилит. докторы, проф., Гданьск университеті, Гданьск, Польша
Мендыбаев Е.Х.	б.ғ.к., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Жамангара А.К.	б.ғ.к., доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Ахмеденов К.М.	г.ғ.к., проф., М. Өтемісұлы атындағы Батыс Қазақстан университеті, Орал, Қазақстан

Редакцияның мекен-жайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2,

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 402 б.

Тел.: +7 (7172) 709-500, (ішкі 33-207). **E-mail:** vest_chem@enu.kz

Техникалық хатшылар: Әділбектегі Гүлмира Әділбекқызы, Белгібаева Дана Сапарғалиқызы

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы

Меншіктенуші: "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті" КеАҚ

Мерзімділігі: жылына 4 рет

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігінде 02.02.2021 ж. №

KZ81VPY00031939 тіркеу куәлігімен тіркелген

Типографияның мекен-жайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі 13/1

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Тел: +7 (7172)709-500 (ішкі 33-207). Сайт: <http://bulchmed.enu.kz>

Editorial board: Editor-in-Chief (Chemistry): Kopishev E.E.

Cand.Chem.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editor-in-Chief (Geography): Ramazanova N.E.

PhD, Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editor-in-Chief (Ecology): Berdenov Zh.G.

PhD, Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Executive Secretary: Uali A.S.

Cand.Chem.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

**Editorial board
Chemistry**

Adekenov S.M.	Dr.Chem.Sci., Prof., Academician of NAS RK, International Research & Production Holding Phytochemistry, Karaganda, Kazakhstan
Aibuldinov E.K.	PhD, Research Institute of New Chemical Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Amerkhanova Sh.K.	Dr.Chem.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Bakibayev A.A.	Dr.Chem.Sci., Prof., Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
Baikenov M.I.	Dr.Chem.Sci., Prof., Karaganda Buketov University, Karaganda, Kazakhstan
Jakupova Zh.E.	Cand.Chem.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Erkassov R.Sh.	Dr.Chem.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Maskevich A.A.	Dr.Phys.-Math.Sci., Prof., Ya. Kupala State University, Grodno, Belarus
Mustafin R.I.	PhD, Assoc.Prof., Kazan State Medical University, Kazan, Russia
Sultanova N.A.	Dr.Chem.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Filippov S.K.	PhD, Prof., Abo Akademi University, Turku, Finland
Khutoryanskiy V.V.	PhD, Prof., University of Reading, United Kingdom
Shatruk M.	PhD, Prof., Florida State University, Tallahassee, USA

Geography

Atasoy E.	Phd, Prof., Bursa Uludağ University, Bursa, Türkiye
Dzhanaleyeva K.M.	Dr.Geogr.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Saparov K.T.	Dr.Geogr.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Saipov A.A.	Dr.Ped.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Ozgeldinova Zh.	PhD, Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Zhanguzhina A.A.	PhD, acting Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Dunetc A.N.	Dr.Geogr.Sci., Prof., Altai State University, Barnaul, Russia
Samarkhanov K.B.	Cand.Geogr.Sci., International Science Complex «Astana», Astana, Kazakhstan
Jiří Hlahula	PhD, Prof., A. Mickiewicz University, Poznan, Poland
Ostanin O.V.	Cand.Geogr.Sci., Assoc.Prof., Altai State University, Barnaul, Russia
Abdimanapov B.Sh.	Dr.Geogr.Sci., Prof., Abay Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan
Alagudzhaeva M.A.	PhD, JSC NC "Kazakhstan Garysh Sapary", Astana, Kazakhstan

Ecology

Safarov R.Z.	Cand.Chem.Sci., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Saspugayeva G.E.	PhD, Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Inkarova J.I.	Cand.Biol.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Zandybay A.	Cand.Biol.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Ilesh A.	PhD, Prof., University of Oradea, Oradea, Romania
Jan A. Wendt	Dr.habil., Prof., Gdansk University, Poland
Mendibaev E.Kh.	Cand.Biol.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Zhamangara A.K.	Cand.Biol.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Akhmedenov K.M.	Cand.Geogr.Sci., Prof., M. Otemiusly West Kazakhstan University, Uralsk, Kazakhstan

Editorial address: 2, Satpayev str., of. 402,
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, 010008
Tel.: +7 (7172) 709-500 (ext. 33-207), **E-mail:** vest_chem@enu.kz
Technical secretaries: Adilbektegi Gulmira, Belgibayeva Dana

Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University.

Chemistry. Geography. Ecology Series

Owner: Non-profit joint-stock company «L.N. Gumilyov Eurasian National University»

Periodicity: 4 times a year

Registered by the Ministry of Information and Communication of the Republic of Kazakhstan Registration certificate № KZ81VPY00031939 from 02.02.2021

Address of Printing Office: 13/1 Kazhymukan str., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan 010008

Tel: +7 (7172) 709-500 (ext. 33-207). Website: <http://bulchmed.enu.kz>

Редакционная коллегия: Главный редактор (химия): Копишев Э.Е.
к.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Главный редактор (география):	Рамазанова Н.Е. <i>PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан</i>
Главный редактор (экология):	Берденов Ж.Г. <i>PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан</i>
Ответственный секретарь:	Уали А.С. <i>к.х.н., ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан</i>

Редакционная коллегия:
Химия

Адекенов С.М.	д.х.н., проф., академик НАН РК, Международный научно-производственный холдинг Фитохимия, Караганда, Казахстан
Айбульдинов Е.К.	PhD, НИИ новых химических технологий, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Амерханова Ш.К.	д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Бакибаев А.А.	д.х.н., проф., Томский политехнический университет, Томск, Россия
Байкенов М.И.	д.х.н., проф., Карагандинский университет им. Е.А.Букетова, Караганда, Казахстан
Джакупова Ж.Е.	к.х.н., доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Еркасов Р.Ш.	д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Маскевич А.А.	д.ф.-м.н., профессор, Гродненский государственный университет имени Я. Купалы, Гродна, Беларусь
Мустафин Р.И.	PhD, доцент, Казанский государственный медицинский Университет, Казань, Россия
Султанова Н.А.	к.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Филиппов С.К.	PhD, проф., Университет Академия Або, Турку, Финляндия
Хуторянский В.В.	PhD, проф., Университет Рединга, Объединенное Королевство
Шатрук М.	PhD, проф., Государственный университет Флориды, Талахасси, США

География

Атасой Е.	PhD, проф., Университет Бурсы-Улудаг, Бурса, Турция
Джаналеева К.М.	д.г.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Сапаров К.Т.	д.г.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Саипов А.А.	д.п.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Озгелдинова Ж.О.	PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Жангужина А.А.	PhD, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Дунец А.Н.	д.г.н., проф., Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
Самарханов К.Б.	к.г.н., Международный научный комплекс «Астана», Астана, Казахстан
Иржи Хлахула	PhD, проф., Университет им. А. Мицкевича, Познань, Польша
Останин О.В.	к.г.н., доцент, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
Абдиманатов Б.Ш.	д.г.н., проф., Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан
Алагуджаева М.А.	PhD, АО НК «Қазақстан Ғарыш Сапары», Астана, Казахстан

Экология

Сафаров Р.З.	к.х.н., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Саспугаева Г.Е.	PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Инкарова Ж.И.	к.б.н., доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Зандыбай А.	к.б.н., доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Илеш А.	PhD, проф., Университет Орадя, Орадя, Румыния
Ян А. Вент	д.г.н., проф., Университет Гданьска, Гданьск, Польша
Мендыбаев Е.Х.	к.б.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Жамангара А.К.	к.б.н., доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Ахмеденов К.М.	к.г.н., проф., Западно-Казахстанский университет им. М.Утемисова, Уральск, Казахстан

Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2,
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, каб. 402

Тел.: +7(7172) 709-500, (вн. 33-207). **E-mail:** vest_chem@enu.kz

Технические секретари: Адильбектеги Гульмира Адильбеккызы, Бельгибаева Дана Сапаргалиевна

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева.

Серия Химия. География. Экология

Собственник: НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева»

Периодичность: 4 раза в год

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан Регистрационное свидетельство № KZ81VPY00031939 от 02.02.2021 г.

Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Кажымукана, 13/1, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

Тел.: +7(7172)709-500 (вн. 33-207). Сайт: <http://bulchmed.enu.kz>

ХИМИЯ/ CHEMISTRY

- Е. Айбульдинов, Т. Машан, Л. Кусепова, Р. Сафаров, А. Сабитов, А. Көлпек, Ж. Искакова**
Қазақстанның әртүрлі қалаларындағы тұрмыстық қатты қалдықтардың құрамы мен қасиеттерін талдау
Е. Айбульдинов, Т. Машан, Л. Кусепова, Р. Сафаров, А. Сабитов, А. Колпек, Ж. Искакова
Анализ состава и свойств твердых бытовых отходов в различных городах Казахстана
Y. Aibuldinov, T. Mashan, L. Kusepova, R. Safarov, A. Sabitov, A. Kolpek, Zh. Iskakova
Analysis of the composition and properties of solid municipal waste in various cities of Kazakhstan 11
- Н. Алжаппарова, С. Паньшина, М. Ибраев, А. Жумина, А. Оразбай**
N-Ацилалкилпиразолдардың синтезі және олардың құрылымының цитотоксикалық қасиеттеріне әсері
Н. Алжаппарова, С. Паньшина, М. Ибраев, А. Жумина, А. Оразбай
Синтез N-ацилалкилпиразолов и влияние их структуры на свойства цитотоксичности
N. Alzhapparova, S. Panshina, M. Ibrayev, A. Zhumina, A. Orazbay
Synthesis of N-acylalkylpyrazoles and the influence of their structure on cytotoxicity properties 42
- В. Боброва, С. Нечипуренко, А. Касперович, А. Кайайдарова**
Эластомерлік композицияларда көміртекті тақтатас өндірудің жанама өнімдеріне негізделген көміртекті минералды толтырғышты қолдану
В. Боброва, С. Нечипуренко, А. Касперович, А. Кайайдарова
Применение углерод-минерального наполнителя на основе побочных продуктов добычи углистых сланцев в эластомерных композициях
V. Bobrova, S. Nechipurenko, A. Kasperovich, A. Kaiaidarova
Application of carbon-mineral filler based on coal shale mining by-products in elastomeric compositions 57
- Р. Дюсова, Г. Сейтенова, М. Борашова, Е. Жакманова, Я. Сергеевс**
Каталитикалық реформалау процесін жобалау және өнеркәсіптік тексеру
Р. Дюсова, Г. Сейтенова, М. Борашова, Е. Жакманова, Я. Сергеевс
Разработка и промышленная проверка процесса каталитического риформинга
R. Dyussova, G. Seitenova, M. Borashova, Y. Zhakmanova, Y. Sergeyevs
Design and industrial verification of the catalytic reforming process 74
- Е. Серік, Н. Исатаев, М. Архарбекова, Ж. Бакенов, А. Нұрпейсова, А. Муканова**
3D Zn/ZnO@C анодын алу үшін қарапайым термиялық тотығу және көміртектен қаптау әдісі
Е. Серик, Н. Исатаев, М. Архарбекова, Ж. Бакенов, А. Нурпейсова, А. Муканова
Простая стратегия термического окисления и нанесения углеродного покрытия для получения 3D анода Zn/ZnO@C
Y. Serik, N. Issatayev, M. Arkharbekova, Zh. Bakenov, A. Nurpeissova, A. Mukanova
Facile thermal oxidation and carbon coating strategy for fabricatin a 3D Zn/ZnO@C anode 90

Ж. Ержанова, Т. Таукенов, М. Мусабаева, Г. Есимбеков

Бақылаудан талдауға: далалық зерттеулер арналық өзгерістерді зерделеудің бірінші кезеңі ретінде

Ж. Ержанова, Т. Таукенов, М. Мусабаева, Г. Есимбеков

От наблюдений к анализу: полевые исследования как первый этап изучения русловых изменений

Zh. Yerzhanova, T. Taukenov, M. Musabayeva, G. Yessimbekov

From observations to analysis: field research as the first stage on studying riverbed changes

104

ІІІ. Каирова, Н. Жеңісова, Ж. Тоқтаров, К. Зулпыхаров, Д. Токкожаев, А. Асанбаева, О. Таукебаев

Орталық Қазақстан өңірі үшін картографиялық материалдар мен қашықтықтан зондтау деректері негізінде сандық ГАЖ-негізін әзірлеу

ІІІ. Каирова, Н. Женисова, Ж. Токтаров, К. Зулпыхаров, Д. Токкожаев, А. Асанбаева, О. Таукебаев

Разработка цифровой ГИС-основы для региона Центрального Казахстана на основе картографических материалов и данных дистанционного зондирования

Sh. Kairova, N. Zhengissova, Zh. Toktarov, K. Zulpykharov, D. Tokkozhaev, A. Assanbayeva, O. Taukebayev

Development of a GIS digital framework for the Central Kazakhstan region based on cartographic materials and remote sensing data

122

Б. Керімбай, К. Баймырзаев, Н. Керімбай, Е. Токпанов, А. Исабаев

Алакөл ойпатындағы рекреациялық аймақтарды ландшафттық жоспарлаудағы географиялық ерекшеліктер

Б. Керимбай, К. Баймырзаев, Н. Керимбай, Е. Токпанов, А. Исабаев

Географические особенности ландшафтного планирования рекреационных зон в Алакольской котловине

B. Kerimbay, K. Baymyrzayev, N. Kerimbay, E. Tokpanov, A. Issabayev

Geographical features in the landscape planning of recreational areas in the Alakol basin

142

Н. Сиханова, Е. Шынбергенев, Н. Тоғызбаева, А. Карабалаева

Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ жамылғысындағы ауыр металдардың таралуын геоақпараттық үлгілеу (Қазгидромет РМК 2019-2023 жж. мәліметтері негізінде)

Н. Сиханова, Е. Шынбергенев, Н. Тогизбаева, А. Карабалаева

Геоинформационное моделирование распределения тяжелых металлов в почвенном покрове крупных городов Республики Казахстан (на основе данных РГП «Казгидромет» за 2019-2023 гг.)

N. Sihanova, Y. Shynbergenov, N. Togyzbaeva, A. Karabalayeva

Geoinformation modeling of the distribution of heavy metals in the soil cover of large cities of the Republic of Kazakhstan (based on the data of RSE «Kazhydromet» for 2019-2023)

157

А. Бекетова, Е. Мендыбаев, Г. Гатаулина

Оңтүстік Орал жоталарының өсімдік қауымдастықтарына техногендік ықпалды бағалау

А. Бекетова, Е. Мендыбаев, Г. Гатаулина

Оценка техногенного воздействия на растительные сообщества Южных отрогов Урала

A. Beketova, Y. Mendybaev, G. Gataulina

Assessment of anthropogenic impact on the plant communities of the Southern spurs of the Urals

175

А. Ержанова, Е. Меркибаев, С. Нурмакова, Е. Жумай, А. Ахметжан, А. Еркінқызы, А. Ниязова

Плацента экологиялық жағдайдың биомаркері ретінде: Ақмола облысындағы микроминералды талдау нәтижелері

А. Ержанова, Е. Меркибаев, С. Нурмакова, Е. Жумай, А. Ахметжан, А. Еркінқызы, А. Ниязова

Плацента как биомаркер экологической ситуации: результаты микроминерального анализа в Акмолинской области

A. Yerzhanova, Yerik Merkibayev, S. Nurmakova, Y. Zhumai, A. Akhmetzhan, A. Yerkinkyzy, A. Niyazova

Placenta as a biomarker of the ecological situation: results of micromineral analysis in Akmola region

191

Г. Нұржан, Г. Садыканова, С. Құмарбекұлы, К. Алипина, Ж. Игисинова

Шығыс Қазақстанның тау-кен өнеркәсібі жұмысшыларының денсаулығына локалды вибрацияның әсерін бағалау

Г. Нуржан, Г. Садыканова, С. Кумарбекулы, К. Алипина, Ж. Игисинова

Оценка воздействия локальной вибрации на здоровье работников горно-рудной отрасли Восточного Казахстана

G. Nurzhan, G. Sadykanova, S. Kumarbekuly, K. Alipina, Zh. Igissinova

Assessment of the impact of local vibration on the health of workers in the mining industry of East Kazakhstan

207

А. Синдирева, Э. Эрдэнэцогт, А. Мангутова, В. Иеронова, Р. Косолапов

Агроэкожүйелердегі экологиялық инжиниринг: Солтүстік Моңғолия жағдайында жаздық жұмсақ бидайды селенмен байыту

А. Синдирева, Э. Эрдэнэцогт, А. Мангутова, В. Иеронова, Р. Косолапов

Экологический инжиниринг в агроэкосистемах: обогащение селеном яровой мягкой пшеницы в условиях Севера Монголии

A. Sindireva, E. Erdenetsogt, A. Mangutova, V. Ieronova, R. Kosolapov

Ecological engineering in agroecosystems: selenium enrichment of spring soft wheat under the conditions of Northern Mongolia

222

Қазақстан қалаларындағы тұрмыстық қатты қалдықтардың құрамы мен қасиеттерін талдау

Еламан Айбульдинов¹, Тоғжан Машан^{2*}, Ляззат Кусепова², Руслан Сафаров², Аят Сабитов², Айнагүл Көлпек², Жанар Искакова¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Астана, Қазақстан; elaman@mail.ru; iskakova_zhb@enu.kz

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Астана, Қазақстан; mashan_tt@enu.kz; kusseпова_la@enu.kz; safarov_rz@enu.kz; kolpek_a@enu.kz; sabitov_as_1@enu.kz

*Корреспонденция: mashan_tt@enu.kz

Дәйексөз: Айбульдинов, Е., Машан, Т., Кусепова, Л., Сафаров, Р., Сабитов, А., Көлпек, А., Искакова, Ж. (2025). Қазақстанның әртүрлі қалаларындағы тұрмыстық қатты қалдықтардың құрамы мен қасиеттерін талдау. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы. 152(3), 11-41. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-11-41>

Академиялық редактор:
Э.Е. Копишев

Редакцияға түсті: 24.02.2025
Түзетілді: 26.02.2025
Қабылданды: 28.02.2025
Басылымға шықты: 30.09.2025



Copyright: ©2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Андатпа. Қазақстан Республикасы Ұлттық статистикалық бюросының деректері бойынша 2023 жылдың соңына қарай елімізде 3200-ден астам полигонда 120 миллион тоннаға жуық тұрмыстық қатты қалдықтар (ТҚҚ) жиналады. Жыл сайын шамамен 4,5 миллион тонна өндіріледі, оның тек 15 пайызы ғана қайта өңделеді. Сұрыпталмаған және сұрыпталған қалдықтардың жиналуы, ең алдымен, планетаның парниктік әсеріне әсер ету тұрғысынан көмірқышқыл газынан 28 есе қауіпті және 20 жыл ішінде 84 есе тиімдірек болатын парниктік газ – метанның түзілуіне байланысты маңызды экологиялық тәуекелдерді тудырады. Бұл зерттеудің мақсаты Қазақстанның алты қаласының: Астана, Алматы, Шымкент, Ақтөбе, Қарағанды және Өскемен қалаларының қатты тұрмыстық қалдықтарының физика-химиялық құрамын, сондай-ақ физикалық және термохимиялық қасиеттерін зерттеу болып табылады. Басқа зерттеулерден айырмашылығы, бұл зерттеуде қаралып жатқан қалалардың әртүрлі аудандарынан ондаған контейнерлердің толық босатылуын қамтитын жалғыз қалдық сынама қолданылды. Осылайша, қалалар бойынша қатты тұрмыстық қалдықтардың орташа құрамы сақталды. Барлық қалалардан алынған сұрыпталмаған және сұрыпталған қатты тұрмыстық қалдықтардың физика-химиялық құрамының талдауы жүргізіліп, ылғалдың жалпы және аналитикалық құрамы, күл мен ұшқыш заттардың құрамы, сонымен қатар жоғарғы және төменгі калориялық мәндері анықталды. Сұрыптау тиімділігі ТҚҚ өңдеудің бірінші кезеңі ретінде бағаланды. Қолмен сұрыптаудың тиімділік коэффициенті тәжірибеде 0,4–0,8 құрады. Алынған нәтижелер тұрмыстық қатты қалдықтарды тиімді басқару технологияларын бағалауға мүмкіндік береді және жартылай өнеркәсіптік пиролиз, жағу, плазмалық өңдеу және қордалау қондырғыларының тәжірибелік зерттеулерін жеңілдетеді.

Түйін сөздер: Қалдықсыз өндіріс; Қалдықтарды қайта өңдеу;

Тұрмыстық қалдықтар; Пиролиз; Энергия тиімді технологиялар; Синтездік газ; Жылу энергиясы; Метан; Көмірқышқыл газы; Парниктік газдар.

1. Кіріспе

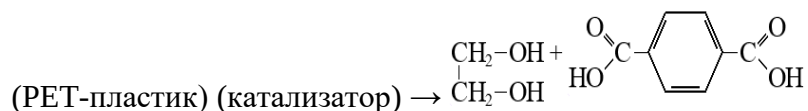
Қазақстан Республикасы Ұлттық статистикалық бюросының мәліметі бойынша, 2023 жылдың соңына қарай республика бойынша 3200-ден астам полигонда 120 миллион тоннаға жуық тұрмыстық қатты қалдықтар (ТҚҚ) жиналады (Serikova, A. және т.б., 2020). Жыл сайын шамамен 4,5 миллион тонна қалдық түзіледі, оның тек 15 пайызы ғана қайта өңделеді (Inglezakis, V.J. және т.б., 2018; Nukusheva, A. және т.б., 2023; Nukusheva, A. және т.б., 2023). Күн сайын миллиондаған адамдар тонналап қоқыс тастайды: қаптамалар, тамақ қалдықтары, пластик бөтелкелер, батареялар, қағаз, ескі киімдер. Мұның бәрі қазіргі заманғы қалалардың барлығы тап болатын тұрмыстық коммуналдық қалдықтар. Бір қарағанда, бұл жай ғана қоқыс, оны бір жерге тастау керек. Бірақ шын мәнінде қарапайым қоқыстың артында адам денсаулығына, табиғатқа, климатқа әсер ететін күрделі химиялық процестер жатыр. Сұрыпталмаған және сұрыпталған тұрмыстық қатты қалдықтардың үздіксіз жиналуы және сақталуы, оның ішінде метан (50–75%), көмірқышқыл газы (25–50%) және су буы, сондай-ақ азот оксидтері, күкіртсутек және органикалық заттар (шамамен 5–15%) сияқты парниктік газдар шығарындылары (World Meteorological Organization, 2024; Dharnaik, A.S. және т.б., 2024; Rodrigues, J.A.P. және т.б., 2024; Bhatt, K.P. және т.б., 2022; Chen, H. және т.б., 2024; Chen, B. және т.б., 2023; Abbas, R.I. және т.б., 2024; Cao, X. және т.б., 2023; Abis, M. және т.б., 2020; Dronia, W. және т.б., 2024; Zajac, M. және т.б., 2024) қоршаған ортаға айтарлықтай әсер етеді. Келесі ғасырда парниктік әсерге ықпал етуде көмірқышқыл газынан 28 есе және 20 жыл ішінде 84 есе тиімді болатын метан ерекше алаңдаушылық тудырады (Nukusheva, A. және т.б., 2023). Көмірқышқыл газы әртүрлі процестерге әсер ететін ұзақ атмосфералық өмір сүруіне байланысты ерекше қауіп тудырады. 1750 жылдан бастап атмосферадағы CO₂ концентрациясы шамамен 50%-ға өсті. Сонымен қатар, азот оксидтерінің парниктік потенциалы көмірқышқыл газынан 264 есе асып түседі және планетаның озон қабатына кері әсерін тигізеді (World Meteorological Organization, 2024).

Қоқыс контейнерге түскеннен кейін ол полигонға немесе қайта өңдеуге жіберіледі, немесе ең нашар жағдайда - үйіндіге жіберіледі. Міне, ең қызықтысы осы жерден басталады: қоқыс қоршаған ортамен және басқа заттармен химиялық реакцияларға түседі.

Көптеген елдерде қоқыстардың бір бөлігі өртеу зауыттарында жағылады. Бұл жағдайда тотығу реакциялары жүреді - жану:

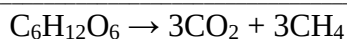
Құрамында көміртек бар заттар + O₂ → CO₂ + H₂O + жылу;

Бірақ қалдықтар толық жанбаса, улы қосылыстар түзіледі: көміртек оксиді (CO), күйе (C), диоксиндер. Пластмассаны жағу әсіресе қауіпті - бұл хлорсутек (HCl) және фуран қосылыстары сияқты улы газдарды шығаруы мүмкін. Пластмасса қалдықтардың ең проблемалы түрлерінің бірі болып табылады. Оның кейбір түрлерін химиялық реакциялар арқылы мономерлерге бөлуге болады - бұл химиялық рециклинг деп аталады.



Мұндай қайта өңдеу пластикті қайта пайдалануға, қоқыс көлемін азайтуға және қоршаған ортаның ластануын азайтуға көмектеседі.

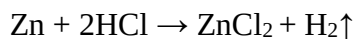
Полигондағы тамақ қалдықтары, қағаз, шөп және жапырақтар жай ғана «жоғалып» қоймайды – олар шіріп кетеді, яғни бактериялардың қатысуымен анаэробты ыдырау процесіне ұшырайды. Нәтижесінде келесі химиялық реакциялар жүреді:



Осылайша көмірқышқыл газы мен метан пайда болады - жаһандық жылынуды арттыратын парниктік газдар. Әсіресе метан қауіпті: ол климатқа көмірқышқыл газынан 25 есе көп әсер етеді.

Батареяларды, ескі тұрмыстық химиялық заттарды немесе бояуларды тастаған кезде біз қауіпті химиялық процестерді бастаймыз. Мысалы:

Металдар қышқылдармен әрекеттесіп сутегі түзеді, ол жарылуы мүмкін:



Тазалау өнімдеріндегі сілтілер мен қышқылдар жылу бөлінуімен бейтараптандыру реакцияларына түсуі мүмкін.

Ауыр металдар (сынап, қорғасын, кадмий) топырақ пен суға түсіп, экожүйені бұзады.

Тұрмыстық қатты қалдықтарды кәдеге жаратудың әртүрлі технологиялары бар:

- қордалау (Dharnaik, A.S. және т.б., 2024).
- пиролиз (Rodrigues, J.A.P. және т.б., 2024);
- плазмалық өңдеу (Bhatt, K.P. және т.б., 2022; Chen, H. және т.б., 2024);
- жағу (Chen, B. және т.б., 2023).

ТҚҚ компост жасау – қалдықтардың органикалық компоненттерінің биототығуының экзотермиялық процесі болып табылатын анаэробты микроорганизмдер көмегімен биологиялық өндеуді қамтитын әдіс. Экзотермиялық биологиялық тотығу процесі арқылы қол жеткізіледі, онда органикалық субстрат микроорганизмдердің аралас популяциясының аэробты биологиялық ыдырауына ұшырайды, бұл ылғалды жағдайда температураның жоғарылауына әкеледі. Бұл технологияны қолдану арқылы 50%-ға дейін биологиялық тыңайтқыштарды (компост), сондай-ақ әртүрлі газдардың шамамен 50%-ын (мысалы, биогаз және көмірқышқыл газы) және 10%-ға дейін басқа жанама өнімдерді шығаруға болады.

Компосттың екі түрі бар: аэробты компосттау (Abbas, R.I. және т.б., 2024) және қатты қалдықтарды өнеркәсіптік қордалау (Сао, Х. және т.б., 2023).

Аэробты компосттау кезінде анаэробты бактериялар көбейеді, өйткені ыдырау қалдықтардың тереңірек қабаттарында жүреді, жылу энергиясын өндіретін ашытумен бірге жүреді (Abbas, R.I. және т.б., 2024). Нәтижесінде жәндіктердің жұмыртқалары, гельминттердің жұмыртқалары мен дернәсілдері, сондай-ақ патогендік микроорганизмдер 50-ден 70 °C-қа дейінгі температураның әсерінен жойылады. Қатты қалдықтардың ыдырауы көмірқышқыл газы мен су буының бөлінуіне әкеледі.

Әдістің кемшіліктері: оларды кәдеге жаратпастан парниктік газдардың белсенді шығарындылары. Қатты қалдықтарды өнеркәсіптік қордалау 1930 жылдардан бастап дамып келеді (Сао, Х. және т.б., 2023). Ол Дания, Австрия, Германия, Бельгия және Нидерланд сияқты ЕО елдерінде танымал болды Abis, M. және т.б., 2020, мұнда барлығы 400-ге жуық қоқыс өңдейтін зауыт бар.

Орталықтандырылған қорданы үш бөлек технологияға бөлуге болады:

- Танаптағы үйінділерде (Dronia, W. және т.б., 2024);
- Статикалық стекте (Zajac, M. және т.б., 2024);
- Көлденең реакторда (Sobieraj, K. және т.б., 2021).

Үйінділермен қордалау (орамдық үйінділер) қалдықтардың ауаға орналастырылып, арнайы машиналармен жүйелі түрде аударылуын білдіреді. Биіктігі 3 м-ге дейін, ені 3-тен 6 м-ге дейін және ұзындығы бірнеше жүз метрге дейін үйінді жасалады. Органикалық заттардың тотығуы ауа мен оттегі еркін айналатын 1 м тереңдікте жүреді.

Әдістің кемшіліктері:

- қорданың қалыптасу кезеңі 4 айдан 6 айға дейін немесе одан да көп;

- қорда жасау үшін үлкен аумақ қажет;
- жағымсыз иістің таралуы, фильтраттың төгілуі және т.б.

ТҚҚ пиролизі – оттегінің жетіспеушілігі немесе жеткіліксіз мөлшері кезінде қалдықтардың органикалық бөлігінің термиялық ыдырауы, нәтижесінде пиролиз газы мен қатты көміртегі қалдықтары түзіледі (Du, Y. және т.б., 2021)

Пиролиз өнімдерінің мөлшері мен құрамы қалдықтардың құрамына және ыдырау температурасына байланысты. Қалдықтарды жағудың орнына пиролизді қолдану газ шығарындыларының көлемін және олардағы улы компоненттердің құрамын күрт төмендетуге мүмкіндік береді.

Пиролиз температура немесе қыздыру жылдамдығы сияқты жұмыс параметрлерін реттеу арқылы әртүрлі пропорцияларда қатты, сұйық және газ тәрізді өнімдердің комбинациясын өндіруге жан-жақты мүмкіндік береді. Қалдықтардың термиялық ыдырауы шайырдың түзілуін барынша азайтатын немесе толығымен жоятындай етіп жүзеге асырылуы мүмкін немесе қажетті соңғы өнімдердің бірі ретінде шайыр алу үшін оңтайландырылған болуы мүмкін (Xu, M.-X. және т.б., 2021). Пиролиз қондырғылары процесс жүретін жылу жағдайларына байланысты жіктеледі (Chatterjee, R. және т.б., 2021)

- төмен температуралы (450–500⁰C), газдың минималды шығуымен, шайырлардың, майлардың және қатты қалдықтардың максималды мөлшерімен сипатталады (Nobre, C. және т.б., 2021);

- орташа температура (800⁰C дейін), шайырлар мен майлардың азайған мөлшерімен газ өнімділігінің жоғарылауымен сипатталады;

- жоғары температура (800⁰C жоғары), газдың максималды шығуымен және шайырлардың ең аз мөлшерімен сипатталады (Chen, T. және т.б., 2021).

Пиролизді қолдану арқылы ТҚҚ қайта өңдеу технологиялары өте экологиялық таза болып келеді.

Плазмалық қалдықтарды тазарту қондырғысының жұмыс принципі оттекті оқшаулау, оңтайлы қысым жасау және қалдықтарды төмен температуралы плазма ағынымен өңдеу кезінде қалдықтарды кем дегенде 1200⁰C өте жоғары температураға ұшырату болып табылады (Park, D.K. және т.б., 2021). Температуралық шарттарды қатаң сақтау қайта өңдеу кезінде синтез газында сұйық фракцияның, сондай-ақ төмен температурада қалдықтарды өңдеу кезінде пайда болатын шайырлардың пайда болуын болдырмауға көмектеседі. Сонымен қатар, өте жоғары температураны пайдалану улы немесе тұрақты қалдық компоненттердің толық ыдырауына мүмкіндік береді және ерекше қауіпті заттардың түзілуіне жол бермейді (Gonçaves, M.F.S. және т.б., 2022).

Плазмалық газдандыру қондырғысының жұмыс принципін келесідей сипаттауға болады (Bhatt, K.P. және т.б., 2022; Chen, H. және т.б., 2024):

- Қалдықтар тиеу шахтасына салынады. Салыну процесі қалдықтардың түсу жылдамдығы мен көлемі бақыланатын жабық сақтау құлпы арқылы жүзеге асырылады.

- Ауа мен су буы реакторға беріледі, онда қоспа кейін төмен температуралы плазма ағынымен өңделеді.

- Синтез-газ реактор камерасының түбінен үздіксіз беріледі.

- Алынған синтез-газ жану үшін газ қазандығына немесе салқындату үшін салқындатқышқа берілуі мүмкін, содан кейін тазалау және сүзу орындалады.

- Тазалаудан кейін синтез-газ компрессорға беріледі, онда ылғал жойылады, сүзіледі, содан кейін газ турбинасына беріледі.

- Қалған күл және кейбір жанбайтын материалдар су ыдысының түбіне шөгеді, онда шлактарды алып тастамас бұрын салқындатылады.

Плазманы газдандыру қондырғысының үздіксіз жұмысын қамтамасыз ету үшін плазмалық ағынды үнемі күтіп ұстау, ауа-бу қоспасын мезгіл-мезгіл беру және оның синтез-газға айналуы кезінде реактордағы қалдықтардың деңгейін бақылау қажет.

Плазманы қайта өңдеудің артықшылықтары:

- Қайта өңдеу өте жоғары – 1200°C жоғары температурада жүзеге асырылады, соның арқасында органикалық және бейорганикалық қалдықтар атмосфераға улы қауіпті диоксиндер мен фурандар шығармай ыдырайды. Қауіпті заттардың шығарындылары плазмалық ағындардың әрекеті және реакторлардың арнайы конструкциясы есебінен барынша азайтылады.

- Қайта өңдеу процесінде шаймалау болмайды, өйткені қалдықтар реакторға түсер алдында кептіріліп, ұсақталады.

- Қалдықтарды плазмалық қайта өңдеу қалдықтарды сақтауды қажет етпейтін жабық процесс. Келіп түскен қалдықтар дереу қайта өңдеуге жіберіледі және өңдеуді күткенше сақталмайды.

- Қалдықтарды плазмалық қайта өңдеу екі есе пайда әкеледі, өйткені қалдықтар қауіпсіз жойылады, ал алынған энергия тек станцияның жұмысына ғана емес, сонымен қатар тұрғындардың қажеттіліктеріне де жұмсалады.

- Қайта өңдеу нәтижесінде қалдықтардан қатты қалдық алынады. Алынған шлак көлемі қалдықтардың бастапқы көлемінің шамамен оннан бір бөлігін құрайды.

Плазмалық өңдеудің кемшіліктері:

- Қатты қалдықтар арнайы жолмен жойылуға ұшырайды.

- Плазма генераторының жұмысы жоғары энергия шығындарын талап етеді.

- Бұл әдісті қолдану екінші реттік шикізат ретінде пайдалануға болатын қалдықтар санатын толығымен жоюға әкеп соғады.

- Жабдықты сатып алу және пайдалану шығындары қалдықтарды жоюдың басқа әдістеріне қарағанда жоғары, сондықтан өтелу мерзімі ұзағырақ.

Тұрмыстық қатты қалдықтарды жағу технологиясы келесі кезеңдерді қамтиды (Chen, B. және т.б., 2023; Sikder, S. және т.б., 2024):

- Екіншілік шикізат ретінде пайдалануға болатын компоненттерді оқшаулау мақсатында қалдықтарды сұрыптау; жағуға болмайтын компоненттерді (металл, аккумуляторлар және т.б.), сондай-ақ жағуға тыйым салынған компоненттерді (пластик, құрамында сынап бар және т.б.) бөлу (Wikira, N. және т.б., 2024).

- Қатты қалдықтарды төмен температурада алдын ала өңдеу (Kuo, W.-C. және т.б., 2019).

- Электр энергиясын өндіру мақсатында сұрыпталған тұрмыстық қатты қалдықтарды жағу (Traven, L., 2023).

Қазақстан Республикасының ғалымдары сұрыпталған тұрмыстық қатты қалдықтарды жағу кезінде пайда болатын газ тәрізді, сұйық және қатты қалдықтарды толық пайдаланудың технологиялары мен шешімдерін әзірледі. Бұл жаңашылдық қатты тұрмыстық қалдықтарды кәдеге жаратуға қалдықсыз тәсілдің пайда болуына әкелді.

Тиісті кәдеге жарату технологиясын анықтау үшін қатты тұрмыстық қалдықтардың құрамы мен сипаттамалары туралы ақпарат қажет. Қазақстан Республикасында әр қалада басқа қалалардағы қалдықтардың құрамынан ерекшеленетін өзіндік бірегей орташа қалдықтар құрамы бар. Зерттеудің мақсаты – Қазақстанның алты қаласынан: Астана, Алматы, Шымкент, Ақтөбе, Қарағанды және Өскемен қалаларының тұрмыстық қатты қалдықтарының физика-химиялық құрамын, физикалық және жылулық қасиеттерін талдау.

Қолданыстағы зерттеулерден айырмашылығы, бұл зерттеуде қаралып жатқан қалалардың әртүрлі аудандарынан ондаған контейнерлерді толығымен босатуды қамтитын жалғыз қалдық үлгісі пайдаланылады.

Осылайша, қала бойынша қатты тұрмыстық қалдықтардың орташа құрамы сақталды. 2021 жылы қабылданған Қазақстан Республикасының Экологиялық кодексіне сәйкес ТҚҚ-ның кейбір құрамдас бөліктері энергияны кәдеге жаратуға жатпайды (The Law of the Republic of Kazakhstan, 2023):

- сұйық қалдықтар (Karunasena, G. және т.б., 2024);

- жарылғыш, коррозиялық, тотықтырғыш, тұтанғыш немесе жанғыш қауіпті қалдықтар (Pech-Rodríguez, W.J. және т.б., 2024);
- құрамында тұрақты органикалық ластағыштар бар қалдықтар (Bułkowska, K. және т.б., 2024);
- құрамында сынап бар шамдар мен құрылғылар (Chalkidis, A. және т.б., 2020);
- электронды және электр жабдықтары (Torrubia, J. және т.б., 2024);
- түсті және қара металдардың сынықтары (Long, Y. және т.б., 2024);
- литий батареялары, қорғасын-қышқылды аккумуляторлар (Yanamandra, K. және т.б., 2022);
- құрылыс материалдарының қалдықтары (Patil, Y.R. және т.б., 2024).

Барлық тізімделген материалдарды лицензиясы бар кәсіпорындар арнайы бекітілген технологияларды пайдалана отырып жоюы керек.

Қазіргі уақытта қоқыс жинайтын контейнерлерде сақталған аралас қалдықтарға тұрғындар жауап бермейді, нәтижесінде барлық қатты тұрмыстық қалдықтар сұрыптау пунктіне бірге келіп түседі. Электр шамдары, құрылғылар, батареялар және құрылыс қалдықтары сияқты заттарды қатты қоқыс контейнерлеріне тастауға болмайды, дегенмен адамдар бұл тыйым салынған материалдарды кейде контейнерлерге тастайды.

Екінші жағынан, қолданыстағы қатты қалдықтарды сұрыптау зауыттарында сұрыптау көрсеткіші шамамен 12% құрайды, ал талап етілетін минимум шамамен 40% құрайды. Басқаша айтқанда, кәдеге жаратуға арналған тіпті сұрыпталған қатты қалдықтардың құрамын дәл қазір болжау мүмкін емес.

Қалдықтарды жинау тек ірі елді мекендерде ғана жүргізілсе, ауылдық жерлерде мұндай қызмет жиі жетіспейді. Оның үстіне барлық қалаларда сұрыптау зауыттары жоқ.

Алынған нәтижелер қатты тұрмыстық қалдықтарды тиімді кәдеге жарату технологияларын талдауға, сондай-ақ жартылай өнеркәсіптік пиролиз, өртеу, плазмалық өңдеу және кордалау бойынша тәжірибелік зерттеулер жүргізуге мүмкіндік береді.

2. Материалдар мен әдістер

Тұрмыстық қатты қалдықтарды жинау қызметімен қамтылған Қазақстан Республикасы халқының үлесі 45,3%-дан - 96% - ға дейін және тұрмыстық қатты қалдықтарды қайта өңдеу үлесі 0,23 %-дан 44,33% - ға дейін өскен. (Glazyrin S.A. және т.б., 2024).

ТҚҚ-дың физика-химиялық құрамын бағалау қала немесе аймақ үшін қалдықтарды басқару стратегиясын әзірлеуден бұрын болуы керек. Қалдықтардың құрамы туралы нақты және сенімді деректер оның ресурстық (материалдық және энергетикалық) әлеуетін бағалау және қайта өңдеу немесе кәдеге жаратудың нақты технологияларын енгізуді негіздеу үшін қажет. Атап айтқанда, жеке құрамдастардың болуын түсіну қалдықтарды сұрыптау, компосттау немесе жағудың экологиялық және экономикалық тиімділігін болжауға мүмкіндік береді (The Law of the Republic of Kazakhstan, 2024).

ТҚҚ-дан алынатын шикізат пен энергияны қайталама өңдеуді жоспарлау стратегиялары олардың құрамы мен қасиеттері туралы жан-жақты мәліметтерге негізделуі керек. Сондықтан қалдықтардың сандық және сапалық сипаттамаларын зерттеудің маңызы зор (Li, J. және т.б., 2024).

Қалдықтардың физика-химиялық құрамын зерттеу қатты қалдықтардың жылулық қасиеттерін бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл олардың энергетикалық әлеуетін және термиялық өңдеу әдістерінің қалпына келтіру және кәдеге жарату үшін жарамдылығын, сондай-ақ қайталама отын алу мүмкіндігін бағалау үшін қажет (Bhatt, A.K. және т.б., 2024). Осыған байланысты қатты қалдықтардың физикалық-химиялық құрамы бойынша жылулық қасиеттерін есептеудің адекватты әдістерінің өзектілігі артады. Тұрмыстық қатты қалдықтардың негізгі жылулық қасиеттеріне ылғалдылық, күлділік және жылулық құндылық жатады.

Қалдықтардың құрамындағы барлық ылғал сыртқы және гигроскопиялық болып бөлінеді (Qi, Y.-P. және т.б., 2022). Сыртқы ылғал – ауа-құрғақ күйге дейін кептіру кезінде заттың жоғалтқан ылғалдылығы. Ауада кептірілген қалдықтар әдетте салмағын бөлме температурасында (шамамен 15–20°C) және қалыпты салыстырмалы ылғалдылықта (50%) өзгермейтін қалдықтар болып саналады. Гигроскопиялық ылғал – 105°C температурада кептіру кезінде ауада кептірілген заттың жоғалтқан ылғалдылығы. Бұл бөлшектермен мықтап ұсталатын су буы.

Сыртқы ылғалды өлшеу арнайы кептіру шкафтарын пайдалануды және ұзақ уақыт бойы (5–8 күн) үлкен үлгілерді талдауды қажет ететін еңбекті көп қажет ететін процесс. Нәтижесінде қалдықтардың жалпы ылғалдылығы әдетте бағаланады. Жалпы ылғалдылық қалдық үлгісінің бастапқы массасы мен құрғақ үлгі массасы арасындағы айырмашылықтың қалдық үлгісінің бастапқы массасына қатынасы ретінде есептеледі. Қоршаған орта ылғалдылығының жалпы ылғалдылыққа қатынасы әдетте 0,8-ден 0,9-ға дейінгі диапазонда, орташа мәні шамамен 0,85 (Li, J. және т.б., 2024).

Қалдықтардың ылғалдылығына ауаның ылғалдылығы, жауын-шашын және пайдаланылатын жинау жүйесі, сондай-ақ қалдықтардың физикалық-химиялық құрамы сияқты әртүрлі факторлар әсер етеді. Азық-түлік қалдықтары сияқты ТҚҚ-ның кейбір құрамдас бөліктерінің ылғалдылығы жоғары болуы мүмкін (60-70%), ал шыны және ПЭТ бөтелкелер сияқты басқа материалдардың ылғалдылығын шамалы деп санауға болады (Li, J. және т.б., 2024).

Күлдің құрамы әдетте отынның толық жануы кезінде минералды қоспалардан түзілетін жанбайтын (сусыз) қалдық пайызы ретінде анықталады. Күлдің құрамы биомассаның пиролизіне тікелей әсер етеді (Puri, L. және т.б., 2024). Зертханалық жағдайларда ТҚҚ-ның күлділігі құрғақ қалдықтар үлгісін жағу кезіндегі бастапқы ТҚҚ мен күл қалдығының массасының айырмашылығымен гравиметриялық жолмен анықталады. Жылулық құндылық заттың толық жануы кезінде бөлінетін жылудың жалпы мөлшері, оның ішінде жану өнімдерін салқындату кезінде су буының конденсация жылуы болып табылатын жалпы жылулық құндылық (GKV) бойынша өлшенеді. Немесе оны таза жылулық құндылық (NKV) деп те атауға болады, ол су буының конденсация жылуын есептемегенде толық жану кезінде бөлінетін жылу болып табылады (Ratomski, P. және т.б., 2023).

Жоғары жылулық мәні Q_{GCV} және төменгі жылулық құндылығы Q_{LCV} (кДж/кг) келесі қатынаспен байланысты

$$Q_{LCV} = Q_{GCV} - 25,1 \cdot (9H + W) \quad (1)$$

мұндағы $25,1 \cdot (9H + W)$ – жанғыш заттың сутегі H (кг/кг) жануы кезінде түзілетін заттың ылғалдылығы W (кг/кг) булануға жұмсалған жылу, кДж/кг. Ылғалдылық W және сутегі H мәндерін 1-кестеден табуға болады.

Жоғары жылу құндылығын анықтаудың тәжірибелік әдісі калориметриялық бомбадағы қалдық массаның толық жануына негізделген. Төменгі жылу мөлшері (1) формуласы бойынша қайта есептеледі. Дегенмен, бұл үшін салмағы бірнеше грамм болатын ТҚҚ зертханалық сынамасын дайындау қажет, ол құрамы бойынша барлық ТҚҚ үшін репрезентативті болуы керек. Осыған байланысты ылғалға, күлділікке және жекелеген компоненттердің жылулық құндылығына негізделген жылу құндылығын жанама бағалаудың әртүрлі тәсілдері әзірленді.

Қатты қалдықтардың элементтік құрамы туралы деректер болмаған жағдайда жеке құрамдас бөліктердің массалық формулалары туралы деректер пайдаланылады.

Бүкілресейлік жылу техникалық институты («ВТИ» АҚ) тұрмыстық қатты қалдықтардың негізгі жылулық сипаттамаларын эксперименталды түрде анықтау әдісін әзірледі (Li, J. және т.б., 2024). Әдіс компоненттердің топтарын (қағаз, тоқыма, пластмасса, металдар, басқа бейорганикалық материалдар және тамақ қалдықтары сияқты)

анықтауды және олардың жалпы қалдық ағынындағы массалық үлесін анықтауды қамтиды. Содан кейін зертханалық жағдайда ылғалдылық пен күлділік әр топтың құрғақ массасы бойынша өлшенеді және әр топ үшін жанудың жалпы меншікті жылуы есептеледі (кесте 1).

ТҚҚ құрамының құрамдас бөліктерінің кеңейтілген тізімі әрбір компоненттің жану жылуын дәлірек анықтауға мүмкіндік береді. Компоненттердің кеңейтілген тізімінің қасиеттері туралы анықтамалық деректер негізінде алынған нәтижелер жоғарғы жану жылуын береді (12100 кДж/кг) (Soares, C., 2015). Бұл сәйкессіздікті жеке құрамдас бөліктердің жану жылу мәндерін асыра бағалаумен және олардың ылғалдылығын төмен бағалаумен түсіндіруге болады.

Кесте 1. ТҚҚ құрамындағы жеке элементтердің концентрациясы (Nasrullah, M. және т.б., 2015; Williams, P.T., 2005; Young, G.C., 2010)

ТҚҚ құрамдас атауы	Ылғалдылық, %	Жол массасына шаққандағы күл мөлшері, %	Құрғақ, күлсіз (жанғыш) массаға негізделген элементтік құрамы, %					Төменгі калориялық құндылығы Q_{LCV} , кДж/кг
			C	H	O	N	S	
Қағаз	6,0/24	6,0/4,8	40,7/32,8	5,6/4,6	41,2/33,4	0,3/0,3	0,2/0,1	22,4/13,5
Пластмасса	2,0/13,3	10,0/4,7	58,7/67,5	7,0/10,2	22,3/3,9	0/0,2	0/0,2	27,8/33,4
Тамақ қалдықтары	70,0/65,4	5,0/3,8	12,6/15,8	1,7/2,4	9,9/11,3	0,7/1,2	0,1/0,1	3,1/7,3
Тоқыма	10,0/12,4	2,5/5,9	49,4/44,9	5,9/5,7	28,0/27,9	4,1/2,9	0,1/0,3	23,5/20,4
Ағаш	20,0/14,8	1,5/2,4	39,5/39,9	4,7/5,1	34,1/37,1	0,2/0,6	0,1/0,1	19,8/16,8
Резеңке	2,0	10,0	86,2	1,1	0	0,2	0,5	29,9
Былғары	10,0	10,0	53,4	7,1	10,3	8,9	0,4	23,4
Бір рет қолданылатын жаялықтар	66,9	1,4	16,1	2,5	12,9	0,2	0,1	7,5
Инертті материалдар	0	100	0	0	0	0	0	0
Жұқа фракция (скринингтер)	33,0/41,1	34,2/15,0	19,0/22,1	2,4/3,1	10,1/17,5	0,6/0,9	0,7/0,3	7,3/9,6
Қатты отын қалдықтары (ТҚҚ)	15/7,3	8,4/14,0	45,5/43,7	6,4/5,8	24,0/28,5	0,5/0,5	0,2/0,2	20,2/18,7

Екінші жағынан, бұл есептеулер сонымен қатар «дәстүрлі» калориялық фракцияларға (мысалы, макулатура мен полимерлер) қоса, калориялық құндылық бойынша маңызды емес құрамдастардың үлесін (мысалы, аралас орау, мысалы, Tetra Pak жөргектері және т.б.) ескереді. Осы құрамдас бөліктер бірігіп, ТҚҚ-ның жалпы жылулық құндылығын 10-15%-ға жалпы арттыруға ықпал етеді. Осылайша, ТҚҚ жылу қасиеттерін есептеу арқылы бағалау әртүрлі нәтижелер бере алатын әртүрлі әдістерді қолдану арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Бұл жағдайда орындалған есептеулер жеткілікті сенімді болуы үшін мүмкін болатын қателер мен дәлсіздіктерді, сондай-ақ олардың пайда болу себептерін сыни тұрғыдан бағалау қажет. Орындалған есептеулер калориялық құндылықты бағалау кезінде негізгі кіріс деректері жеке құрамдастардың, оның ішінде мазмұны мен жылулық құндылығы бойынша маңыздылары ғана емес, сонымен қатар

салыстырмалы түрде аз мөлшерде қамтылған басқалары туралы ақпарат болып табылатынын растайды. Отынның физика-химиялық құрамын әр түрлі массалар түрінде анықтауға болады: дымқыл массалық компоненттер (г), аналитикалық массалық компоненттер (а), құрғақ массалық компоненттер (d), құрғақ күлсіз (жанғыш) массалық компоненттер (daf) және органикалық массалық компоненттер (о) (кесте 2).

Кесте 2. Отынның физика-химиялық құрамы

Белгілеу	Көміртек, С	Сутек, Н	Оттек, О	Азот, N	Органикалық күкірт, S _{орг}	Пиритті күкірт, S _{пир}	Гидратациялық ылғалдылығы, W _{гид}	Балласт		
								Күл, А	Ылғалдылық, W	
									Талдаулық ылғалдылық, W _{ан}	Сыртқы ылғалдылық, W _{ex}
o	Органикалық масса									
d af	Құрғақ күлсіз (жанғыш) массалық компоненттер									
d	Құрғақ массалық компоненттер									
a	Аналитикалық массалық компоненттер									
г	Дымқыл массалық компоненттер									

Күлдің құрамын анықтау. Алдымен бос фарфор тигельдері муфельді пеште (550±10)°C температурада 60 мин ұсталды. Тигельдердің массасы аналитикалық таразыда (таразыларда) тигельдерді бөлме температурасына дейін салқындатқаннан кейін 0,1 мг дәлдікпен өлшенді. Әрі қарай барлық салмақ өлшеулері ұқсас әдіспен жүргізілді. Содан кейін тигельдерге ТҚҚ салмағы 1±0,01 г болатын мөлшері салынды. Осыдан кейін сынамасы бар бұл тигельдер салқын пешке қойылды. Пеш өз ішіндегі кеңістікті (250±10)°C температураға дейін қыздырды. Ұшатын заттарды шығару үшін бұл температура пештің ішінде 60 минут бойы ұсталды. Процедура (550±10)°C температурада 120 минут бойы қайталанды. Кептіру және салқындағаннан кейін тигельдер өлшенеді. Құрғақ күйдегі (d) күлдің мөлшері (A^d) мына формуламен есептелді:

$$A^d = \frac{m_k - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - W^a} \% \quad (2)$$

m_k – күл қалдығы бар тигельдің массасы, кг;

m₁ – бос тигельдің массасы, кг;

m₂ – сынамамен бірге тигельдің массасы, кг;

W^a – аналитикалық үлгідегі ылғалдың массалық үлесі, %.

Ұшқыш органикалық қосылыстардың шығымын анықтау. Муфельді пеш (900±5)°C температураға дейін алдын ала қыздырылады. Бос тигельдер пеште 7 мин ұсталады. Содан кейін тигельдер пештен шығарылады, салқындатылады және өлшенеді. Массасы 1±0,01 г аналитикалық үлгі тигельге таратылып орналастырылады. Үлгіні пеште 900°C температурада 7 минут ұстайды. Салқындағаннан кейін ұшпайтын қалдықтары бар тигельдер жабылады және аналитикалық таразыда өлшенеді. Ұшқыш органикалық қосылыстардың V^a шығымы мына формула бойынша есептеледі:

$$V^a = \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - W^a [\%] \quad (3)$$

m_1 – қақпағы бар бос тигельдің массасы, кг;

m_2 – қақпағы бар тигельдің және күйдірілгенге дейінгі сынаманың массасы, кг;

m_3 – күйдірілгеннен кейінгі қақпағы бар тигельдің және ұшпайтын қалдықтың массасы, кг;

W^a – аналитикалық үлгідегі ылғалдың массалық үлесі, %.

Жалпы ылғалдылықты анықтау. Бос тигель өлшенді. Салмағы $1 \pm 0,01$ г үлгіні өлшейтін тигельге салып, өлшеп, кептіру пешінде $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ температурада 60 минут бойы қыздырылды. Содан кейін өлшенетін тигель ылғалды сіңірмеу үшін 10-15 с ыстық күйде өлшенді. Жалпы ылғалдың массалық үлесі отын компоненттерінің орташа мөлшері үшін мына формула бойынша есептеледі:

$$W_t^r = \frac{(m_2 - m_3) + m_4}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

m_1 – бос тигельдің массасы, кг;

m_2 – сынамамен бірге кептіруге дейінгі тигель массасы, кг;

m_3 – кептіруден кейінгі үлгімен бірге тигельдің массасы, кг;

m_4 – қаптамадан жиналған ылғалдың массасы, кг.

Морфологиялық құрамын анықтау. ТҚҚ бастапқы үлгісі ауа температурасы $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ және салыстырмалы ылғалдылығы 80% аспайтын бөлмеде картон қағазға жұқа қабатқа орналастырылды. 18,63 кг үлгінің жалпы массасы зертханалық таразы арқылы анықталды. Үлгі оның құрамдас бөліктеріне қысқыштар арқылы бөлінді. Әрбір жеке құрамдас бөлек науаға орналастырылды. Морфологиялық құрамы ± 10 мг дәлдікпен дәл зертханалық таразыларды пайдаланып гравиметриялық жолмен өлшенді. Үлгінің жалпы массасы оның құрамдас бөліктеріне: қағаз (картон), тоқыма (шүберек бұйымдары), пластмасса, органикалық қалдықтар, керамика, металл, резеңке, ағашқа бөлінді. Үлгінің әрбір құрамдас бөлігінің мазмұны үлгінің жалпы массасының пайызы ретінде мына формула бойынша анықталды:

$$X^i = \frac{m_{\text{компонент}}}{m_{\text{жалпы}}} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

$m_{\text{компонент}}$ – сынама компонентінің массасы, кг;

$m_{\text{жалпы}}$ – сынаманың жалпы массасы, кг.

Жану жылуының мәнін анықтау. Зертханалық тәжірибе бірнеше кезеңнен тұрады: 1. үлгіні жануға дайындау; 2. үлгіні жағу; 3. қоршаған ортаның әсерін барынша азайтуды ескере отырып нәтижелерді бағалау. Кезеңдерді толығырақ қарастырайық. Алдын ала ұсақталған үлгі эксикаторда кептірілген және салмағы $1 \pm 0,01$ г үлгіге престелді (1-сурет). Үлгі калориметриялық бомбаға салынып, жандырылды.

Зерттеу үшін келесі құрал-жабдықтар пайдаланылды:

- максималды салмақ шегі 2200 г, рұқсаты 0,01 г, орнатылған калибрлеу массасы, пайыздық өлшеу режимдері, АСАІ функциясы бар өнім бөліктерінің санын санау, компаратор, статистикалық есептеу функциясы, сондай-ақ материалдың магниттік тығыздығын өлшеу мүмкіндігі бар жоғары дәлдіктегі зертханалық таразылар 2200 г, рұқсат ету мүмкіндігі. ілмек. Қазақстан Республикасында өндірілген;

- 2,0 дәлдік класы бар G-2-210 салмақтары. Жинаққа кіретін салмақтардың номиналды мәндері 1 г, 2 г, 5 г, 10 г, 20 г, 50 г және 100 г болды. Материал - көміртекті болат. Коррозияға қарсы жабын - хром. Қазақстан Республикасында өндірілген;

- АБК-1 бомбасының калориметрі, редукторы бар оттегі баллоны, манометрі және желдеткіші бар, компьютерді қосуға арналған шығысы бар, көмір, кокс, шикі мұнай, дизельдік отын, керосин, бензин және табиғи газ сияқты қатты, сұйық және газ тәрізді отындардың жану жылуын өлшеуге арналған. Қазақстан Республикасында жасалған.

Жиналған екіншілік шикізаттың пайызымен сипатталатын қалдықтарды бөлек жинау тиімділігінің объективті шегі қалдықтардағы пайдалы құрамдастардың нақты мөлшері болып табылады: тіпті қалдықтарды бөлек жинаудың ең тиімді жүйесі де нақты түзілгеннен артық қайталама шикізатты алуға мүмкіндік бермейді.



Сурет 1. Қысыммен престелген үлгілер

Қалдықтарды бөлек жинауды енгізу кезінде қайталама ресурстар мен қалдықтардың күтілетін ағындарын түсіну ерекше маңызды, себебі:

- алынатын қайталама ресурстардың көлемі мен сапасы қайталама шикізат нарығындағы нақты сұранысқа сәйкес болуы керек;

- бөлек жинауды техникалық ұйымдастыру кезінде қажетті ыдыстардың саны мен түрлерін, қалдықтарды шығару жиілігін, қажетті құрал-жабдықтар мен жұмыс күшінің мөлшерін, сондай-ақ қалдықтарды сұрыптау желісінің күтілетін өнімділігін және басқа факторларды анықтау қажет;

- экономикалық тиімділік көрсеткіштері (шығындық бағасы, рентабельділік және т.б.) алуға болатын қайталама шикізаттың көлемі мен сапасына тікелей байланысты.

Қалдықтарды бөлек жинауды енгізу арқылы қол жеткізуге болатын қайталама шикізат ағындарының сандық және сапалық көрсеткіштерін жекелеген ағындардың көлемдерін және олардың физикалық-химиялық құрамын зерттеу негізінде бағалауға болады.

Қалдықтарды басқарудың заманауи концепциялары әдетте ТҚҚ құрайтын компоненттердің ресурстық әлеуетін барынша пайдалануға бағытталған. Бұл ретте өндеуге қабылданған қалдықтардың құрамы сұрыптау зауыттарында қайталама шикізатты іріктеу дәрежесіне әсер етеді, термиялық өндеу әдістерін қолдану кезінде қалдықтардың жылулық құндылығын және биотехнологияны қолдану кезінде ыдырау процестерінің тиімділігін анықтайды және нәтижесінде белгілі бір технологияның техникалық-экономикалық көрсеткіштеріне әсер етеді.

3. Нәтижелер

Сұрыпталмаған қалдықтар мен ТҚҚ-дың физикалық-химиялық құрамын сұрыптаудан кейінгі зерттеу Астана, Алматы, Қарағанды, Ақтөбе, Шымкент және Өскемен қалалары үшін келесі тәжірибелік мәліметтерді берді (кестелер 3-15).

Кесте 3. Астана қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	40,10	34,09	6,02	24,86	3340,0	1339,34
Пластмасса	15,80	10,27	5,53	22,86	24393,76	3854,21
Қағаз/картон	16,40	10,66	5,74	23,72	9705,97	1591,78
Жаялықтар	6,20	6,20	0,00	0,00	12000,00	744,00
Шыны	5,80	5,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	3,65	0,00	3,65	15,09	17999,41	656,98
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	6,10	6,10	0,00	0,00	7000,00	427,00
Керамика және құрылыс қалдықтары	2,80	0,84	1,96	8,10	0,00	0,00
Металл	1,80	0,90	0,90	3,72	0,00	0,00
Ағаш	0,80	0,40	0,40	1,65	14507,88	116,06
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,55	0,55	0,00	0,00	22000,00	121,00
Барлығы	100,00	75,81	24,20	100,00		8850,37

Органикалық қалдықтар бастапқыда 40,10 % болғанымен, сұрыптау кезінде 34,09 % жойылып, қалдықта 6,02 % немесе 24,86 % құрам үлесімен қалып, 1 кг үшін 3340 кДж жылулық құндылыққа және 1339,34 кДж/кг үлестік жылуға ие болды.

Пластмассаның бастапқы үлесі 15,80 % болып, сұрыптаудан кейін 5,53 % қалдық (22,86 % құрам) сақталып, оның 1 кг жылулық құндылығы 24 393,76 кДж/кг және үлестік жылуы 3854,21 кДж/кг-ке жетті.

Қағаз бен картон 16,40 %-дан 5,74 % қалдыққа (23,72 % құрам) дейін азайып, 9705,97 кДж/кг жылулық құндылықпен 1591,78 кДж/кг үлестік жылу берді.

Жалпы сұрыпталмаған қатты тұрмыстық қалдықтардың (ТҚҚ) үлестік жылулық мәні 8850,37 кДж/кг құрап, қалдықтардың негізгі жылу көзі пластмасса, қағаз/картон және тоқыма болып табылады.

Кесте 4. Астана қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атауы	Үлгідегі компоненттің массасы, кг	Пайыз, %	Жалпы масса, кг	1 кг компоненттің жылулық мәні, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мәні, кДж/кг	ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылғаны, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрамы, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
1	Қағаз/картон	3,91	20,99	18,63	9705,97	2037,06	Органикалық қалдықтар	36,72	31,21	5,51	21,84	3340,00	1226,45
2	Тоқыма және былғары	3,41	18,30		15720,88	2877,52	Пластмасса	19,43	12,63	6,80	26,96	24393,76	4739,71
3	Пластмасса	4,47	23,99		24393,76	5852,93	Қағаз/картон	19,46	12,65	6,81	27,00	9705,97	1888,78
4	Органикалық қалдықтар	4,70	25,23		3340,00	842,62	Жаялықтар	2,87	2,87	0,00	0,00	12000,0	344,40
5	Керамика	1,23	6,60		0,00	0,00	Шыны	6,87	6,87	0,00	0,00	0,00	0,00
6	Металл	0,57	3,06		0,00	0,00	Тоқыма және былғары	2,26	0,00	2,26	8,96	17999,41	406,79
7	Былғары және резеңке	0,08	0,43		25661,24	110,19	Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	5,69	5,69	0,00	0,00	7000,00	398,30
8	Ағаш	0,26	1,40		14507,88	202,47	Керамика және құрылыс қалдықтары	3,26	0,98	2,28	9,05	0,00	0,00
	Барлығы	18,63	100,00			11922,79	Металл	1,95	0,98	0,98	3,87	0,00	0,00

						Ағаш	1,17	0,59	0,59	2,32	14507,88	169,74
						Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,32	0,32	0,00	0,00	22000,00	70,40
						Барлығы	100,00	74,78	25,22	100,00		9244,57

Үлгі құрамында ең көп үлес органикалық қалдықтарға (4,70 кг немесе 25,23 %) тиесілі, олардың 1 кг жылулық құндылығы 3340 кДж/кг және үлгідегі меншікті жылу мәні 842,62 кДж/кг құрайды. Пластмасса 4,47 кг (23,99 %) көлемде болып, 1 кг үшін 24 394 кДж/кг жылулыққа ие, сондықтан үлгінің ең жоғары меншікті жылу мәнін (5852,93 кДж/кг) қамтамасыз етеді. Қағаз-картон 3,91 кг (20,99 %) болып, 9706 кДж/кг жылулық құндылығымен 2037,06 кДж/кг үлестік жылу береді, ал тоқыма мен былғары 3,41 кг (18,30 %) массасымен 2877,52 кДж/кг жылу қосады. Сұрыптау нәтижесінде жалпы ТҚҚ-ның 25,22 %-ы жойылып, қалған бөліктің негізгі жылулық әлеуетін пластмасса (4739,71 кДж/кг) мен қағаз-картон (1888,78 кДж/кг) құрайды. Барлық сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 9244,57 кДж/кг болып анықталды.

Кесте 5. Астана қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент салмағы, кг	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	3,91	20,99	18,63	9705,97	2037,06
2	Тоқыма және былғары	3,41	18,30		15720,88	2877,52
3	Пластмасса	4,47	23,99		24393,76	5852,93
4	Органикалық қалдықтар	4,70	25,23		3340,00	842,62
5	Керамика	1,23	6,60		0,00	0,00
6	Металл	0,57	3,06		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,08	0,43		25661,24	110,19
8	Ағаш	0,26	1,40		14507,88	202,47
	Барлығы	18,63	100,00			11,922.79

Үлгіде ең үлкен үлес органикалық қалдықтарға тиесілі – 4,70 кг немесе 25,23 %, олардың 1 кг жылулық құндылығы 3340 кДж/кг және үлгідегі меншікті жылу мөлшері 842,62 кДж/кг құрайды. Пластмасса 4,47 кг (23,99 %) көлемімен 24 393,76 кДж/кг жылулыққа ие болып, 5852,93 кДж/кг үлестік жылу береді және үлгінің ең үлкен энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Қағаз-картон 3,91 кг (20,99 %) салмағымен 9705,97 кДж/кг жылулық құндылық көрсетіп, 2037,06 кДж/кг меншікті жылу мөлшерін қосады, ал тоқыма және былғары 3,41 кг (18,30 %) массасымен 2877,52 кДж/кг жылу қосады. Жалпы үлгінің массасы 18,63 кг, ал оның жиынтық меншікті жылу мөлшері 11 922,79 кДж/кг болып есептеледі.

Кесте 6. Алматы қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	36,72	31,21	5,51	21,84	3340,00	1226,45
Пластмасса	19,43	12,63	6,80	26,96	24393,76	4739,71
Қағаз/картон	19,46	12,65	6,81	27,00	9 705,97	1888,78
Жаялықтар	2,87	2,87	0,00	0,00	12000,00	344,40
Шыны	6,87	6,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	2,26	0,00	2,26	8,96	17999,41	406,79
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	5,69	5,69	0,00	0,00	7000,00	398,30
Керамика және құрылыс қалдықтары	3,26	0,98	2,28	9,05	0,00	0,00
Металл	1,95	0,98	0,98	3,87	0,00	0,00
Ағаш	1,17	0,59	0,59	2,32	14507,88	169,74
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,32	0,32	0,00	0,00	22000,00	70,40
Барлығы	100,00	74,78	25,22	100,00		9244,57

ТҚҚ негізгі үлесін органикалық қалдықтар (36,72 %), пластмасса (19,43 %) және қағаз-картон (19,46 %) құрайды. Сұрыптау кезінде қалдықтың 25,22 %-ы жойылып, пластмасса мен қағаз-картонның сұрыптаудан кейінгі құрамы тиісінше 26,96 % және 27,00 % болып

айтарлықтай өседі. Жылулық құндылығы бойынша ең жоғары көрсеткіш пластмассаға (24 393,76 кДж/кг) тиесілі, ол сұрыпталмаған ТҚҚ-ның үлестік жылулық мәніне 4739,71 кДж/кг қосып, негізгі энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Жалпы сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 9244,57 кДж/кг құрайды.

Кесте 7. Алматы қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент салмағы, кг	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	5,77	27,00	21,36	9705,97	2620,61
2	Тоқыма/шүберек	1,87	8,76		15720,88	1376,40
3	Пластмасса	5,76	26,96		24393,76	6576,56
4	Органикалық қалдықтар	4,67	21,84		3340,00	729,46
5	Керамика	1,93	9,05		0,00	0,00
6	Металл	0,83	3,87		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,04	0,21		25661,24	52,71
8	Ағаш	0,50	2,32		14507,88	336,58
	Барлығы	21,36	100,00			11692,31

Кестеде берілгендей ең үлкен үлесті пластмасса (5,76 кг немесе 26,96 %) мен қағаз-картон (5,77 кг немесе 27,00 %) құрайды; олардың 1 кг жылулық құндылығы тиісінше 24 393,76 және 9 705,97 кДж/кг, ал үлгідегі меншікті жылу мөлшері 6 576,56 және 2 620,61 кДж/кг болды. Органикалық қалдықтар 4,67 кг (21,84 %) салмағымен 3 340 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 729,46 кДж/кг үлестік жылу береді. Тоқыма/шүберек 1,87 кг (8,76 %) массасымен 15 720,88 кДж/кг жылулық құндылық көрсетіп, 1 376,40 кДж/кг меншікті жылу мөлшерін қамтамасыз етеді. Барлық үлгінің жалпы массасы 21,36 кг құрап, жиынтық меншікті жылу мөлшері 11 692,31 кДж/кг болып анықталды.

Кесте 8. Ақтөбе қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	31,39	26,68	4,71	19,02	3340,00	1048,43
Пластмасса	18,21	11,84	6,37	25,74	24393,76	4442,10

Қағаз/картон	19,34	12,57	6,77	27,34	9705,97	1877,13
Жаялықтар	7,02	7,02	0,00	0,00	12 000,00	842,40
Шыны	5,73	5,73	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	3,24	0,00	3,24	13,09	17999,41	583,18
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	8,77	8,77	0,00	0,00	7000,00	613,90
Керамика және құрылыс қалдықтары	3,29	0,99	2,30	9,30	0,00	0,00
Металл	1,85	0,93	0,93	3,74	0,00	0,00
Ағаш	0,88	0,44	0,44	1,78	14,507.88	127,67
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,28	0,28	0,00	0,00	22000,00	61,60
Барлығы	100,00	75,24	24,76	100,00		9596,41

ТҚҚ негізгі үлесін органикалық қалдықтар (31,39 %), қағаз-картон (19,34 %) және пластмасса (18,21 %) құрайды. Сұрыптау барысында қалдықтың 24,76 %-ы жойылып, пластмасса мен қағаз-картонның сұрыптаудан кейінгі құрамдағы үлесі тиісінше 25,74 % және 27,34 % деңгейіне дейін артады. Жылулық құндылығы ең жоғары компонент пластмасса болып (24 393,76 кДж/кг), ол сұрыпталмаған ТҚҚ-ның үлестік жылулық мәніне 4442,10 кДж/кг қосып, негізгі энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Жалпы сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 9596,41 кДж/кг құрайды.

Кесте 9. Ақтөбе қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент салмағы, кг	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	5,43	27,34	19,87	9705,97	2653,57
2	Тоқыма/шүберек	2,54	12,79		15,720,88	2010,10
3	Пластмасса	5,11	25,74		24,393,76	6279,48
4	Органикалық қалдықтар	3,78	19,02		3340,00	635,18
5	Керамика	1,85	9,30		0,00	0,00
6	Металл	0,74	3,74		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,06	0,30		25661,24	76,97
8	Ағаш	0,35	1,78		14507,88	257,82
	Барлығы	19,87	100,00			11913,13

Кесте 10. Шымкент қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	39,42	33,51	5,91	21,87	3340,00	1316,63
Пластмасса	19,03	12,37	6,66	24,63	24393,76	4642,13
Қағаз/картон	18,89	12,28	6,61	24,45	9705,97	1833,46
Жаялықтар	2,13	2,13	0,00	0,00	12000,00	255,60
Шыны	7,46	7,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	4,66	0,00	4,66	17,23	17999,41	838,77
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	2,43	2,43	0,00	0,00	7000,00	170,10
Керамика және құрылыс қалдықтары	1,32	0,40	0,92	3,42	0,00	0,00
Металл	2,18	1,09	1,09	4,03	0,00	0,00
Ағаш	2,36	1,18	1,18	4,36	14507,88	342,39
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары		0,12	0,00	0,00	22,000,00	26,40
Барлығы	100,00	72,96	27,04	100,00		9425,48

Кестедегі деректерге сәйкес тұрмыстық қатты қалдықтардың негізгі бөлігін органикалық қалдықтар (39,42 %), пластмасса (19,03 %) және қағаз-картон (18,89 %) құрайды. Сұрыптау барысында жалпы қалдықтың 27,04 %-ы жойылып, пластмасса мен қағаз-картонның сұрыптаудан кейінгі құрамдағы үлесі шамамен 24–25 % деңгейіне көтерілді. Жылулық құндылығы ең жоғары компонент – пластмасса (24 393,76 кДж/кг), ол сұрыпталмаған ТҚҚ-ның үлестік жылулық мәніне 4642,13 кДж/кг қосып, негізгі энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Тоқыма және былғары 4,66 % үлеспен 17 999,41 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 838,77 кДж/кг үлестік жылу қосады. Жалпы сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 9425,48 кДж/кг құрайды.

Кесте 11. Шымкент қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент салмағы, кг	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	4,64	24,45	18,96	9705,97	2373,28

2	Тоқыма/шүберек	3,19	16,84		15720,88	2647,29
3	Пластмасса	4,67	24,63		24393,76	6008,90
4	Органикалық қалдықтар	4,15	21,87		3340,00	730,40
5	Керамика	0,65	3,42		0,00	0,00
6	Металл	0,76	4,03		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,07	0,40		25661,24	101,37
8	Ағаш	0,83	4,36		14507,88	633,13
	Барлығы	18,96	100,00			12494,38

Үлгідегі ең ірі үлесті пластмасса (4,67 кг немесе 24,63 %) және қағаз/картон (4,64 кг немесе 24,45 %) құрайды; олардың 1 кг жылулық құндылығы тиісінше 24 393,76 және 9 705,97 кДж/кг, ал үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері 6 008,90 және 2 373,28 кДж/кг болды. Тоқыма/шүберек 3,19 кг (16,84 %) массасымен 15 720,88 кДж/кг жылулық құндылық көрсетіп, 2 647,29 кДж/кг үлестік жылу береді. Органикалық қалдықтар 4,15 кг (21,87 %) салмағымен 3 340 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 730,40 кДж/кг үлестік жылу қосады. Ағаш 0,83 кг (4,36 %) көлемімен 14 507,88 кДж/кг жылулыққа ие болып, 633,13 кДж/кг меншікті жылу мөлшерін қамтамасыз етеді. Жалпы үлгінің массасы 18,96 кг, ал жиынтық меншікті жылу мөлшері 12 494,38 кДж/кг болып анықталды.

Кесте 12. Қарағанды қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	26,80	22,78	4,02	17,23	3340,00	895,12
Пластмасса	16,45	10,69	5,76	24,67	24393,76	4012,77
Қағаз/картон	18,76	12,19	6,57	28,14	9705,97	1820,84
Жаялықтар	5,87	5,87	0,00	0,00	12000,00	704,40
Шыны	11,87	11,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	2,97	0,00	2,97	12,73	17999,41	534,58
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	10,27	10,27	0,00	0,00	7000,00	718,90
Керамика және құрылыс қалдықтары	3,36	1,01	2,35	10,08	0,00	0,00
Металл	2,32	1,16	1,16	4,97	0,00	0,00

Ағаш	1,02	0,51	0,51	2,19	14507,88	147,98
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,31	0,31	0,00	0,00	22000,00	68,20
Барлығы	100,00	76,66	23,34	100,00		8902,80

Қарағанды қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамына сәйкес тұрмыстық қатты қалдықтардың негізгі үлесін органикалық қалдықтар (26,80 %), қағаз-картон (18,76 %) және пластмасса (16,45 %) құрайды. Сұрыптау барысында қалдықтың 23,34 %-ы жойылып, пластмасса мен қағаз-картонның сұрыптаудан кейінгі құрамдағы үлесі тиісінше 24,67 % және 28,14 %-ға дейін өседі. Жылулық құндылығы ең жоғары компонент пластмасса болып (24 393,76 кДж/кг), ол сұрыпталмаған ТҚҚ-ның үлестік жылулық мәніне 4012,77 кДж/кг қосып, негізгі энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Жалпы сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 8902,80 кДж/кг болып есептеледі. Сұрыпталғаннан кейін үлгі құрамында ең көп үлесті қағаз/картон (5,66 кг немесе 28,14 %) және пластмасса (4,96 кг немесе 24,67 %) құрайды; олардың 1 кг жылулық құндылығы тиісінше 9 705,97 және 24 393,76 кДж/кг, ал үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері 2 731,01 және 6 018,60 кДж/кг болды. Тоқыма/шүберек 2,50 кг (12,44 %) салмағымен 15 720,88 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 1 954,99 кДж/кг үлестік жылу береді. Органикалық қалдықтар 3,47 кг (17,23 %) көлемінде 3 340,00 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 575,38 кДж/кг үлестік жылу қосады. Жалпы үлгінің массасы 20,12 кг, ал жиынтық меншікті жылу мөлшері 11 671,92 кДж/кг болып анықталды (кесте 13).

Кесте 13. Қарағанды қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент салмағы, кг	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	5,66	28,14	20,12	9705,97	2731,01
2	Тоқыма/шүберек	2,50	12,44		15720,88	1954,99
3	Пластмасса	4,96	24,67		24393,76	6018,60
4	Органикалық қалдықтар	3,47	17,23		3340,00	575,38
5	Керамика	2,03	10,08		0,00	0,00
6	Металл	1,00	4,97		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,06	0,29		25661,24	74,86
8	Ағаш	0,44	2,19		14507,88	317,07
	Барлығы	20,12	100,00			11671,92

Кесте 14. Өскемен қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	24,54	20,86	3,68	16,11	3340,00	819,64
Пластмасса	18,97	12,33	6,64	29,06	24393,76	4627,50
Қағаз/картон	17,56	11,41	6,15	26,90	9705,97	1704,37
Жаялықтар	6,74	6,74	0,00	0,00	12000,00	808,80
Шыны	8,56	8,56	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	2,67	0,00	2,67	11,69	17999,41	480,58
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	14,46	14,46	0,00	0,00	7000,00	1 012,20
Керамика және құрылыс қалдықтары	2,89	0,87	2,02	8,85	0,00	0,00
Металл	2,24	1,12	1,12	4,90	0,00	0,00
Ағаш	1,14	0,57	0,57	2,49	14507,88	165,39
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,23	0,23	0,00	0,00	22000,00	50,60
Барлығы	100,00	77,15	22,85	100,00		9669,07

Кестедегі мәліметтер бойынша сұрыпталмаған тұрмыстық қатты қалдықтардың негізгі бөлігін органикалық қалдықтар (24,54 %), пластмасса (18,97 %) және қағаз-картон (17,56 %) құрайды. Сұрыптау кезінде жалпы қалдықтың 22,85 %-ы жойылып, пластмасса мен қағаз-картонның сұрыптаудан кейінгі құрамдағы үлесі тиісінше 29,06 % және 26,90 %-ға дейін өсті. Жылулық құндылығы ең жоғары компонент пластмасса болып (24 393,76 кДж/кг), ол сұрыпталмаған ТҚҚ-ның үлестік жылулық мәніне 4627,50 кДж/кг қосып, негізгі энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Тоқыма және былғары 2,67 % үлесімен 17 999,41 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 480,58 кДж/кг үлестік жылу береді. Жалпы сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 9669,07 кДж/кг құрайды.

Кесте 15. Өскемен қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық	Үлгі массасындағы меншікті жылу
---	----------------	--------------------	----------	-------------------	---------------------------	---------------------------------

		салмағы, кг			құндылығы, кДж/кг	мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	5,17	26,90	19,21	9705,97	2610,69
2	Тоқыма/шүберек	2,19	11,42		15720,88	1794,90
3	Пластмасса	5,58	29,06		24393,76	7088,22
4	Органикалық қалдықтар	3,09	16,11		3340,00	538,07
5	Керамика	1,70	8,85		0,00	0,00
6	Металл	0,94	4,90		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,05	0,27		25661,24	68,73
8	Ағаш	0,48	2,49		14507,88	361,91
	Барлығы	19,21	100,00			12462,52

Өскемен қаласы бойынша сұрыпталған қалдықтардың үлгі құрамында ең үлкен үлес пластмассаға тиесілі – 5,58 кг немесе 29,06 %, оның 1 кг жылулық құндылығы 24 393,76 кДж/кг және үлгідегі меншікті жылу мөлшері 7088,22 кДж/кг құрайды. Қағаз-картон 5,17 кг (26,90 %) көлемімен 9705,97 кДж/кг жылулыққа ие болып, 2610,69 кДж/кг үлестік жылу береді. Тоқыма/шүберек 2,19 кг (11,42 %) массасымен 15 720,88 кДж/кг жылулық құндылық көрсетіп, 1794,90 кДж/кг меншікті жылу мөлшерін қамтамасыз етеді. Органикалық қалдықтар 3,09 кг (16,11 %) салмағымен 3340,00 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 538,07 кДж/кг үлестік жылу қосады. Жалпы үлгінің массасы 19,21 кг, ал жиынтық меншікті жылу мөлшері 12 462,52 кДж/кг болып анықталды.

Кестеде 16 қалалар бойынша тұрмыстық қатты қалдықтардың жылулық құндылығын зерттеудің жиынтық нәтижелері берілген.

Кесте 16. Қалалар бойынша тұрмыстық қатты қалдықтардың жылулық құндылығы бойынша қорытындылардың жиынтық кестесі

Қала	Астана	Алматы	Ақтөбе	Шымкент	Қарағанды	Өскемен
Сұрыпталмаған ТҚҚ массасының орташа жылулық мәні, кДж/кг	8850,37	9 244,57	9 596,41	9 425,48	8 902,80	9669,07
Сұрыпталған ТҚҚ массасының орташа жылулық мәні, кДж/кг	11922,7	11692,31	11913,13	12494,38	11671,92	12462,52
Сұрыпталған ТҚҚ массасының төменгі жылулық мәні, кДж/кг	10473,36	10013,78	10013,1	10636,5	9734,72	10068,68

Астана қаласында сұрыпталмаған ТҚҚ-ның орташа жылулық мәні 8850,37 кДж/кг болса, сұрыптаудан кейін бұл көрсеткіш 11 922,7 кДж/кг-ге дейін өсіп, төменгі жылулық мәні 10473,36 кДж/кг құрайды. Алматыда сұрыпталмаған қалдықтардың жылулық құндылығы 9 244,57 кДж/кг, сұрыпталғаны 11 692,31 кДж/кг, ал төменгі жылулық мәні 10 013,78 кДж/кг болды. Ақтөбе, Шымкент және Қарағанды қалаларында да ұқсас үрдіс байқалып, сұрыптаудан кейінгі орташа жылулық мәндер 11 913,13–12 494,38 кДж/кг аралығында болып, төменгі мәндері 10013,1–9734,72 кДж/кг деңгейінде қалды.

Өскеменде ең жоғары сұрыпталған қалдықтың орташа жылулық мәні 12462,52 кДж/кг-ге жетіп, төменгі жылулық мәні 10 068,68 кДж/кг болып тіркелді.

Кестеде 17 қалалар бойынша сұрыпталған ТҚҚ физикалық-химиялық құрамын зерттеудің жиынтық нәтижелері келтірілген.

Кесте 17. Қалалар бойынша сұрыпталған ТҚҚ физикалық-химиялық құрамын зерттеу нәтижелерінің жиынтық кестесі

Қала	Астана	Алматы	Ақтөбе	Шымкент	Қарағанды	Өскемен
ҚТТ	%					
Қағаз/картон	20,99	27,00	27,34	24,45	28,14	26,90
Тоқыма/шүберек	18,30	8,76	12,79	16,84	12,44	11,42
Пластмасса	23,99	26,96	25,74	24,63	24,67	29,06
Органикалық қалдықтар	25,23	21,84	19,02	21,87	17,23	16,11
Керамика	6,60	9,05	9,30	3,42	10,08	8,85
Металл	3,06	3,87	3,74	4,03	4,97	4,90
Былғары және резеңке	0,43	0,21	0,30	0,40	0,29	0,27
Ағаш	1,40	2,32	1,78	4,36	2,19	2,49
Барлығы	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Кестеден көргендей, барлық қалаларда пластмассаның үлесі ең жоғары – ол 23,99 % бен 29,06 % аралығында. Қағаз бен картон да айтарлықтай көп, әсіресе Қарағанды мен Ақтөбеде 27–28 % шамасында. Органикалық қалдықтар үлесі Астанада 25,23 % болса, Қарағанды мен Өскеменде 16–17 % деңгейінде, яғни салыстырмалы түрде төмен. Қалған фракциялар аз мөлшерде: керамика 3,42–10,08 %, металл 3–5 %, ал былғары, резеңке және ағаш үлесі барлық қалаларда 5 %-дан төмен.

4. Талдау

Бұрынғы зерттеулер (Serikova, A. және т.б., 2020; Inglezakis, V.J. және т.б., 2018) негізінен Қазақстанның Астана және Алматы сияқты орталық қалаларының қалдықтарына бағытталған. Бұл қалалар елдегі ең үлкен қалалар. Бұл қалалардағы ТҚҚ құрамын орташа деп санауға болмайды, өйткені ірі қалалардағы өмір сүру сипаттамалары шағын қалалардан айтарлықтай ерекшеленеді. Бұл зерттеудің алдыңғылардан айырмашылығы – Қазақстанның географиясын кеңірек қамту және алты ірі қала мысалында қатты тұрмыстық қалдықтарды талдау.

Зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып, авторлар әрбір қала үшін ТҚҚ жоюдың ең тиімді технологияларына талдау жасады. Зерттеулер $n = 5-6$ өлшемдер үшін параллель жүргізілді. Сонымен қатар, әрбір тәжірибе $m = 10-15$ сериясынан жүргізілді. Эксперименттік деректер үлгілері үшін $p = 0,95$ ықтималдық үшін стандартты ауытқулар мен сенімділік интервалдары есептелді. Бұл статистикалық талдау зерттеу нәтижелерінің жоғары сенімділігін растайды. Өлшемдердің стандартты ауытқуы 2% аспайды.

Қалдықтарды басқарудың заманауи тұжырымдамалары әдетте ТҚҚ құрамдастарына тән ресурстық әлеуетті оңтайлы пайдалануды атап көрсетеді (Karungamye, P., 2024). Сонымен бірге өңдеуге қабылданған қалдықтардың құрамы қалдықтарды сұрыптау зауыттарында қайталама шикізатты іріктеу дәрежесіне әсер етеді, термиялық өңдеу әдістерін қолдану кезінде қалдықтардың жылулық құндылығын анықтайды (Kasiński, S. және т.б., 2024; Glazygin, S.A. және т.б., 2020) және биотехнологияны қолдану кезінде ыдырау процестерінің тиімділігін анықтайды және нәтижесінде белгілі бір технологияның техникалық-экономикалық көрсеткіштеріне әсер етеді.

Сұрыптау процесінің тиімділігі көптеген факторларға байланысты, соның ішінде:

- сұрыптау конвейері бойымен қалдықтардың қозғалу жылдамдығы: қалдықтар неғұрлым баяу қозғалса, соғұрлым ол компоненттер бойынша жақсы сұрыпталады;
- конвейердегі қалдық қабатының қалыңдығы: сұрыптау конвейеріндегі қалдық қабат неғұрлым жұқа болса, қалдықтар соғұрлым мұқият сұрыпталады.

Бірақ жылдамдықты азайту арқылы процестің тиімділігін арттыру өнімділіктің төмендеуіне әкеледі, сондықтан іс жүзінде басты назар жоғары сұрыптау тиімділігіне емес, ең жоғары өнімділікке аударылады. Практикада қолмен сұрыптаудың тиімділігі 0,4–0,8 құрайды.

Компоненттерді алудың тиімділігі бірнеше факторларға байланысты, соның ішінде:

- компоненттің табиғаты (ол сулануға, шіруге және т.б. сезімтал болуы мүмкін);
- қатты қалдықтардың сипаттамалары (бастапқы ылғалдылық, фракциялық құрамы және т.б.);
- маусым мен ауа райы жағдайлары (ылғалдану, мұздату және т.б.);
- қалдықтарды жинау және шығару жүйелері (жалпы немесе бөлек қалдықтарды жинау, тасымалдау кезінде қалдықтардың нығыздалу дәрежесі, артық тиеудің болуы және т.б.).

Бұл зерттеудің негізгі шектеулері тұрмыстық қатты қалдықтар жиналған аймақтардың және осы өңірлердің тұрғындары менталитетінің бір адамға шаққандағы қатты қалдықтардың құрамы мен үлестік көлеміне әсері болып табылады. Бұл шектеулер түзетуді қажет етпейді, өйткені олар болашақ зерттеулерде ескерілетін болады. Келесі қадам - барлық алты қаланың сұрыпталмаған және сұрыпталған қатты қалдықтарын жағу эксперименті. Бұл ретте әрбір қалада қатты тұрмыстық қалдықтарды жағу кезінде пайда

болатын түтін газдарының көлемі мен құрамы, сондай-ақ сұрыпталмаған және сұрыпталған қалдықтарды жағу кезінде пайда болатын күл мен қождың құрамы мен қасиеттері өлшенетін болады.

5. Қорытынды

Зерттеу нәтижесінде келесі нәтижелер алынды:

1. Қазақстанның алты қаласы: Астана, Алматы, Ақтөбе, Шымкент, Қарағанды және Өскемен үшін сұрыпталмаған және сұрыпталған тұрмыстық қатты қалдықтардың физика-химиялық құрамы анықталды;

2. Алты қаланың тұрмыстық қатты қалдықтарының термофизикалық сипаттамалары анықталды: күлділігі, ылғалдылығы, сонымен қатар жоғары (брутто) және төмен калориялық құндылығы.

Қазақстан қалаларындағы қатты тұрмыстық қалдықтардың физикалық-химиялық құрамының нәтижелері:

- Органикалық қалдықтардың мөлшері аймақтардың аспаздық дәстүрлеріне байланысты қолданылатын тамақ өнімдерінің ерекшеліктеріне байланысты өзгереді: оңтүстік пен астанада көбірек, орталық пен шығыста азырақ.

- Жөргек пен нәрестеге арналған көмекші материалдарының мөлшері де әртүрлі: оңтүстікте аз, басқа аймақтарда көп.

- Орташа алғанда, құрамдас бөліктердің мөлшері басқа компоненттер үшін салыстырмалы.

Бұл зерттеудің негізгі нәтижелері әрбір аймақта тұрмыстық қатты қалдықтарды кәдеге жаратудың оңтайлы технологиясын таңдау, сондай-ақ оның тиімділігі мен осы аймақтардағы экологиялық жағдайды әлеуетті жақсартуға қатысты болжамдар болып табылады.

Тұрмыстық қатты қалдықтарды кәдеге жаратудың ең қолайлы және оңтайлы технологиялары синтез газын өндіру және электр энергиясын және қосымша өнімдерді өндіру арқылы, жағу арқылы энергияны үнемдейтін және экологиялық таза пиролиз технологиялары болып табылады. Пиролиз қалдықтардың шағын көлемі үшін әсіресе тұрмыстық қалдықтардан басқа қалдықтардың басқа түрлері болса, оңтайлы түрде қолданылады,

Қатты тұрмыстық қалдықтардың үлкен көлемі үшін авторлар әзірлеген қалдықтар түзілмей жағу процесінің схемасын пайдалану оңтайлы болып табылады. Бұл схема жану процесінде пайда болған қатты, сұйық және газ тәрізді өнімдерді толық кәдеге жарату технологияларын қамтиды. Екі технология да тұрғындардың тіршілік әрекеті нәтижесінде пайда болған жаңа қалдықтарды ғана емес, сонымен қатар елді мекендердегі полигондардың ұяшықтарында жинақталған қалдықтарды кәдеге жаратуға, сол арқылы аумақты қатты тұрмыстық қалдықтардан толық тазартуға мүмкіндік береді.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация – Е.А.; әдістеме – Т.М.; бағдарламалық қамтамасыз ету – А.К., Л.К., Т.М.; тексеру – Ж.И., А.С.; формальды талдау – Т.М., А.К.; тергеу – Р.С.; ресурстар – Р.С., А.С.; деректер кураторы – Т.М.; жазу – түпнұсқа жоба – Р.С., Е.А.; жазу – рецензиялау және редакциялау – А.К., А.С., Е.А., Т.М.; визуализация – Ж.И., Л.К.; қадағалау – Е.А.; жобаны басқару – Е.А.; әдістеме – Т.М.; бағдарламалық қамтамасыз ету – Е.А.; қаржыландыруды сатып алу – Е.А.

8. Авторлар туралы ақпарат

Айбульдинов, Еламан – бас ғылыми қызметкер, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу

институты; Ғылым және сыртқы байланыстар жөніндегі проректор, К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: elaman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9143-4581>

Машан, Тоғжан – профессор, х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: mashan_tt@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7598-1956>

Кусепова, Лязат – доцент, х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: kusseпова_la@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6457-0999>

Сафаров, Руслан – зерттеуші-оқытушы, х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: safarov_rz@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2158-6330>

Сабитов, Аят – докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: sabitov_as_1@enu.kz, <https://orcid.org/0009-0005-9475-2143>

Көлпек, Айнагүл – доцент, х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: kolpek_a@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6188-6229>

Искакова, Жанар – директор, х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: iskakova_zhb@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4434-0707>

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (бағдарламалық-мақсатты қаржыландыру гранты № BR21882171).

10. Алғыстар: ConsultTech ЖШС директоры Роман Ладуренкоға зерттеудегі технологиялық есептеулердің кәсіби консалтингтік көмегі үшін біз шын жүректен алғысымызды білдіргіміз келеді. Бұл жобаны жүзеге асыруда олардың тәжірибесі мен адалдығы маңызды рөл атқарды.

11. Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді. Демеушілер зерттеуді әзірлеуде, деректерді жинауда, талдауда немесе түсіндіруде; қолжазбаны жазуда немесе нәтижелерді жариялау туралы шешім қабылдауда ешқандай рөл атқарған жоқ.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Abbas, R.I., Flayeh, H.M. (2024). Aerobic Composting of Organic Waste, Alternative and an Efficient Solid Waste Management Solution. *Asian J. Water Environ. Pollut.* 21, 101–111. <https://doi.org/10.3233/AJW240051>
2. Abis, M., Bruno, M., Kuchta, K., Simon, F.-G., Grönholm, R., Hoppe, M., Fiore, S. (2020). Assessment of the Synergy between Recycling and Thermal Treatments in Municipal Solid Waste Management in Europe. *Energies* 13, 6412. <https://doi.org/10.3390/en13236412>
3. Bhatt, A.K., Bhatia, R.K., Thakur, S., Rana, N. (2018). Fuel from Waste: A Review on Scientific Solution for Waste Management and Environment Conservation. *Prospects*

- of *Alternative Transportation Fuels* 205–233. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7518-6_10
4. Bhatt, K.P., Patel, S., Upadhyay, D.S., Patel, R.N. (2022). A critical review on solid waste treatment using plasma pyrolysis technology. *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* 177, 108989. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108989>
 5. Bułkowska, K., Zielińska, M. (2024). Recovery of Biogas and Other Valuable Bioproducts from Livestock Blood Waste: A Review. *Energies* 17, 5873. <https://doi.org/10.3390/en17235873>
 6. Cao, X., Williams, P.N., Zhan, Y., Coughlin, S.A., McGrath, J.W., Chin, J.P., Xu, Y. (2023). Municipal solid waste compost: Global trends and biogeochemical cycling. *Soil Environ. Health* 1, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100038>
 7. Chatterjee, R., Sajjadi, B., Chen, W.-Y., Mattern, D.L., Hammer, N., Raman, V., Dorris, A. (2020). Effect of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties and Acoustic-Based Amination of Biochar for Efficient CO₂ Adsorption. *Front. Energy Res.* 8, 85. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00085>
 8. Chen, B., Perumal, P., Illikainen, M., Ye, G. (2023). A review on the utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a mineral resource for construction materials. *J. Build. Eng.* 71, 106386. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106386>
 9. Chen, H., Song, X., Jian, Y. (2024). Performance Assessment of a Municipal Solid Waste Gasification and Power Generation System Integrated with Absorption Heat Pump Drying. *Energies* 17, 6034. <https://doi.org/10.3390/en17236034>
 10. Chen, T., Ku, X., Li, T., Karlsson, B.S.A., Sjöblom, J., Ström, H. (2021). High-temperature pyrolysis modeling of a thermally thick biomass particle based on an MD-derived tar cracking model. *Chem. Eng. J.* 417, 127923. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127923>
 11. Chalkidis, A., Jampaiah, D., Aryana, A., Wood, C.D., Hartley, P.G., Sabri, Y.M., Bhargava, S.K. (2020). Mercury-bearing wastes: Sources, policies and treatment technologies for mercury recovery and safe disposal. *J. Environ. Manag.* 270, 110945. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110945>
 12. Dharnaik, A.S., Pramodini, P. (2024). A Review on Composting of Organic Solid Waste. In *Proceedings of the 1st International Conference on Creative and Innovative Solutions in Civil Engineering, CISCE. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1326, 012130. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012130>
 13. Dronia, W., Połomka, J., Jełdrczak, A. (2024). Quantity and Material Composition of Foreign Bodies in Bio-Waste Collected in Towns from Single- and Multi-Family Housing and in Rural Areas. *Energies* 17, 4350. <https://doi.org/10.3390/en17174350>
 14. Du, Y., Ju, T., Meng, Y., Lan, T., Han, S., Jiang, I. (2021). A review on municipal solid waste pyrolysis of different composition for gas production. *Fuel Process. Technol.* 224, 107026. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107026>
 15. Glazyrin, S.A., Aibuldinov, Y.K., Kopishev, E.E., Zhumagulov, M.G., Bimurzina, Z.A. (2024). Analysis of the Composition and Properties of Municipal Solid Waste from Various Cities in Kazakhstan. *Energies* 17(24), 6426. <https://doi.org/10.3390/en17246426>
 16. Glazyrin, S.A., Aidymbaeva, Z.A., Dostiyarov, A.M., Zhumagulov, M.G., Zlatov, N., Strefanovic', V.P. (2020, April 23). Method for Cleaning Flue Gases of a Drum-Type Power Boiler. Patent of Republic of Kazakhstan. No. 5184 (Sposob ochistki dymovykh gazov barabannogo parovogo kotla In Russian).
 17. Gonçalves, M.F.S., Petraconi Filho, G., Couto, A.A., da Silva Sobrinho, A.S., Miranda, F.S., Massi, M. (2022). Evaluation of thermal plasma process for treatment disposal of solid radioactive waste. *J. Environ. Manag.* 311, 114895. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.1148>

18. Karunasena, G., Gajanayake, A., Wijeratne, W.M., Pabasara, U., Milne, N., Udawatta, N., Perera, S., Crimston, A., Aliviano, P. (2023). Liquid waste management in the construction sector: A systematic literature review. *Int. J. Constr. Manag.* 24, 86–96. <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2211416>
19. Karungamye, P. (2024). Energy recovery from solid waste valorisation: Environmental and economic potential for developing countries. *Sci. Afr.* 26, e02402. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02402>
20. Kasiński, S., Debowski, M. (2024). Municipal Solid Waste as a Renewable Energy Source: Advances in Thermochemical Conversion Technologies and Environmental Impacts. *Energies* 17, 4704. <https://doi.org/10.3390/en17184704>
21. Kuo, W.-C., Lasek, J., Słowik, K., Głód, K., Jagustyn, B., Li, Y.-H., Cygan, A. (2019). Low-temperature pre-treatment of municipal solid waste for efficient application in combustion systems. *Energy Convers. Manag.* 196, 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.007>
22. Li, J., An, D., Shi, Y., Bai, R., Du, S. (2024). A Review of the Physical and Chemical Characteristics and Energy-Recovery Potential of Municipal Solid Waste in China. *Energies* 17, 491. <https://doi.org/10.3390/en17020491>
23. Long, Y., Hu, Y., Wang, H., Jia, J., Huang, H., Shen, D., Gu, F. (2024). Effective disposal of hazardous waste from non-ferrous waste recycling through thermal treatment. *J. Clean. Prod.* 434, 140004. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140004>
24. Nasrullah, M., Vainikka, P., Hannula, J., Hurme, M., Karki, J. (2015). Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 3: Solid recovered fuel produced from municipal solid waste. *Waste Manag. Res.* 33, 146–156. <https://doi.org/10.1177/0734242X14563375>
25. Nobre, C., Sen, A., Durão, L., Miranda, I., Pereira, H., Gonçalves, M. (2023). Low-temperature pyrolysis products of waste cork and lignocellulosic biomass: Product characterization. *Biomass Convers. Biorefinery* 13, 2267–2277. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01300-8>
26. Nukusheva, A., Rustembekova, D., Abdizhami, A., Au, T., Kozhantayeva, Z. (2023). Regulatory Obstacles in Municipal Solid Waste Management in Kazakhstan in Comparison with the EU. *Sustainability* 15, 1034. <https://doi.org/10.3390/su15021034>
27. Park, D.K., Kim, J.-H., Kim, H.-S., Kim, J.-H., Ryu, J.-H. (2023). Possibility Study in CO₂ Free Hydrogen Production Using Dodecane (C₁₂H₂₆) from Plasma Reaction. *Energies* 16, 1589. <https://doi.org/10.3390/en16041589>
28. Patil, Y.R., Dakwale, V.A., Ralegaonkar, R.V. (2024). Recycling Construction and Demolition Waste in the Sector of Construction. *Adv. Civ. Eng.* 6234010. <https://doi.org/10.1155/2024/6234010>
29. Pech-Rodríguez, W.J., Meléndez-González, P.C., Hernández-López, J.M., Suarez-Velázquez, G.G., Sarabia-Castillo, C.R., Calles-Arriaga, C.A. (2024). Pharmaceutical Wastewater and Sludge Valorization: A Review on Innovative Strategies for Energy Recovery and Waste Treatment. *Energies* 17, 5043. <https://doi.org/10.3390/en17205043>
30. Provisional Statement on the State of the Global Climate in 2018; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, Switzerland, 2018, 47 p.
31. Puri, L., Hu, T., Naterer, G. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Front. Fuels* 2, 1378361. <https://doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361>
32. Qi, Y.-P., He, P.-J., Lan, D.-Y., Xian, H.-Y., Lü, F., Zhang, H. (2022). Rapid determination of moisture content of multi-source solid waste using ATR-FTIR and multiple machine learning methods. *Waste Manag.* 153, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.014>

33. Ratomski, P., Hawrot-Paw, M., Koniuszy, A., Golimowski, W., Kwas'nica, A., Marcinkowski, D. (2023). Indicators of Engine Performance Powered by a Biofuel Blend Produced from Microalgal Biomass: A Step towards the Decarbonization of Transport. *Energies* 16, 5376. <https://doi.org/10.3390/en16145376>
34. Rodrigues, J.A.P., Pinto, N.A.B.T., Leite, L.A., dos, S.B., Pereira, A.O. (2024). Production of Bio-Oil via Pyrolysis of Banana Peel and Tire Waste for Energy Utilization. *Energies* 17, 6149. <https://doi.org/10.3390/en17236149>
35. Serikova, A., Baidakov, A., Syrlybayeva, N. (2020). The organization of municipal solid waste collection, disposal and recycling in Kazakhstan. *E3S Web Conf.* 159, 01010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015901010>
36. Sikder, S., Toha, M., Rahman, M.M. (2024). Municipal Solid Waste Incineration: An Incredible Method for Reducing Pressures on Landfills. *Technical Landfills and Waste Management* 7, 169–188. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55665-4_7
37. Soares, C. (2015). Chapter 7-Gas Turbine Fuel Systems and Fuels. In *Gas Turbines*, 2nd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 317–411. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410461-7.00007-9>
38. Sobieraj, K., Stegenta-Dąbrowska, S., Koziel, J.A., Białowiec, A. (2021). Modeling of CO Accumulation in the Headspace of the Bioreactor during Organic Waste Composting. *Energies* 14, 1367. <https://doi.org/10.3390/en14051367>
39. The Law of the Republic of Kazakhstan. The Environmental Code of the Republic of Kazakhstan Dated 2 January 2021 No. 400-VI LRK. (Including the Changes from 2 October 2023); Akorda: Astana, Kazakhstan, 2023, 446 p. Available online: <https://www.gov.kz/memleket/entities/cerc/documents/details/113729?lang=kk>
40. Torrubia, J., Torres, C., Valero, A., Valero, A., Parvez, A.M., Sajjad, M., Paz, F.G. (2024). Applying Circular Thermoeconomics for Sustainable Metal Recovery in PCB Recycling. *Energies* 17, 4973. <https://doi.org/10.3390/en17194973>
41. Traven, L. (2023). Sustainable energy generation from municipal solid waste: A brief overview of existing technologies. *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 8, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100491>
42. Wikira, N., Bazooyar, B., Darabkhani, H.G. (2024). Modelling and Analysis of Low and Medium-Temperature Pyrolysis of Plastics in a Fluidized Bed Reactor for Energy Recovery. *Energies* 17, 6204. <https://doi.org/10.3390/en17236204>
43. Williams, P.T. *Waste Treatment and Disposal*; John Wiley & Sons Ltd.: Chichester, UK, 2005, 388 p.
44. World Meteorological Organization (WMO). *State of the Climate 2024. Update for COP29*; WMO: Geneva, Switzerland, 2024, 12 p. Available online: <https://library.wmo.int/records/item/69075-state-of-the-climate-2024> (accessed on 11 November 2024).
45. Xu, M.-X., Di, J.-Y., Wu, Y.-C., Meng, X.-X., Ji, H., Jiang, H., Li, J.-H., Lu, Q. (2023). Insights into the pyrolysis mechanisms of epoxy resin polymers based on the combination of experiments and ReaxFF-MD simulation. *Chem. Eng. J.* 473, 145404. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145404>
46. Yanamandra, K., Pinisetty, D., Daoud, A., Gupta, N. (2022). Recycling of Li-Ion and Lead Acid Batteries: A Review. *J. Indian Inst. Sci.* 102, 281–295. <https://doi.org/10.1007/s41745-021-00269-7>
47. Young, G.C. *Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes; Economic, Technical, and Renewable Comparisons*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2010, 398 p.
48. Zajac, M., Skrajna, T. (2024). Effect of Composted Organic Waste on Miscanthus sinensis Andersson Energy Value. *Energies* 17, 2532. <https://doi.org/10.3390/en17112532>

Analysis of the composition and properties of solid municipal waste in cities of Kazakhstan

Yelaman Aibuldinov, Togzhan Mashan, Lyazat Kusepova, Ruslan Safarov, Aiyat Sabitov, Ainagul Kolpek, Zhanar Iskakova

Abstract: According to the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan, by the end of 2023, approximately 120 million tons of municipal solid waste (MSW) had been generated across over 3200 landfills in the country. The accumulation of both unsorted and sorted waste poses significant environmental risks, primarily through the generation of methane, a greenhouse gas that is 28 times more dangerous than carbon dioxide in contributing to the planet's greenhouse effect over a century and 84 times more effective over a 20-year timeframe. The objective of this research is to examine the physicochemical composition, as well as the physical and thermal-chemical properties, of municipal solid waste from six cities in Kazakhstan: Astana, Almaty, Shymkent, Aktobe, Karaganda, and Ust-Kamenogorsk. Analysis of the physicochemical composition was conducted for both unsorted and sorted municipal solid waste from all cities, determining the total and analytical moisture content, ash content, and volatile matter, as well as the higher and lower calorific values. The efficiency factor of the manual sorting process in practice was 0.4–0.8. The results obtained enable the evaluation of technologies for the effective management of municipal solid waste and facilitate experimental investigations into semi-industrial pyrolysis, combustion, plasma processing, and composting facilities.

Keywords: waste-free production; waste recycling; household waste; pyrolysis; energy-efficient technologies; synthesis gas; thermal energy; methane; carbon dioxide; greenhouse gases.

Анализ состава и свойств твердых бытовых отходов в городах Казахстана

Еламан Айбулдинов, Тогжан Машан, Ляззат Кусепова, Руслан Сафаров, Аят Сабитов, Айнагуль Колпек, Жанар Искакова

Аннотация: По данным Национального бюро статистики Республики Казахстан, к концу 2023 года в стране на более чем 3200 полигонах будет собрано около 120 миллионов тонн твердых бытовых отходов (ТБО). Ежегодно образуется около 4,5 миллионов тонн, из которых перерабатывается лишь 15 процентов. Накопление несортированных и сортированных отходов представляет значительные экологические риски, в первую очередь из-за образования метана – парникового газа, который по воздействию на парниковый эффект планеты в 28 раз опаснее углекислого газа, а по эффективности за 20 лет – в 84 раза. Целью данного исследования является изучение физико-химического состава, а также физических и термохимических свойств ТБО из шести городов Казахстана: Астаны, Алматы, Шымкента, Актобе, Караганды и Усть-Каменогорска. В данном исследовании использовалась одна выборка отходов, которая включала полное опорожнение десятков контейнеров из разных районов рассматриваемых городов. Таким образом, был сохранен средний состав твердых бытовых отходов по городам. Проведен анализ физико-химического состава несортированных и сортированных твердых бытовых отходов всех городов, определены общая и аналитическая влажность, содержание золы и летучих веществ, а также верхняя и нижняя теплоты сгорания. Оценена эффективность сортировки как первой стадии переработки ТБО. Коэффициент эффективности ручной сортировки на практике составил 0,4–0,8. Полученные результаты позволяют оценить

эффективность технологий обращения с твердыми бытовыми отходами и способствуют экспериментальным исследованиям полупромышленных установок пиролиза, сжигания, плазменной переработки и хранения.

Ключевые слова: безотходное производство; переработка отходов; бытовые отходы; пиролиз; энергоэффективные технологии; синтез-газ; тепловая энергия; метан; углекислый газ; парниковые газы.

Synthesis of N-acylalkylpyrazoles and the influence of their structure on cytotoxicity properties

Nazym Alzhapparova*, Svetlana Panshina, Marat Ibrayev, Assel Zhumina, Aknur Orazbay

Karaganda Buketov University, Karaganda, Kazakhstan;
janim_svetatusik@mail.ru; mkibr@mail.ru; asbiol@list.ru;
ladyasha@bk.ru

*Correspondence: nazym285@mail.ru

Abstract: Pyrazole and its derivatives are π -electron-excess aromatic heterocyclic compounds, the ring structure of which contains two bonded nitrogen atoms. Pyrazoles are attracting increasing attention of scientists due to their extensive and diverse range of biologically active properties.

In this study a series of *N*-(acylalkyl)pyrazole derivatives were synthesized by reactions of aliphatic and aromatic α -bromideketones with pyrazole and its 3,5-dimethyl- and 3,5-diphenyl- derivatives via a two-stage *one-pot* reaction, in the presence of the K_2CO_3 base. Thus, new, previously undescribed *N*-pinacolopyrazoles with yields of 65–92% and *N*-phenacylpyrazoles with yields of 38–91% were obtained.

The structures of the products were characterized by NMR, IR, X-ray diffraction and GC-mass spectrometry. According to the X-ray diffraction results, *N*-(acylalkyl)pyrazoles are conjugated π -systems, in the formation of crystals of which carbonyl groups participate.

The cytotoxicity of the studied *N*-acylalkylpyrazoles towards *Artemia Salina* crustaceans has been determined, and the toxicity depends on the type of substituents. Thus, *N*-phenacylpyrazole has a cytotoxicity 6 times higher than the cytotoxicity of *N*-pinacolopyrazole, and the cytotoxicity of *N*-phenacylpyrazoles varies depending on the substituents in the benzene ring, and decreases in the presence of acceptors. The results of the cytotoxicity study can be used to develop drugs with their further modification.

Citation: Alzhapparova, N., Panshina, S., Ibrayev, M., Zhumina, A., Orazbay, A. (2025). Synthesis of *N*-acylalkylpyrazoles and the influence of their structure on cytotoxicity properties. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, 152(3), 42-56.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-42-56>

Academic Editor:
E.Ye. Kopsishev

Received: 26.08.2025
Revised: 17.09.2025
Accepted: 18.09.2025
Published: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Keywords: pyrazole, *N*-acylalkylation, α -bromoketones, NMR, X-ray structural analysis, cytotoxicity, *Artemia Salina*.

1. Introduction

Pyrazoles are five-membered π -electron-rich aromatic heterocyclic compounds that have two linked nitrogen atoms (N–N bond) in the ring structure (Elguero, J., et al., 1995; Rague Schleyer, P., et al., 1996; Schmidt A., 2011; Stanovnik, B., et al., 2003), in addition, the molecules of pyrazole 1a are planar and strongly associated due to hydrogen bonds (Cour, T. et al., 1973; Sikora, M. et al., 2013) (Figure 1a).

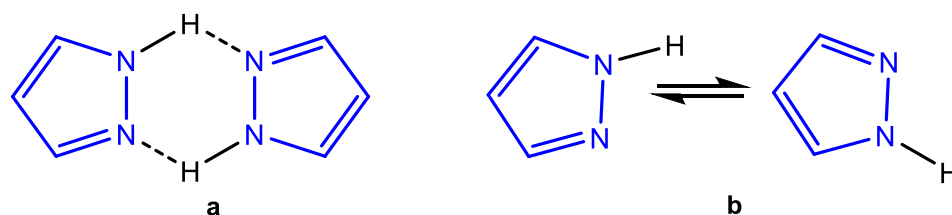


Figure 1. Hydrogen bonds in the molecule of pyrazole **1a** (a) and its prototropic tautomerism (b)

Pyrazole ring derivatives have wide applications in various fields of human activity such as technology, medicine and agriculture (Al-Aizari, F.A. et al., 2018). Pyrazoles are considered an important class of nitrogen-containing heterocyclic compounds due to their wide range of biological activities (Ansari, A. et al., 2017; Schmidt A., 2011). In medical sources, pyrazole derivatives are described as substances with antibacterial (Alan, R. K., 1997; Karrouchi, K. et al., 2018; Secieru, A. et al., 2019), analgesic, antimicrobial, antiviral, antidepressant and anticancer properties (Karrouchi K. et al., 2018). In addition, pyrazole is the main component of many pharmaceutical and agrochemical substances (Unnava, R. et al., 2016). Thus, pyrazole systems as biomolecules are currently attracting more and more attention from scientists due to their interesting pharmacological properties (Calenda S., et al., 2024; Özdemir, Z., et al., 2015; Salerno, L., et al., 2012; Sharma, T., et al., 2020; Sharma, T., et al., 2021).

Pyrazoles are usually synthesized by classical cyclocondensation of hydrazine derivatives with α,β -unsaturated aldehydes and ketones (Karrouchi, K., et al., 2018; Katritzky, A. R. et al., 2001; Lei, J., et al., 2021).

The presence of a mobile hydrogen atom of the NH-group and the main center – a nitrogen atom of the pyridine type, in the pyrazole molecule is the reason for the manifestation of prototropic, or so-called azole tautomerism (Secieru, A., et al., 2019). Prototropic tautomerism of pyrazole and its homologues is due to the migration of a proton from the NH-group (Alan, R.K., 1997) (Figure 1, b).

The acid-base properties of pyrazole are due to the presence of pyrrole and pyridine nitrogen atoms in its structure (Secieru, A., et al., 2019). Due to the pyridine nitrogen atom, pyrazole exhibits basic properties ($pK_b = 11.5$), and due to the pyrrole nitrogen atom, it exhibits weak acidic properties ($pK_a = 2.49$) (Perrin, D. D., 1965). Moreover, the acidic proton of the NH-group is easily subject to N-alkylation and N-acylation and N-alkylacylation reactions (Castillo, J.M., et al., 2019).

Thus, in the scientific literature (Dhiman, Sh., et al., 2018; Marcos, A.P.M., et al., 2010; Solomons, T.W., et al., 1965) one can find a large number of examples and conditions for the synthesis of *N*-alkylated and *N*-alkylacylated pyrazoles 1 at the nitrogen atom of the NH-group (Alan, R.K., 1997), in addition, pyrazoles have the ability to be alkylated again to form salts (Solomons, T.W., et al., 1965). The formation of salts occurs due to interaction with the nitrogen atom of the pyridine type, which exhibits weak basic properties. Pyrazole salts are quite stable compounds and their stability is due to the delocalization of the positive charge in the pyrazolium cation (Figure 2), or the negative charge in the pyrazolide anion between all the atoms of the ring (Solomons, T.W., et al., 1965)

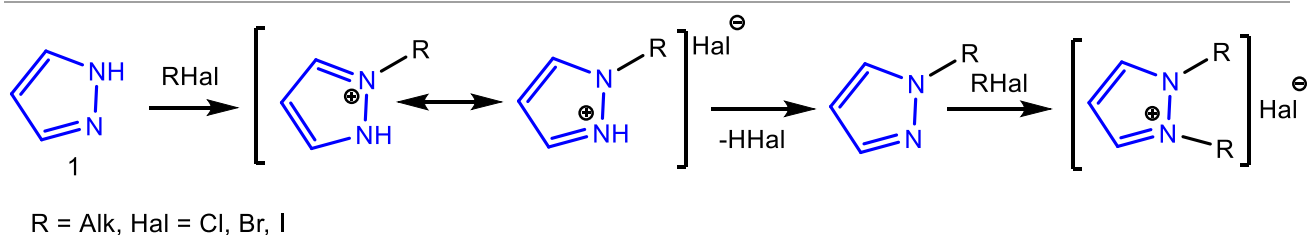


Figure 2. Formation of pyrazole salts by delocalization of the positive charge in the pyrazolium cation

Taking into account the above-described properties of pyrazole **1a**, in this work, we investigated a series of *N*-acylalkylation reactions of pyrazoles **1a-c** with α -bromoketones **2a**, **4a-g** via *one-pot* reaction in the presence of a base to release the intermediate salt and eliminate hydrogen bromide. The resulting series of products were characterized by IR and NMR spectroscopy, GC-mass spectrometry. The structural features of 1-tertbutyl-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **3a** and 1-phenyl-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5a** were studied by X-ray diffraction, and the cytotoxicity properties of *N*-acylalkylpyrazoles **3a**, **5a-c**, **e**, **g** on crustaceans *Artemia Salina* were considered.

2. Materials and methods

The starting materials for the syntheses were reagents purchased from Acros, Merck and Aldrich, which were used without further purification. All reactions and purity were monitored by thin-layer chromatography (TLC) on Silufol plates with detection by iodine vapor. Melting and boiling points were determined in open capillaries using a Buchi M560 device.

^1H NMR and ^{13}C NMR spectra were obtained using Agilent 400-MR (400 MHz for ^1H , 100 MHz for ^{13}C) spectrometer in CDCl_3 (chemical shift: $\delta = 7.26$ for ^1H , $\delta = 77.76$ for ^{13}C) and DMSO-d_6 (chemical shift: $\delta = 2.47$ for ^1H , $\delta = 40.03$ for ^{13}C). Hexamethyldisiloxane was used as an internal standard. Splitting is reported as s = singlet, d = doublet, t = triplet, q = quartet, m = multiplet, br = broad and coupling constants are given in Hz. High-resolution mass spectra were recorded on a GC-Mass analysis was performed on an Agilent 7890A gas chromatograph with an Agilent 5975C mass-selective detector on an Rtx DHA-100 column; carrier gas was helium. The samples were dissolved in 1 ml of acetone. Analysis time was 32 minutes. X-ray analysis was done on a single-crystal diffractometer STADIVARI Pilatus 100K with λ Cu-K α radiation using focusing mirrors. The IR spectra were obtained using a FSM 1201 FT-IR spectrophotometer in a KBr pellet, in the frequency range: 400 – 4000 cm^{-1} .

Methodology for studying cytotoxic properties

Artificial sea water, 1 liter in volume, was prepared from the following substances, according to the method (Kester, D.R. et al., 1967): NaCl (0.409 mol), Na_2SO_4 (0.028 mol), KCl (0.009 mol), NaHCO_3 (0.009), KBr (0.0008 mol), H_3BO_3 (0.0004 mol), NaF (0.00007 mol).

The cytotoxic activity of the extract was determined according to the method (Solis, P.N. et al., 1992; Suleimenov, E.M., 2009). For the analysis, 200 mg of *Artemia salina* eggs in 1 liter of artificial seawater were used. *Artemia Salina* cysts were kept under aeration conditions with constant illumination and a temperature of 25°C for 2–3 days until hatching. Then one side of the vessel was covered with aluminum foil, and 5 minutes later, the larvae that had gathered on the bright side were removed with a Pasteur pipette. Each sample was tested in three parallel experiments. 20–40 larvae (nauplii) were placed in 0.990 ml of seawater in a 2 ml cell of a laboratory plate. A 10 mg/ml stock solution of the studied substance **3a**, **5a-c**, **e**, **g** was prepared in dimethyl sulfoxide, and 0.10 ml of this solution was added to the cell. For the negative control, only 0.10 ml of dimethyl sulfoxide was added. The relative deviation of the percentage of dead *Artemia* from the control values was calculated. Solutions with 10 $\mu\text{g/ml}$ of the studied substances **3a**, **5a-c**, **e**, **g** were added and the number of dead larvae was counted. The results were read by counting under a dissecting microscope.

The cytotoxic activity was determined using the method (Meyer, B.N. et al., 1982). The number of dead individuals was calculated after 1, 4 and 24 hours, with the determination of the concentration of the studied toxicant **3a**, **5a-c**, **e**, **g**, which causes the death of 50% of crustaceans in 24 hours. The percentage of mortality (P) was calculated using the following formula:

$$P = \frac{(A - N - B)}{Z} * 100\%$$

where A is the number of dead larvae after 24 h; N is the number of dead larvae before the experiment; B is the average number of dead larvae in the control sample; Z is the total number of larvae. The results are shown in Table 1.

Based on the number of dead larvae, the cytotoxic activity of the studied compounds on *Artemia salina* larvae was determined, where the LC₅₀ (µg/ml) (lethal concentration) at which 50% of the larvae die was determined.

Preparation of 1-(pinacolone)pyrazoles **3a-c**

Synthesis of 1-tertbutyl-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **3a**

2 g (0.0294 mol) of pyrazole **1a** and 15 ml of acetone were placed in a 100 ml round-bottomed flask. Then, 4 g (0.0294 mol) of anhydrous potassium carbonate was added to the mixture. Then, 3.95 ml (5.3 g, 0.0294 mol) of 1-bromopinacolone **2a** was added to the mixture while stirring. The reaction mass was stirred for 24 hours at room temperature. Then the reaction mixture was filtered of inorganic salts. The solvent was evaporated on a rotary evaporator. The precipitated yellowish crystals **3a** were dried in air. The yield of product **3a** is 4 g (84%). M.p. 56°C. ¹H NMR (CDCl₃) δ (ppm) 8.54 (d, J = 3.0, 1H, Pyr), 8.08 (d, J = 6.8, 1H, Pyr), 6.71 (t, J = 3.0, 1H, Pyr), 4.67 (s, 2H, CH₂), 1.28 (s, 9H, C(CH₃)₃). ¹³C NMR (CDCl₃) δ (ppm) 205.92 (C=O), 139.34 (CH, Pyr), 129.81 (CH, Pyr), 107.48 (CH, Pyr), 56.53 (CH₂), 43.89 (C(CH₃)₃), 26.34 (C(CH₃)₃). GC-MS Retention time 11.759 min, m/z (EI) = 166, 151, 138, 109, 85, 81, 57, 41, 29, 28. IR ν, cm⁻¹ (KBr, neat): 2959 (CH₃), 1716 (C=O), 1597 (C=N).

The synthesis of 1-tertbutyl-2-(3,5-dimethyl-1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **3b** and 1-tertbutyl-2-(3,5-diphenyl-1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **3c** was carried out in strict accordance with the method for the preparation of **3a** using the appropriate reagents.

Yield of product **3b** is 3.7 g (65%), light yellow crystals. M.p. 82°C. ¹H NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 5.82 (s, 1H, Pyr), 5.15 (s, 2H, CH₂), 2.05 (s, 3H, CH₃), 2.00 (s, 3H, CH₃), 1.14 (s, 9H, C(CH₃)₃). ¹³C NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 209.55 (C=O), 146.27 (C, Pyr), 140.67 (C, Pyr), 105.42 (CH, Pyr), 53.97 (CH₂), 43.26 (C(CH₃)₃), 26.27 (C(CH₃)₃), 13.60 (CH₃), 10.88 (CH₃). GC-MS Retention time 15.409 min, m/z (EI) = 194, 180, 166, 137, 109, 85, 57, 41, 29, 28. IR ν, cm⁻¹ (KBr, neat): 2959 (CH₃), 1620 (C=O), 1593 (C=N).

Yield of product **3c** is 8.6 g (92%), light beige crystals. M.p. 110°C. ¹H NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 7.81 (d, J = 7.1, 2H, Ph), 7.46 – 7.42 (m, 2H, Ph), 7.42 – 7.35 (m, 5H, Ph), 7.29 (t, J = 7.3, 1H, Ph), 6.87 (s, 1H, Pyr), 5.34 (s, 2H, CH₂), 1.02 (s, 9H, C(CH₃)₃). ¹³C NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 209.52 (C=O), 150.16 (C, Pyr), 145.95 (C, Pyr), 133.62, 130.58, 129.30, 129.28, 129.22, 128.88, 128.15, 125.62 (Ph), 104.03 (CH, Pyr), 55.54 (CH₂), 43.39 (C(CH₃)₃), 26.16 (C(CH₃)₃). GC-MS Retention time 28.480 min, m/z (EI) = 220, 191 165, 117, 77, 51, 39. IR ν, cm⁻¹ (KBr, neat): 3015 (CH), 2959 (CH₃), 1720 (C=O), 1620 (C=N).

Preparation of 1-(phenacyl)pyrazoles **5a-g**

Synthesis of 1-phenyl-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5a**.

3.4 g (0.05 mol) of pyrazole **1a** and 15 ml of acetone were placed in a 250 ml round-bottomed flask. Then, 6.9 g (0.05 mol) of anhydrous potassium carbonate was added to the mixture. Then, 10 g, (0.05 mol) of phenacylbromide **4a** was added to the mixture while stirring. The reaction mass was stirred for 24 hours at room temperature. Then the reaction mixture was filtered of inorganic salts. The solvent was evaporated on a rotary evaporator. The precipitated yellowish crystals **5a** were dried in air. The yield of product **5a** is 8.4 g (91%). M.p. 95°C. ¹H NMR (CDCl₃) δ (ppm)

7.95 – 7.89 (m, 2H, Ph), 7.59 – 7.52 (m, 2H, Ph), 7.48 – 7.42 (m, 4H, Ph, Pyr), 6.31 (t, J = 4.4, 1H, Pyr), 5.54 (s, 2H, CH₂). ¹³C NMR (CDCl₃) δ (ppm) 192.62 (C=O), 139.98 (CH, Pyr), 134.66 (C, Ph), 134.12 (CH, Pyr), 131.03 (C, Ph), 129.03 (CH, Ph), 128.19 (CH, Ph), 106.59 (CH, Pyr), 57.75 (CH₂). GC-MS Retention time 17.590 min, m/z (EI) = 186, 158, 105, 77, 51, 41, 28. IR ν, cm⁻¹ (KBr, neat): 3013 (CH), 2986 (CH₂), 1685 (C=O), 1601 (C=N)

The synthesis of 1-(4-bromophenyl)-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5b**, 1-(2-methoxyphenyl)-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5c** and 1-(4-trifluoromethoxyphenyl)-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5d** was carried out in strict accordance with the method for the preparation of **5a** using the appropriate reagents.

Yield of product **5b** is 11.9 g (90%), light beige crystals. M.p. 156°C. ¹H NMR (CDCl₃) δ (ppm) 7.84 (d, J = 8.6, 2H, Ph), 7.65 (d, J = 8.6, 2H, Ph), 7.59 (d, J = 1.9, 1H, Pyr), 7.50 (d, J = 2.3, 1H, Pyr), 6.37 (t, J = 2.2, 1H, Pyr), 5.56 (s, 2H, CH₂). ¹³C NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 193.45 (C=O), 139.40 (CH, Pyr), 134.08 (C, Ph), 132.41 (2CH, Ph), 131.95 (CH, Pyr), 130.47 (2CH, Ph), 128.43 (C, Ph), 106.01 (CH, Pyr), 58.01 (CH₂). GC-MS Retention time 21.176 min, m/z (EI) = 264, 236, 183, 155, 104, 76, 50, 41, 28. IR ν, cm⁻¹ (KBr, neat): 3117 (CH), 2996 (CH₂), 1709 (C=O), 1589 (C=N), 991, 551 (C-Br)

Yield of product **5c** is 4.1 g (38%), light beige crystals. M.p. 70°C. ¹H NMR (CDCl₃) δ (ppm) 7.84 (dd, J = 7.8, 1.9, 1H, Ph), 7.52 (d, J = 1.9, 1H, Pyr), 7.49 (ddd, J = 8.6, 7.4, 1.9, 1H, Ph), 7.44 (d, J = 2.3, 1H, Pyr), 6.99 (td, J = 8.3, 3.3, 2H, Ph), 6.30 (t, J = 2.2, 1H, Pyr), 5.53 (s, 2H, CH₂), 3.93 (s, 3H, OCH₃). ¹³C NMR (CDCl₃) δ (ppm) 193.82 (C=O), 159.48 (C, Ph), 139.65 (CH, Pyr), 135.07 (CH, Ph), 131.28 (CH, Ph), 131.07 (CH, Pyr), 125.00 (C, Ph), 121.21 (C, Ph), 111.71 (CH, Ph), 106.15 (CH, Pyr), 62.11 (OCH₃), 55.71 (CH₂). GC-MS Retention time 20.714 min, m/z (EI) = 216, 188, 157, 135, 105, 92, 77, 64, 51, 41, 28. IR ν, cm⁻¹ (KBr, neat): 3016 (CH), 2996 (CH₂), 1689 (C=O), 1597 (C=N), 1288, 1022 (C-O-C).

Yield of product **5d** is 9.9 g (73%), light beige crystals. M.p. 138°C. ¹H NMR (CDCl₃) δ (ppm) 7.93 (d, J = 8.8, 2H, Ph), 7.49 (d, J = 1.9, 1H, Pyr), 7.41 (d, J = 2.3, 1H, Pyr), 7.22 (d, J = 8.4, 2H, Ph), 6.27 (t, J = 2.1, 1H, Pyr), 5.49 (s, 2H, CH₂). ¹³C NMR (CDCl₃) δ (ppm) 191.22 (C=O), 153.27 (C, Ph), 140.10 (CH, Pyr), 132.76 (C, Ph), 130.86 (CH, Pyr), 130.32 (2CH, Ph), 120.61 (2CH, Ph), 106.70 (CH, Pyr), 57.66 (CH₂). GC-MS Retention time 17.040 min, m/z (EI) = 270, 242, 189, 161, 133, 95, 84, 70, 64, 51, 28. IR ν, cm⁻¹ (KBr, neat): 3096 (CH), 2996 (CH₂), 1709 (C=O), 1612 (C=N), 1300, 1030 (C-O-C), 1200 (C-F).

Synthesis of 1-(4-nitrophenyl)-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5e**

3.4 g (0.05 mol) of pyrazole **1a** and 15 ml of acetone were placed in a 250 ml round-bottomed flask. Then, 6.9 g (0.05 mol) of anhydrous potassium carbonate was added to the mixture. Then, 12.2 g (0.05 mol) of 4-nitrophenacylbromide **4e** was added to the mixture while stirring. The reaction mass was stirred for 24 hours at room temperature. Then the precipitate was filtered, washed with acetone, and then washed with water to remove impurities of inorganic salts, and dried in air. A light beige powder of **5e** was obtained. The yield of product **5e** is 10.4 g (90%). M.p. 202°C. ¹H NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 8.37 (d, J = 8.5, 2H, Ph), 8.23 (d, J = 8.5, 2H, Ph), 7.74 (d, J = 2.3, 1H, Pyr), 7.48 (d, J = 1.8, 1H, Pyr), 6.32 (t, J = 2.2, 1H, Pyr), 5.90 (s, 2H, CH₂). ¹³C NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 195.77 (C=O), 150.71 (C, Ph), 140.22 (C, Ph), 139.45 (CH, Pyr), 129.65 (CH, Pyr), 128.65 (2CH, Ph), 124.35 (2CH, Ph), 106.17 (CH, Pyr), 58.46 (CH₂). IR ν, cm⁻¹ (KBr, neat): 3097 (CH), 2995 (CH₂), 1709 (C=O), 1611 (C=N), 1523, 1350 (NO₂).

The synthesis of 1-(4-hydroxyphenyl)-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5f** and 1-(4-(methylsulfonyl)phenyl)-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5g** was carried out exactly according to the method for the preparation of **5e** using the appropriate reagents.

Yield of product **5f** is 8.5 g (84%), light beige powder. M.p. 255°C. ¹H NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 10.01 (s, 1H, OH), 8.08 (s, 1H, Pyr), 8.06 (s, 2H, Ph), 7.60 (s, 2H, Ph), 7.25 (s, 1H, Pyr), 6.34 (s, 1H, Pyr), 4.66 (s, 2H, CH₂). ¹³C NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 192.30 (C=O), 163.13 (C, Ph), 138.24 (CH, Pyr), 130.57 (2CH, Ph), 128.55 (CH, Pyr), 127.82 (C, Ph), 115.19 (2CH, Ph), 100.72

(CH, Pyr), 70.49 (CH₂). IR ν , cm⁻¹ (KBr, neat): 3500 (OH), 2995 (CH₂), 1701 (C=O), 1593 (C=N), 1230 (C-O).

Yield of product **5g** is 10.3 g (78%), light beige powder. M.p. 178°C. ¹H NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 8.24 (d, J = 8.5, 2H, Ph), 8.11 (d, J = 8.5, 2H, Ph), 7.74 (d, J = 2.4, 1H, Pyr), 7.49 (d, J = 2.0, 1H, Pyr), 6.33 (t, J = 2.3, 1H, Pyr), 5.90 (s, 2H, CH₂). ¹³C NMR (DMSO-d₆) δ (ppm) 193.82 (C=O), 145.29 (C, Ph), 139.50 (CH, Pyr), 138.79 (C, Ph), 131.96 (CH, Pyr), 129.42 (2CH, Ph), 127.87 (2CH, Ph), 106.11 (CH, Pyr), 58.37 (CH₂), 43.59 (CH₃). GC-MS Retention time 25.751 min, m/z (EI) = 249, 247, 223, 183, 155, 121, 103, 76, 70, 50, 28, 15.

3. Results

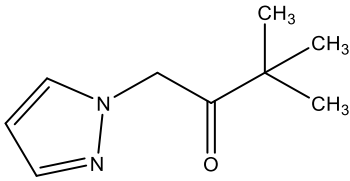
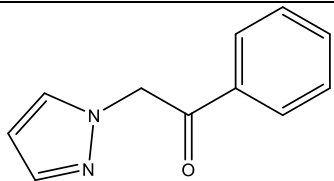
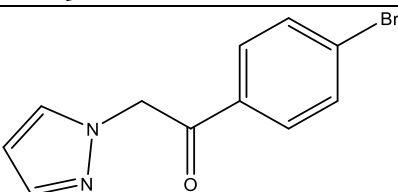
The results of this study are presented in a series of reactions to create new N-acylalkylated pyrazoles **3a-c**, **5c**, **f**, **g**. Thus, the interaction of pyrazoles **1a-c** with α -bromoketones **2a**, **4a-g** was carried out via a one-pot reaction in the presence of a base to neutralize the released hydrogen bromide. Probable reaction mechanism of the N-acylalkylation reaction with α -bromoketones **2a**, **4a-g** are considered.

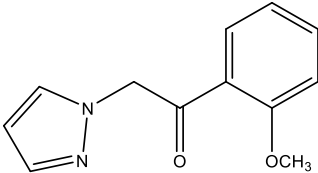
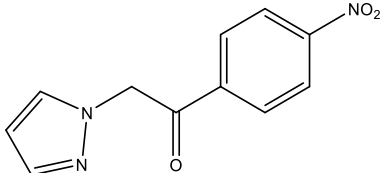
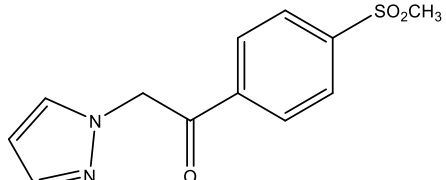
The structures of the obtained products are characterized by NMR, IR, and GC-mass spectrometry. The crystal structures of tert-butyl-1-(pyrazol-1-yl)butan-2-one **3a** and 1-phenyl-2-(pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5a** were described by X-ray diffraction, according to which, N-(acylalkyl)pyrazoles **3a** and **5a** are conjugated π -systems, and carbonyl groups participate in the formation of their crystals.

The studied compounds **3a**, **5a-c**, **e**, **g** showed some manifestation of cytotoxicity towards the crustacean *Artemia Salina* (Table 1).

The results of the cytotoxicity study show the possibility of varying the cytotoxic properties of the substance by introducing a certain functional group. Thus, N-phenacylpyrazole **5a** showed the highest toxicity, and in the presence of an acceptor group in the benzene ring of the N-phenacyl substituent (**5e**), the toxicity of the studied compounds decreases.

Table 1. Results of cytotoxicity test of **3a**, **5a-c**, **e**, **g** on *Artemia Salina*

№	Formula	Concentration (mg/ml)	Mortality (after 24 hours), %	LC ₅₀ μ g/ml
3a		100	1.87	644.00
		500	2.41	
		1000	96	
5a		100	18.75	108.89
		500	92.59	
		1000	99	
5b		100	76.64	153.00
		500	82.86	
		1000	91.84	

5c		100	4.04	264.00
		500	94.32	
		1000	96.04	
5e		100	7.07	3045.00
		500	12.5	
		1000	13.00	
5g		100	7.23	723.00
		500	49.00	
		1000	50.00	

4. Discussion

Thus, *N*-acylalkylpyrazoles can be synthesized by two methods (Babaev et al., 2025), where the first involves *N*-acylalkylation of pyrazoles **1a-c** with α -bromoketones **2a**, **4a-g** with the isolation of an intermediate salt, from which the *N*-acylalkylation products are released by treatment with a base; the second approach involves *one-pot* reaction in the presence of a base, bypassing the stage of obtaining salts. Taking into account the convenience of the latter method, we obtained a series of substances **3a-c**, **5a-g** with the simultaneous use of a base – K_2CO_3 .

In the scientific literature, one can find a large number of examples and conditions for carrying out *N*-alkylation reactions with α -haloketones in the presence of alkaline reagents (Dago et al., 2018; Solomons et al., 1965). The base K_2CO_3 was chosen as the base due to previous experience with its use (Babaev et al., 2025) and its easy availability; in addition, stronger bases may lead to unwanted side effects (Balasubrahmanya, K.S. et al., 2023).

To obtain a series of products **3a-c**, **5a-g**, unsubstituted pyrazole **1a** and two of its derivatives **1b**, **c**, two types of α -haloketones, were used: aliphatic brompinacolone **2a** (Figure 3) and a series of aromatic phenacyl bromides **4a-g** (Figure 4).

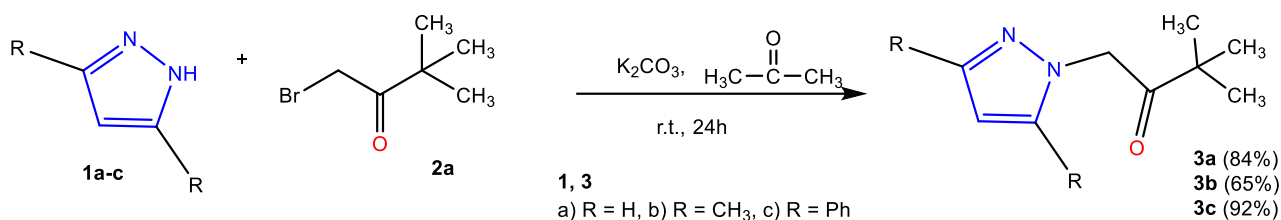


Figure 3. Scheme for the synthesis of pinacolopyrazoles **3a-c**

Thus, under the conditions we have chosen, the reaction (Figure 3) occurs in the presence of a base – potassium carbonate, which, in parallel with the *N*-alkylation reaction one-pot, neutralizes the released hydrobromide with the formation of inorganic salts, as well as target products **3a-c**. Substance **3a** was obtained with a yield of 84% and is a low-melting light-yellow crystal. In reactions with substituted pyrazoles **1b**, **c**, *N*-acylalkylation products **3b** and **3c** were obtained in yields of 65% and 92%, respectively. The higher yield of **3c** is probably due to the lipophobicity of the phenyl substituents. With long-term standing of mother solutions **3b**, an additional 10–20% of the product can be extracted. Compounds **3a-c** were characterized by IR, NMR spectroscopy and

GC-MS. The structure of tert-butyl-1-(pyrazol-1-yl)butan-2-one 3a was described using X-ray diffraction analysis (Figure 7).

Corresponding approaches have been implemented in other examples of N-acylalkylation of pyrazole 1a with phenyl-substituted α -haloketones 4a-g (Figure 4).

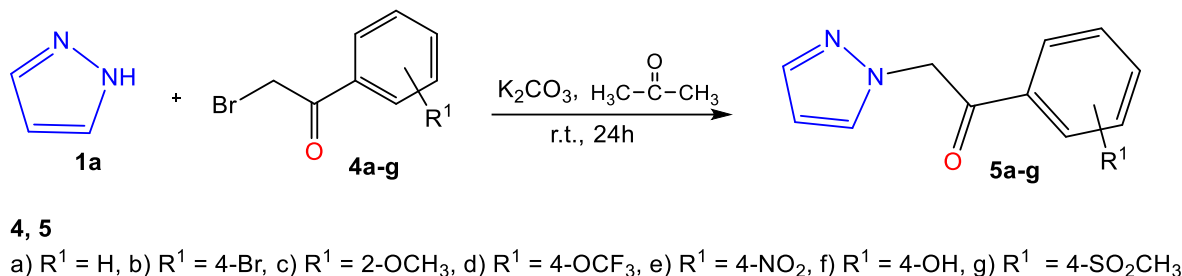


Figure 4. Scheme for the synthesis of phenacylpyrazoles **5a-g**

Referring to the author's reasoning (Baker, J., 1941), it can be assumed that the interaction of α -haloketones **2a**, **4a-g** with pyrazoles **1a-c** involves the carbonyl group taking an active part in the process in the reactions of substitution of the bromine atom by the pyrazole anion. In particular, when bromine is exchanged for a pyrazole group, the primary interaction of the reagent with the carbon atom of the carbonyl group occurs. In the formed anion, an electron shift occurs, shown by the arrows (pinacol electron shift), which ends with the release of a bromine ion and the shift of a proton to the adjacent NH-group (Figure 5).

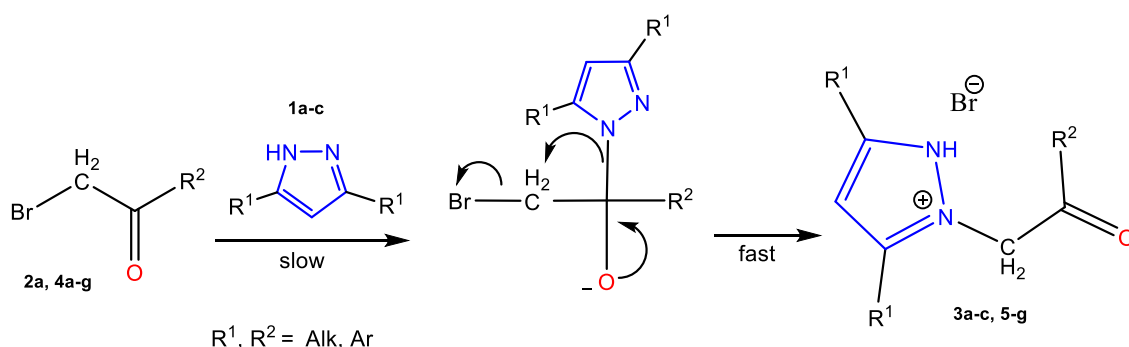


Figure 5. Probable routes of N-acylalkylation of pyrazoles

N-acylalkylation reactions (Figure 3, 4) are accompanied by the formation of resin-forming by-products **6**, as well as by-product self-condensation reactions (Balasubrahmanya, K.S. et al., 2023) of α -bromoketones **2a**, **4a-g** (Figure 6), especially when the temperature of the reaction mixture increases, in this regard, it is not recommended to heat reaction mixtures, even partially, during the process of lyophilization of the solvent.

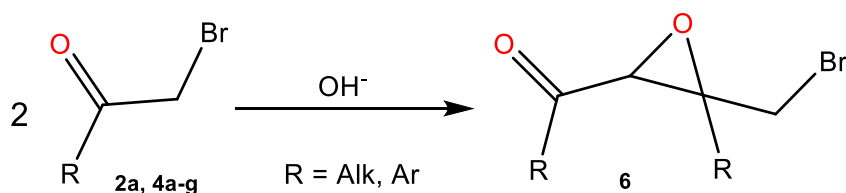


Figure 6. Scheme of side reactions of self-condensation of α -bromoketones **2a**, **4a-g**

The use of the *one-pot* approach reduces the reaction time and the number of manipulations, which gives on average yields of compounds **5a–g** varying in the range of 38–91%. *N*-phenacyl-substituted pyrazoles. Pyrazole **5c** with a methoxy group in position 2 of the phenyl ring was isolated with the lowest yield (38%). Other substances were obtained in yields of (61–91%). Products **5a–g** were characterized by IR, NMR spectroscopy and GC-MS. The structure of 1-phenyl-2-(pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5a** was described using X-ray structural analysis (Figure 7).

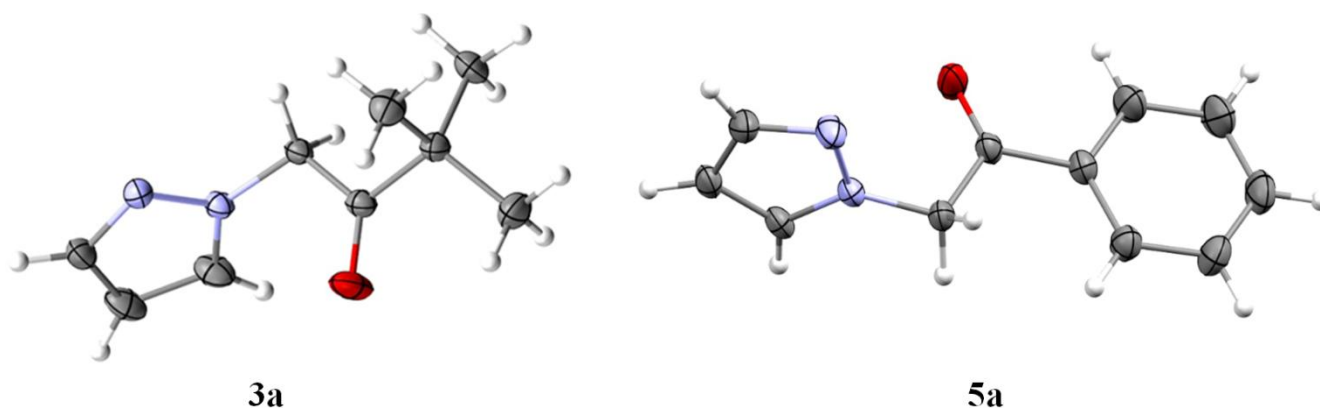


Figure 7. Crystal structures of 1-tertbutyl-2-(1H-pyrazol-1-yl)ethan-1-one **3a** and 1-phenyl-2-(pyrazol-1-yl)ethan-1-one **5a** according to X-ray diffraction data

During X-ray diffraction analysis it was determined that the crystal **3a**, formed by ordered molecules **3a**, has an orthorhombic crystal lattice with symmetry type C_2 , with 2 vertical planes of symmetry located along the axis (space group $Pna2_1$). And crystal **5a** has a triclinic crystal lattice with symmetry type C_1 (space group $P1(2)$) and molecules **5a** fit more tightly to each other due to additional π -stacking interactions of phenyl rings.

Thus, crystals of substances **3a** and **5a** are formed from a pair of molecules connected to each other by two hydrogen bonds, in the formation of which carbonyl groups participate. The formation of the crystal structure **3a** involves the $C=O$ group of the tert-butyl fragment of one molecule and the hydrogen $H-C$ of the tert-butyl fragment of the second molecule. The mechanism of hydrogen bond formation in **5a** is similar, but the donor of hydrogen interaction is the $H-C$ hydrogen of the adjacent phenyl fragment. The pyrazole fragment in both molecules is planar and lies in the same plane as the carbonyl group.

In light of recent advances in anticancer drug development, pyrazole derivatives have been extensively studied due to their pronounced cytotoxic activity. It is important to note that the studies are not limited to cytotoxicity alone; many of these compounds also demonstrate other valuable biological properties. The paper (Zhang, Y., et al., 2023) details how pyrazole derivatives have already been tested for cytotoxicity. The authors highlight that many of these compounds have shown strong inhibitory activity against various cancer cell lines. However, there is no information in the available sources on the study of *N*-acylalkyl derivatives of pyrazole for the manifestation of toxic properties. In order to fill the gap in this information, we determined the cytotoxic properties of the studied compounds **3a**, **5a–c**, **e**, **g** on *Artemia salina* crustaceans. The *Artemia salina* model is a useful initial screening tool and helps to quickly eliminate known toxic compounds (Solis, P.N. et al., 1992). However, it should be considered as a preliminary method. More complex and specific methods are needed for accurate assessment of cytotoxicity.

Standard research methods were used for the experiment. The cytotoxic activity of the extract was determined using the generally accepted method (Suleimenov, E.M., 2009). For the analysis, 200 mg of *Artemia salina* eggs in 1 liter of artificial seawater were used. The water was prepared

using the method specified in (Kester, D.R. et al., 1967). The cytotoxic activity was determined using the method (Meyer, B.N. et al., 1982) of survival of *Artemia salina* crustaceans in 3 parallel experiments with concentrations of 10, 5 and 1 mg/ml, at a temperature of 25°C, with a larval density of 20–40 specimens in each test tube. During the biotesting, *Artemia salina* larvae were 1 day old.

The obtained LC₅₀ values (µg/ml) (Table 1) indicate that all the studied compounds **3a**, **5a-c**, **e**, **g**, have cytotoxicity towards *Artemia salina* crustaceans, since the LC₅₀ value (lethal concentration at which 50% of crustaceans die) is below 1000 µg/ml. However, it was determined that *N*-acylalkylpyrazole **5e** with the presence of a nitro-group in the *para*-position does not have cytotoxicity, since the LC₅₀ value is 3045, which is higher than 1000 µg/ml.

When comparing the cytotoxicity of *N*-pinacolone pyrazole **3a** with *N*-phenacylpyrazole **5a**, it was shown that when the phenacyl substituent is replaced by a pinacolone substituent, the cytotoxicity drops almost 6 times (from LC₅₀ 108.89 µg/ml to 644.00 µg/ml).

So, substances **5a-c** have medium toxicity, substances **3a**, **5g**, exhibit low toxicity, **5e** is not toxic. This can be compared to the toxicity of some fungicides and herbicides, as well as some plant extracts or fungal toxins (Libralato, G., et al., 2016). For example, the LC₅₀ of some toxic fungal metabolites for *Artemia salina* can range from 9.78 to 40.84 µg/ml, which is also high (Favilla, M., et al., 2006). In the series of *N*-phenacylpyrazoles **5a-c**, **e**, **g**, the cytotoxicity decreases in the presence of an acceptor group in the benzene ring of the *N*-phenacyl substituent.

5. Conclusion

Thus, based on known *N*-acylalkylation methods, a series of *N*-acylalkylated pyrazoles **3a-c** and **5a-g** were synthesized, including new, previously undescribed *N*-pinacolone pyrazoles **3a-c** and *N*-phenacylpyrazoles **5c**, **f**, **g**. The course of the reaction is affected by temperature, since with an increase in temperature the reaction shifts toward the formation of by-products.

The structures of the obtained products were characterized by NMR, IR, X-ray diffraction and GC-mass spectrometry.

The studied compounds **3a**, **5a-c**, **e**, **g**, showed a certain manifestation of cytotoxicity in relation to crustaceans *Artemia Salina*. It is shown that in the presence of an acceptor group in the benzene ring of the *N*-phenacyl substituent (**5e**), the toxicity of the studied compounds decreases, relative to unsubstituted phenacylpyrazole **5a**.

The above method using *Artemia Salina* is a simple and inexpensive screening test for cytotoxic compounds. It has the advantages of requiring only small amounts of compounds and the employment of microplate technology facilitates the testing of large number of samples and dilutions. Although the assay did not detect those compounds which require metabolic activation in man, it maybe conveniently used where, as in the case of the quassinoids, the brine shrimp is a reliable detector of biological activity.

The results of the cytotoxicity study show the possibility of varying the cytotoxic properties of the substance by introducing a certain functional group into *N*-acylalkylpyrazole derivatives, and can be used as a trend for further molecular design or pharmacological optimization.

6. Supplementary Materials: No supplementary material.

7. Author Contributions

Conceptualization - S.Yu.; methodology - N.A.; software - M.K., S.Yu.; validation - M.K.; formal analysis - A.D.; investigation - M.K.; resources - A.G.; data curation - X.X.; writing, original draft preparation - N.A.; writing, review and editing - S.Yu.; visualization - A.G.; supervision - M.K.; project administration - M.K.; funding acquisition - M.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information

Alzhapparova, Nazym – PhD-student of the educational program: «8D05301-Chemistry», Karaganda Buketov University, Mukanov st., 41, Karaganda, Kazakhstan, 100024, email: nazym285@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0359-2350>

Panshina, Svetlana – Candidate of Chemical Sciences, Assistant Professor of the Department of Organic Chemistry and Polymers, Karaganda Buketov University, Mukanov st., 41, Karaganda, Kazakhstan, 100024, email: janim_svetatusik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6824-2645>

Ibrayev, Marat – Doctor of Chemical Sciences, Research Professor at the Department of Organic Chemistry and Polymers, Karaganda Buketov University, Mukanov st., 41, Karaganda, Kazakhstan, 100024, email: mkibr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0798-5562>

Zhumina, Asel – PhD, Associate Professor of the Department of Botany, Karaganda Buketov University, Universitetskaya St. 28/3, Building No. 3, Karaganda, Kazakhstan, 100024, email: asbiol@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0904-4726>

Orazbai, Aknur – Junior Researcher at the Biotechnology and Ecomonitoring laboratories, Karaganda Buketov University, Universitetskaya st. 28/3, building No. 3, Karaganda, Kazakhstan, 100024, email: ladyasha@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4469-7563>

9. Funding: The work was carried out within the framework of grant funding from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, project IRN AP19677175 «Development of a new affordable class of fluorescent labels based on diazapentalenes»

10. Acknowledgments: We express our deep gratitude to Lomonosov Moscow State University for cooperation in research.

11. Conflicts of interest: No conflict of interest.

12. References

1. Al-Aizari, F.A., Ansar, M.H., Karrouchi, K., Mabkhot, Y., Ramli, Y., Taoufik, J. (2018). Synthesis and Pharmacological Activities of Pyrazole Derivatives: A Review. *Molecules* 23, 1–86. <https://doi.org/10.3390/molecules23010134>
2. Alan, R.K. (1997). Comprehensive heterocyclic chemistry. Pyrazoles. In H. Richard (Eds.). John Wiley & Sons, Ltd, New York.
3. Ansari, A., Ali, A., Asif, M. (2017). Biologically active pyrazole derivatives: A Review. *New Journal of Chemistry*. 41. 16–41. <https://doi.org/10.1039/C6NJ03181A>
4. Babaev, E.V., Panshina, S.Yu., Alzhapparova, N.A., Ibraev, M.K., Usenova, M.S. (2025). 3a,6a-Diazapentalenes (pyrazolo[1,2-a]pyrazoles). *Russian Chemical Bulletin*. 74, 1958–1975. <https://doi.org/10.1007/s11172-025-4681-8>
5. Baker, J. (1941). Mechanism and kinetics of aromatic side-chain substitution. Interpretation of reaction data by the method of relative energy levels. *Transactions of the Faraday Society* 37, 643. <https://doi.org/10.1039/TF9413700632>
6. Balasubrahmanya, K.S., Kiran, B.M., Ding-Yah, Y. (2023). 4-Chloro-3-nitrocoumarin as a precursor for synthesis of 2-arylchromeno[3,4-b]pyrrol-4(3H)-ones: a case of nitro group directed reductive coupling. *Org. Biomol. Chem.* 29, 5964–5969. <https://doi.org/10.1039/d3ob00917c>
7. Calenda, S., Catarzi, D., Varano, F., Vigiani, E., Volpini, R., Lambertucci, C., Spinaci, A., Trevisan, L., Grieco, I., Federico, S., Spalluto, G., Novello, G., Salmaso, V., Stefano, M.S., Colotta, V. (2024). Structural Investigations on 2-Amidobenzimidazole Derivatives as New Inhibitors of Protein Kinase CK₁ Delta. *Pharmaceuticals (Base l)* 17, 468, 1–31. <https://doi.org/10.3390/ph17040468>
8. Castillo, J.M., Portilla, J. (2019). Recent advances in the synthesis of new pyrazole derivatives. *Italian Society of Chemistry*, 194–223. <https://doi.org/10.17374/targets.2019.22.194>

9. Cour, T., Rasmussen, S.E., Hopf, H., Waisvisz, J.M., Hoeven, M.G., Carl-Gunnar, S. (1973). The structure of pyrazole, $C_3H_4N_2$, at 295K and 108K as determined by X-Ray diffraction. *Acta Chemica Scandinavica* 27, 1845–1854. <https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.27-1845>
10. Dago, C.D., Maux, P.L., Roisnel, T., Brigaudeau, C., Bekro, Y.A., Mignen, O., Bazureau, J.P. (2018). Preliminary Structure-Activity Relationship (SAR) of a Novel Series of Pyrazole SKF-96365 Analogues as Potential Store-Operated Calcium Entry (SOCE) Inhibitors. *Journal of Molecular Sciences* 19, 2–24. <https://doi.org/10.3390/ijms19030856>
11. Dhiman, Sh., Nandwana, N.K., Saini, H.K., Kumar, D., Rangan, K., Robertson, K.N., Jhad, M., Kumara, A. (2018). Nickel-Catalyzed Tandem Knoevenagel Condensation and Intramolecular Direct Arylation: Synthesis of Pyrazolo[5,1-a]-isoquinoline Derivatives. *Advanced Synthesis & Catalysis* 360, 1973–1983. <https://doi.org/10.1002/adsc.201701519>
12. Elguero, J., Jagerovic, N. (1995). Solid state structure of NH-pyrazoles not easily amenable to crystal structure determinations: The case of 3(5)-phenyl-5(3)-methylpyrazole and 3,5-diphenyl-4-methylpyrazole. *Journal of Heterocyclic Chemistry* 32, 451–456. <https://doi.org/10.1002/jhet.5570320211>
13. Favilla, M., Macchia, L., Gallo, A., Altomare, C. (2006). Toxicity assessment of metabolites of fungal biocontrol agents using two different (*Artemia salina* and *Daphnia magna*) invertebrate bioassays. *Food and Chemical Toxicology* 44, 1922–1931. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.06.024>
14. Karrouchi, K., Radi, S., Ramli, Y., Taoufik, J., Mabkhot, Y.N., Al-aizari, A.F., Ansar, M. (2018). Synthesis and Pharmacological Activities of Pyrazole Derivatives: A Review. *Molecules* 23, 1–86. <https://doi.org/10.3390/molecules23010134>
15. Katritzky, A.R., Wang, M., Zhang, S., Voronkov, M.V., Steel, P.J. (2001). Regioselective synthesis of polysubstituted pyrazoles and isoxazoles. *The Journal of Organic Chemistry* 66, 6787–6791. <https://doi.org/10.1021/jo0101407>
16. Kester, D.R., Duedall, I.W., Connors, D.N., Pytkowicz, R.M. (1967). Preparation of Artificial Seawater Archived. *Limnology and Oceanography* 12, 176–179. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.1.0176>
17. Lei, J., Ding, Y., Tang, D.Y., Li, H., Xu, Z., Chen, Z. (2022). Efficient Synthesis of Pyrazoles by pH Dependent Isomerization of Enaminodiones. *Asian Journal of Organic Chemistry* 12, 1–5. <https://doi.org/10.1002/ajoc.202200448>
18. Libralato, G., Prato, E., Migliore, L., Cicero, A.M., Manfra, L. (2016). A review of toxicity testing protocols and endpoints with *Artemia* spp. *Ecological Indicators* 69, 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.017>
19. Martin, M.A.P., Fiss, G.F., Frizzo, C.P., Rosa, F.A., Bonacorso, H.G., Zanatta, N. (2010). Highly regioselective synthesis of novel 1,4'-bipyrazoles. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 21, 240–247. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532010000200008>
20. Meyer, B.N., Ferrighi, N.R., Putnam, J.E., Jacobsen, L.B., Nichols, D.E., Laughlin, J.L. (1982). Brine shrimp: A convenient general bioassay for active plant constituents. *Journal of Medicinal Plants Research* 45, 31–34. <https://doi.org/10.1055/s-2007-971236>
21. Ozdemir, Z., Karakurt, A., Cali, U., Gunal, S., Isik, S., Sahin, Z.S., Dalkara S. (2015). Synthesis, anticonvulsant and antimicrobial activities of some new [1-(2-naphthyl)-2-(pyrazol-1-yl)ethanone]oxime ethers. *Medicinal Chemistry* 11, 41–49. <https://doi.org/10.2174/1573406410666140428150358>
22. Perrin, D.D. (1965). Dissociation Constants of Organic Bases in Aqueous Solution, Supplement 1972, Butterworths, London. <https://doi.org/10.1002/352760183X.ch5b>
23. Rague Schleyer, P., Maerker, C., Dransfeld, A., Jiao, H., Eikema Hommes, N.J.R. (1996). Nucleus-Independent Chemical Shifts: A Simple and Efficient Aromaticity Probe. *J. Am. Chem. Soc.* 118, 6317–6318. <https://doi.org/10.1021/ja960582d>
24. Salerno, L., Modica, M.N., Romeo, G., Pittalà V, Siracusa, M.A., Amato, M.E., Acquaviva, R., Di Giacomo, C., Sorrenti, V. (2012). Novel inhibitors of nitric oxide synthase with

- antioxidant properties. *European Journal of Medicinal Chemistry* 49, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2012.01.002>
25. Schmidt, A., Dreger, A. (2011). Recent Advances in the Chemistry of Pyrazoles. Properties, Biological Activities, and Syntheses. *Current Organic Chemistry* 15, 1423–1463. <https://doi.org/10.2174/138527211795378263>
26. Secrieru, A., Michael, P.O., Cristiano, M.L.S. (2020). Revisiting the Structure and Chemistry of 3(5)-Substituted Pyrazoles. *Molecules* 25, 42. 1–28. <https://doi.org/10.3390/molecules25010042>
27. Sharma, T., Kumar, R., Chandra S., Sindhu, J., Singh, J., Singh, B., Mehta, S.K., Umar, A.S., Singh Saini, T., Kumar, V., Kataria, R. (2020). Synthesis, structural and pharmacological exploration of 2-(3,5-dimethyl-1H-pyrazol-1-yl)-acetophenone oximes and their silver complexes. *Polyhedron* 195, 114972. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2020.114972>
28. Sharma, T., Kumar, R., Sahoo, S.C., Sindhu, J., Singh, J., Singh, B., Mehta, S.K., Umar, A., Saini, T.S., Kumar, V., Kataria, R. (2021). Synthesis, structural and pharmacological exploration of 2-(3, 5-dimethyl-1H-pyrazol-1-yl)-acetophenone oximes and their silver complexes. *Polyhedron* 195, 114972. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2020.114972>
29. Sikora, M., Katrusiak, A. (2013). Pressure-Controlled Neutral–Ionic Transition and Disorder of NH...N Hydrogen Bonds in Pyrazole. *The Journal of Physical Chemistry C*. 117, 10661–10668. <https://doi.org/10.1021/jp401389v>
30. Solis, P.N., Wright, C.W., Anderson, M.M., Gupta, M.P., Philhipson, J.D. (1993). A microwell Cytotoxicity Assay using *Artemia salina* (Brine Shrimp). *Planta Med.* 59, 250–252. <https://doi.org/10.1055/s-2006-959661>
31. Solomons, T.W., Calderazzo, J., Fowler, F.W. (1965). The Diazapentalene System. 1-Benzoyl-2-phenylpyrazolo[1,2-a]pyrazole Derivatives. *Journal of the American Chemical Society* 87, 528–531. <https://doi.org/10.1021/ja01081a023>
32. Stanovnik, B., Svete, J. (2003) Product Class 1: Pyrazoles. *ChemInform* 34, 215–225. <https://doi.org/10.1002/chin.200346258>
33. Suleimenov, E.M. (2009). Components of *Peusedanum morisonii* and their antimicrobial and cytotoxic activity. *Chemistry of Natural Compounds* 45, 710–711. <https://doi.org/10.1007/s10600-009-9423-x>
34. Unnava, R., Deka, M.J., Saikia, A.K. (2016). Synthesis of Highly Substituted 4-Iodopyrazole N-oxides and Pyrazoles from Propargylamines. *Asian Journal of Organic Chemistry* 5, 528–536. <https://doi.org/10.1002/ajoc.201600002>
35. Zhang, Y., Wu, C., Zhang, N., Fan, R., Ye, Y., Xu, J. (2023). Recent Advances in the Development of Pyrazole Derivatives as Anticancer Agents. *International Journal of Molecular Sciences* 24, 12724. <https://doi.org/10.3390/ijms241612724>

Н-Ацилалкилпиразолдардың синтезі және олардың құрылымының цитоуыттылық қасиеттеріне әсері

Назым Алжаппарова, Светлана Панышина, Марат Ибраев, Асель Жумина, Акнұр Оразбай

Аңдатпа. Пиразолдар және олардың туындылары сақина құрылымында екі байланысқан азот атомы бар π -электронды ароматты гетероциклді қосылыстар. Пиразол туындылары биологиялық белсенді қасиеттерінің кең және алуан түрлілігіне байланысты ғалымдардың назарын аударады. Пиразол және оның гомологтары молекулалардың қышқылдық-негіздік қасиеттеріне ықпал ететін NH-тобы протонының миграциясы нәтижесінде пайда болатын прототропты таутомериямен сипатталады.

Бұл зерттеуде пиразолдардың қасиеттерін ескере отырып, алифатты және ароматты α -бромидкетондардың пиразолмен және оның 3,5-диметил-және 3,5-дифенил-туындыларымен өзара әрекеттесу реакцияларының бірқатар *N*-(ацилалкил)пиразолдары бөлме температурасында аралық тұздар мен бромсутектің бөлінуі үшін K_2CO_3 негізінің қатысуымен ацетондағы екі сатылы «*One-pot*» реакциясы арқылы синтезделді. Зерттелетін қосылыстардың ішінде 65–92% шығымы бар жаңа, бұрын сипатталмаған пинаколонпиразолдар және 38–91% шығымы бар фенацилпиразолдар синтезделді. *N*-ацилалкилдену реакциясының ықтимал жолдары қарастырылады.

Алынған өнімдердің құрылымдары ЯМР, ИК, РҚТ және ГХ-Масс-спектрометриямен сипатталды. РҚТ нәтижелері бойынша *N*-(ацилалкил)пиразолдар кристалдарының түзілуіне карбонил топтары қатысатын жазық конъюгацияланған π -жүйелер болып табылады.

Artemia Salina шаян тәрізділеріне қатысты зерттелетін *N*-ацилалкилпиразолдардың цитоуыттылығының көрінісі анықталды және уыттылық орынбасарлардың түріне байланысты екені көрсетілген. Сонымен, фенацилпиразолдың цитоуыттылығы пинаколонпиразолдың цитоуыттылығынан 6 есе көп, ал фенацилпиразолдардың цитоуыттылығы бензол сақинасындағы орынбасарларға байланысты өзгереді және бензол ядросында акцепторлар болған кезде төмендейді. Цитоуыттылықты зерттеу нәтижелері оларды одан кейінгі модификация кезінде дәрілік заттарды жасау үшін қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: пиразол, *N*-ацилалкилдену, α -бромкетондар, ЯМР, РҚТ, цитоуыттылық, *Artemia Salina*.

Синтез *N*-ацилалкилпиразолов и влияние их структуры на свойства цитотоксичности

Назым Алжаппарова, Светлана Панышина, Марат Ибраев, Асель Жумина, Акнур Оразбай

Аннотация: Пиразолы и его производные – это π -электронизбыточные ароматические гетероциклические соединения, в структуре кольца которых имеются два связанных атома азота. Производные пиразола привлекают все больше внимания ученых, благодаря своему обширному и разнообразному ряду биологически активных свойств. Пиразолам и его гомологам свойственна прототропная таутомерия.

Учитывая свойства пиразолов, в данном исследовании синтезирован ряд производных *N*-(ацилалкил)пиразолов реакций взаимодействия алифатических и ароматических α -бромидкетонов с пиразолом и его 3,5-диметил- и 3,5-дифенилпроизводными через двухстадийную реакцию «*One-pot*» в ацетоне, при комнатной температуре, в присутствии основания K_2CO_3 для высвобождения промежуточной соли и отщепления бромоводорода. Среди исследуемых соединений получены новые, ранее не описанные пинаколонпиразолы с выходами 65–92% и фенацилпиразолы с выходами 38–91%. Рассмотрены вероятные пути реакции *N*-ацилалкилирования.

Структуры полученных продуктов охарактеризованы методами спектроскопии ЯМР, ИК, РСА и ГХ-Масс-спектрометрии. Согласно результатам РСА, *N*-(ацилалкил)пиразолы – плоские, сопряженные π -системы, в формировании кристаллов которых участвуют карбонильные группы.

Определено проявление цитотоксичности изучаемых *N*-ацилалкилпиразолов в отношении рачков *Artemia Salina*, причем показано, что токсичность зависит от типа заместителей. Так, фенацилпиразол имеет цитотоксичность, в 6 раз превышающую цитотоксичность пинаколонпиразола, а цитотоксичность фенацилпиразолов меняется в зависимости от заместителей в бензольном кольце, причем падает при наличии акцепторов в бензольном

ядре. Результаты исследования цитотоксичности могут быть использованы для разработки лекарственных средств при их дальнейшей модификации.

Ключевые слова: пиразол; N-ацилалкилирование; α -бромкетоны; ЯМР, РСА, цитотоксичность, *Artemia Salina*.

Application of carbon-mineral filler based on coal shale mining by-products in elastomeric compositions

Valeryia Bobrova, Sergey Nechipurenko*, Andrei Kasperovich, Aigerim Kaiaidarova

Department of Polymer Composite Materials, Faculty of Organic Substances Technology, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus; bobrova@belstu.by; kasp@belstu.by; aigerim_ko@list.ru

*Correspondence: nechipurenkos@mail.ru

Abstract: The integration of biological and renewable resources as fillers or novel components in thermoplastics and rubbers has gained attention due to their potential to mitigate the environmental impact of petroleum- and natural gas-derived fillers. This study explored using a carbon-mineral filler, derived from coal shale processing by-products, as a partial or complete substitute for standard industrial fillers in rubber formulations for sealing materials. Six rubber compositions were produced, varying in the proportion of carbon-mineral filler replacing N550 semi-reinforcing carbon black, and were evaluated for viscoelastic, kinetic, physical-mechanical, structural, and operational properties. Fully substituting technical carbon with the carbon-mineral filler improved technological characteristics, reducing Mooney viscosity by 40.5% and increasing resistance to premature vulcanization by 53.6%. When up to 10 wt.% of N550 was replaced, the materials retained required strength and hardness. Moreover, the elasticity of rubbers increased by up to 1.5 times with higher filler content. Even at elevated substitution levels, sealing performance remained stable, while resistance to aggressive liquid media nearly doubled (up to 1.9 times). These findings suggest that the carbon-mineral filler can extend the service life of rubber sealing products while reducing reliance on conventional fillers.

Keywords: carbon-mineral filler, industrial elastomeric compositions, Mooney viscosity, relative compressive set

Citation: Bobrova, V.V., Nechipurenko, S.V., Kasperovich, A.V., Kaiaidarova, A.K. (2025). Application of carbon-mineral filler based on coal shale mining by-products in elastomeric compositions. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, 152(3), 57-73. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-57-73>

Academic Editor:
E.Ye. Kopsishev

Received: 31.08.2025
Revised: 24.09.2025
Accepted: 24.09.2025
Published: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Introduction

Technical carbon and white carbon black (hydrated silicon dioxide, $m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) remain the most widely used reinforcing agents in elastomer composites based on both natural and synthetic rubbers. Their incorporation into rubber matrices substantially enhances mechanical performance, particularly strength and deformation characteristics. However, these improvements are now well-documented and understood, and further advancements using this conventional approach have reached a practical limit (Garishin et al., 2018; Basak et al., 2012). To achieve new breakthroughs, it is necessary to explore alternative, non-traditional fillers.

One promising strategy involves the use of finely dispersed clay minerals such as montmorillonite, halloysite, palygorskite, and shungite (Valera-Zaragoza et al., Shakun et al., 2014; Zoromba et al., 2015; Lua et al., 2016). These materials offer natural variability in particle morphology, which can be selected to suit specific application requirements. For instance, montmorillonite dispersion yields ultrathin plate-like structures (Xie et al., 2001; Garishin et al., 2009), palygorskite forms elongated needle-shaped particles (Tang et al., 2016), while shungite results in spherical globular particles (Ignatov et al., 2014). It is important to note that these mineral fillers are derived from soft, loose sedimentary rocks, which typically have a Mohs hardness between 1 and 4. Interestingly, after dispersion, the resulting filler particles exhibit significantly higher hardness and strength than the original mineral. Thus, low initial hardness of the raw mineral serves as an indicator of its favorable dispersibility and suitability for producing high-quality reinforcing fillers.

Incorporating dispersed clay particles into rubber enhances not only its physical and mechanical properties but also provides several valuable functional characteristics, such as improved thermal stability, flame resistance, reduced diffusion permeability, environmental safety, and lower overall production costs (Fengge, 2004). These composite materials represent structurally complex and heterogeneous systems, consisting of a soft, highly elastic, low-modulus rubber matrix reinforced with much harder and stronger dispersed filler particles. Such a structure leads to intricate mechanical behavior, including finite deformation, nonlinear elasticity, and viscoelastic responses, which arise from the coexistence of reversible and irreversible structural transformations during deformation. At present, elastomer composites containing mineral fillers are being actively investigated through both experimental studies and theoretical modeling (Rooj et al., 2012; Rooj et al., 2013; Zhang et al., 2012). From a practical standpoint, one of the most promising applications for these advanced materials is in the manufacturing of automotive tires and various technical rubber goods.

Elastomeric composites are considered highly promising structural materials, with their products widely utilized in industries such as automotive, aviation, aerospace, oil refining, and many others. In the development of these composites and the manufacturing of products from them, significant emphasis is placed on environmental sustainability, along with enhancing both economic and energy efficiency during production. Consequently, there is a growing need for the creation of new types of highly dispersed fillers, including those derived from natural sources. Such fillers should ensure an optimal balance of mechanical characteristics in polymer composites while offering clear advantages over conventional materials, making their development a critical and timely objective.

This study aims to explore the possibility of utilizing a by-product from oil shale extraction as a partial or complete substitute (10-90 wt%) for synthetic filler in specialized rubber compositions. The research focuses on assessing the rheological, kinetic, physical-mechanical, and performance properties of these modified formulations with the goal of lowering production costs and minimizing environmental pollution. For this purpose, an existing industrial rubber compound recipe designed for manufacturing sealing products was selected, where the conventional N550 technical carbon was replaced by the carbon-mineral filler derived from coal shale processing.

2. Materials and methods

2.1 Materials

The study utilized a carbon-mineral filler (CMF) derived from the by-products of coal shale mining at the Balasau deposit (Republic of Kazakhstan) through a preliminary flotation process. This filler has a chemical composition comparable to that of shungite rock (Table 1) but is distinguished by its higher carbon content and stable, uniform composition.

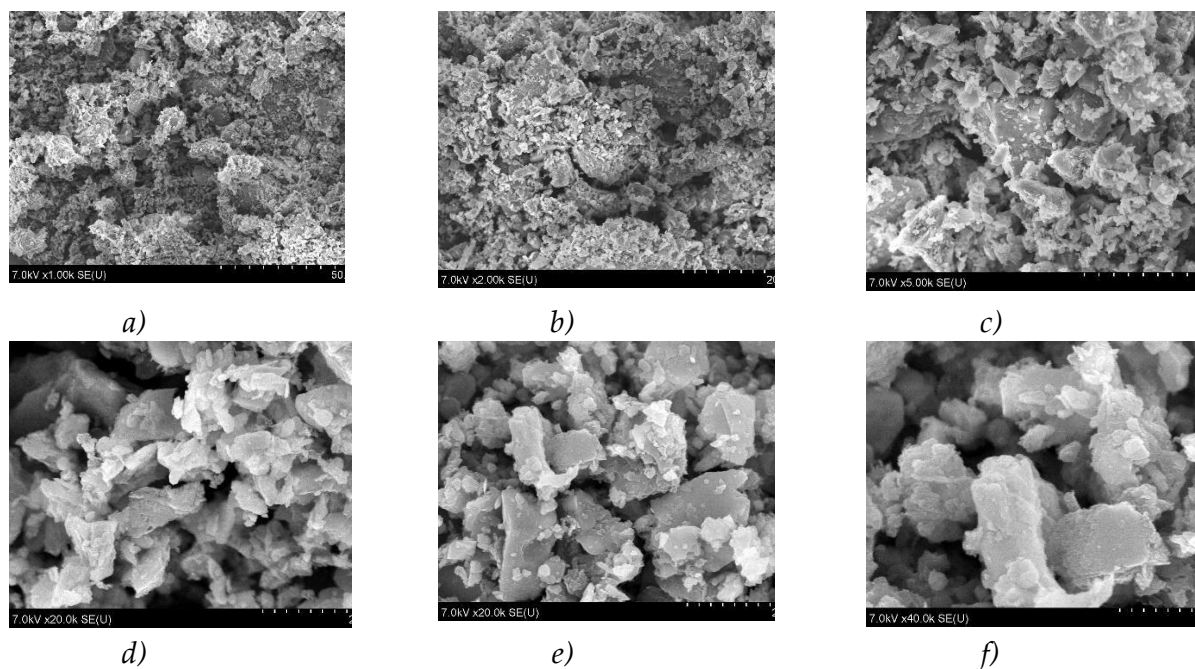
Table 1. Elemental composition of the surface of carbon-mineral filler

Elements	Content, %
C	38.34
O	35.85
Si	18.24

Al	1.20
S	1.41
Fe	1.82
K	0.79
Ba	2.23
Mg	0.05
P	0.04
Na	0.01
Ca	0.02

The CMF contains a relatively high level of metal impurities ($\approx 6.16\%$) along with a measurable amount of sulfur (1.41%), both of which can significantly influence the kinetic behavior during the processing of rubber compounds.

The CMF is characterized by a structure composed of fragmented mineral aggregates interspersed with larger grains, which are surrounded by fragments of the rock matrix (Figure 1).



a) $\times 100$, b) $\times 200$, c) $\times 500$, d) $\times 2000$, e) $\times 2000$, f) $\times 4000$

Figure 1. SEM image of CMF at different magnifications

The physicochemical characteristics of the CMF are presented in Table 2.

Table 2. Physicochemical characteristics of CMF

Indicator name	Indicator value
Specific external surface area according to BET, m^2/g	21
Sorption volume, cm^3/g	0.02
Particle size, μm	5
Structure	crystalline

X-ray phase analysis conducted using a D8 Advance Bruker AXS diffractometer (Germany) revealed that the silicon in the CMF exists predominantly in a crystalline form (Figure 2).

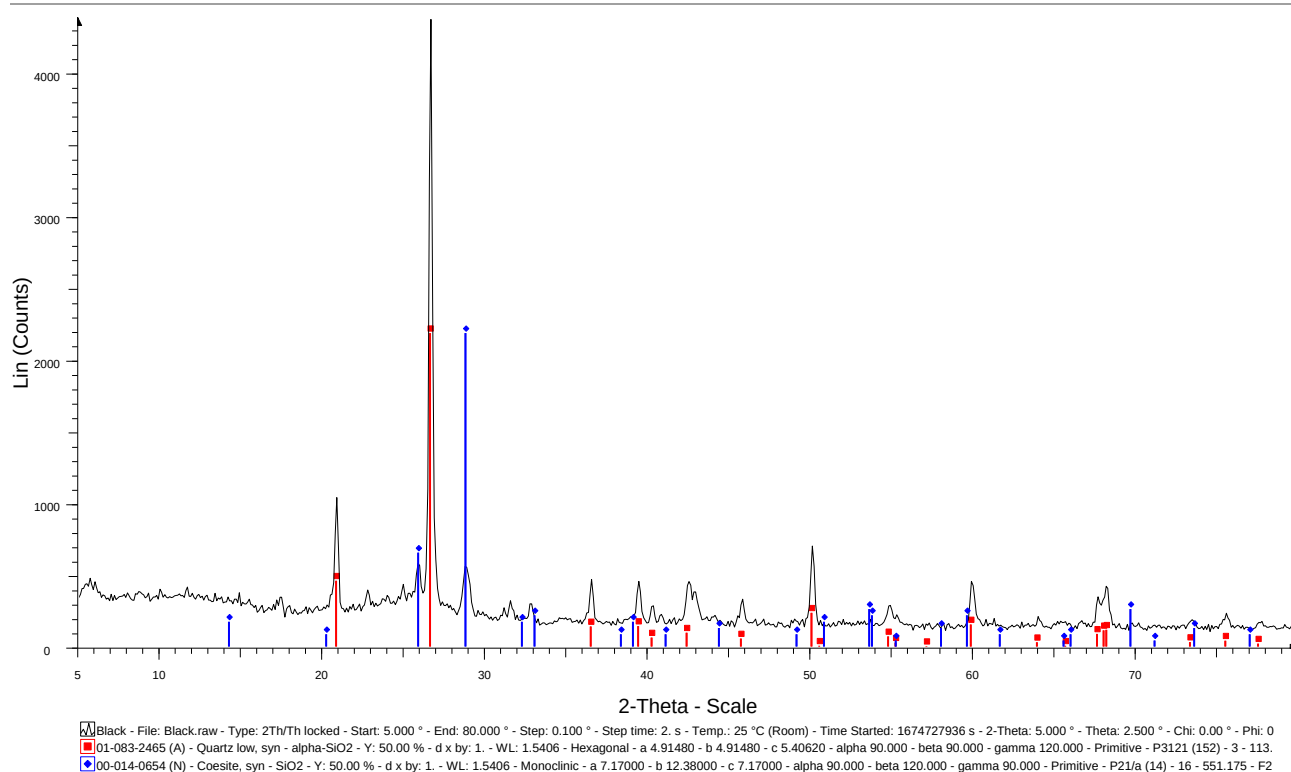


Figure 2. Diffractogram of the CMF sample

To evaluate the feasibility of incorporating CMF into production, studies were carried out using an existing industrial formulation of an elastomeric composition based on BNKS-18AMN synthetic butadiene-nitrile rubber (GOST R 54556-2011, 2013), specifically designed for manufacturing sealing products (Table 3). The formulation is presented solely for reference, as the exact industrial recipe cannot be disclosed by the authors.

Table 3. Recipe for industrial elastomeric compositions

Ingredient name	Ingredient content, wt. parts
BNKS-18 AMN	100.00
Sulfur	2.60
Vulcanization accelerators	2.45
Zinc white	5.0
Antioxidants	2.0
Filler: technical carbon grade N550	90
Plasticizer	35
Stearic acid	1
Total	238.05

The BNKS-18 AMN-based composition is utilized in the production of sealing rings that require high sealing performance. For this purpose, a semi-reinforcing grade of carbon black, N550, is used, featuring a specific external surface area of 41 m²/g and an average aggregate size of 3 μm, as determined experimentally and in accordance with ASTM D1765-03. The structural characteristics of carbon black depend on its grade, which is defined by the size of primary particles and the morphology of aggregates. Based on these parameters, carbon black can exhibit either a highly aggregated or a less aggregated structure. Typically, aggregates are further combined into agglomerates held together by physical forces. Highly reinforcing grades of carbon black are distinguished by a greater proportion of branched aggregates, which create porous structures with a

large surface area. This extensive surface promotes strong interactions with the rubber matrix, resulting in superior reinforcing effects (Balasooriya et al., 2019; Savetlana et al., 2017). Reinforcing fillers enhance the mechanical strength of rubbers and improve other key performance characteristics, such as tear resistance, wear resistance, and conditional stress at specific deformations. Conversely, when the structure of carbon black decreases, a higher proportion of spheroidal and ellipsoidal aggregates is observed (Jurkiewicz et al., 2018). Fillers with a low structure are less effective at reinforcement but are commonly used to reduce the production cost of rubber compounds. They also improve processing characteristics through hydrodynamic effects and can impart specific properties, such as improved heat and light resistance, to the final rubber product (Savetlana et al., 2017).

In the tested formulation, both partial replacement of N550 technical carbon with carbon-mineral filler in dosages ranging from 10 to 50 wt.% and its complete replacement in a dosage of 90 wt.% were carried out. With partial replacement, the total filler content in the elastomeric composition remained unchanged.

The concentrations of all other components in the formulation were kept constant, allowing for a clear assessment of the influence of the CMF on the technological and performance properties of the industrial elastomeric compositions.

2.2 Methods

The mixing of the components was carried out on RC-WW 330 150/150 laboratory roll mills (Rubicon, Germany) at a temperature of $45\pm 5^\circ\text{C}$ and a roll speed of 25 rpm. Following the mixing process, the rubber compound was used without any additional treatment. The introduction of the carbon-mineral filler was performed simultaneously with N550 carbon black in three successive stages.

In this study, the Mooney viscosity of the rubber compounds was measured using an MV 2000 shear disc viscometer (Alpha Technologies, USA) following the requirements of GOST R 54552-2011 (GOST R 54552-2011, 2013). The test involves immersing a metal rotor (disc) into a rubber compound sample placed inside a rigid cylindrical chamber, where specific pressure and temperature conditions are maintained. The rotor rotates slowly at a constant speed in one direction for a set period of time. The resistance of the rubber to this movement generates torque, which is recorded in conventional units and expressed as the Mooney viscosity of the sample.

The vulcanization and rheological characteristics of the rubber compounds were evaluated using kinetic vulcanization curves obtained with an ODR 2000 rheometer (Alpha Technologies, USA) in accordance with GOST 12535-84 (GOST 12535-84, 1985). This method involves measuring the torque generated during shear deformation of the sample, which is caused by the oscillations of a rotor equipped with a biconical disc operating at a specified frequency and amplitude under controlled temperature conditions. Test specimens weighing 10 g were prepared in any shape that allowed the chamber to be completely filled. The vulcanization of the BNKS-18 AMN-based elastomeric compositions was performed at 163°C for 30 minutes using a vulcanizing press, after which the samples were kept at room temperature for 24 hours prior to mechanical testing.

The evaluation of elasticity and strength properties of the elastomeric compositions was performed by determining the conditional tensile strength and elongation at break at a stretching speed of 500 mm/min using a T2020 DC10 SH tensometer (Alpha Technologies, USA). Testing was conducted on 15 standard specimens for each rubber formulation in compliance with GOST 270-75 (GOST 270-75, 1975). The method involves stretching the test samples at a constant rate until rupture, while measuring the force at specific elongation points, as well as recording both the force and elongation at the moment of sample failure.

The Shore A hardness of the elastomeric compositions was measured using a DIGI-TEST hardness tester (Bareiss, Germany) in accordance with GOST 263-75 (GOST 263-75, 1989). This method is based on determining the material's resistance to the penetration of an indenter into the rubber surface.

The relative residual compression deformation (RRCD) of the rubber samples was measured on nine specimens following the procedure outlined in GOST 9.029-74 (GOST 9.029-74, 1982). The RRCD value, expressed as a percentage and calculated with an accuracy of 0.01, was determined using Formula 1:

$$C = \frac{h_0 - h}{h_0 - h_s} \quad (1)$$

where h_0 – height of the sample before testing, mm;
 h – height of the sample after «resting», mm;
 h_s – height of the limiter, mm

The method involves subjecting the samples to static compression deformation, after which the RRCD value is used to assess the rubber's ability to maintain its elastic properties following aging under controlled conditions. The tests were performed at 25% compression and a temperature of $125 \pm 2^\circ\text{C}$. The final result was calculated as the arithmetic mean of the measurements obtained from all tested specimens, with a minimum of three samples required for accuracy.

The resistance of the elastomeric compositions to aggressive liquid media was assessed by measuring the changes in mass and volume of the samples after exposure to a standard test liquid. To evaluate the chemical resistance of the rubbers, the samples were immersed in a 70:30 vol.% mixture of isooctane and toluene and kept at a temperature of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ for a period of 1 to 7 days, following the procedure specified in GOST 9.030-74 (method A) (GOST 9.030-74, 2006).

The equilibrium swelling method is one of the most commonly applied techniques for determining the cross-linking density of vulcanized rubber materials (Averko-Antonovich et al., 2002). For this study, five rubber samples were prepared, each measuring $200 \times 10 \times 2 \pm 0.2$ mm. The samples were initially weighed using analytical balances and then immersed in toluene as the solvent. After reaching the equilibrium swelling state, the specimens were placed in an oven at $60 \pm 1^\circ\text{C}$ for 24 hours to completely remove the absorbed solvent, followed by a final weighing to determine mass changes.

The volume fraction of rubber in the swollen unfilled vulcanizate V_r , m^3/mol , was calculated from the ratio:

$$V_r = \frac{P_{start} \cdot \frac{F}{\rho_r}}{P_{start} \cdot \frac{F}{\rho_r} + \frac{P_{swell} - P_{dry}}{\rho_s}} \quad (2)$$

where P_{start} – is the initial mass of the sample, kg;
 F – mass fraction of rubber in the vulcanizate;
 P_{swell} – mass of the swollen sample, kg;
 P_{dry} – mass of the sample dried after swelling, kg;
 ρ_r, ρ_s – densities of rubber and solvent (toluene), kg/m^3 .

For filled rubbers, the value of V_r was converted to V_{r0} using the equation of Cannin and Russell (Ovcharov, 2001):

$$V_{r0} = V_r \cdot (a \cdot e^{-z} + b) \quad (3)$$

where a and b are constants characterizing the system (for the rubbers under study, $a = 0.56$; $b = 0.44$);

z is the mass fraction of the filler in the vulcanizate.

The average molecular weight of the chain segment M_c enclosed between two crosslinks was determined using the Flory-Renner equation:

$$\frac{1}{M_c} = \frac{V_{r0} + \chi \cdot V_{r0}^2 + \ln(1 - V_{r0})}{\rho_k \cdot V_0 \cdot (V_{r0}^3 - 0,5 \cdot V_{r0})} \quad (4)$$

where V_0 is the molar volume of the solvent, m^3/mol ;

χ – Huggins constant, which characterizes the polymer-solvent interaction.

The value of χ for each sample was calculated according to Kraus, who assumed a linear relationship between χ and V_r :

$$\chi = 0,37 + 0,52 \cdot V_r \quad (5)$$

The number of cross-links n contained in 1 cm^3 of vulcanizate was calculated using the formula:

$$n = \frac{N_A \cdot \rho_k}{M_c} \quad (6)$$

where N_A is Avogadro's number, $6.023 \cdot 10^{-23} \text{ mol}^{-1}$.

The cross-linking density ν , mol/m^3 was determined by the expression:

$$\nu = \frac{\rho_k}{M_c} \quad (7)$$

where ρ is the density of the vulcanizate, kg/m^3 .

Based on the study results, the obtained data were subjected to mathematical processing, which demonstrated that the relative measurement error at a confidence level of 0.95 did not exceed 5%. The analysis and processing of the experimental results were carried out in compliance with GOST 269-66 (GOST 269-66, 1993).

3. Results and discussion

3.1 Determination of viscosity according to Mooney

Figure 3 presents the results of measuring the Mooney viscosity (M_L) of rubber compounds formulated with different amounts of carbon-mineral filler based on BNKS-18 AMN.

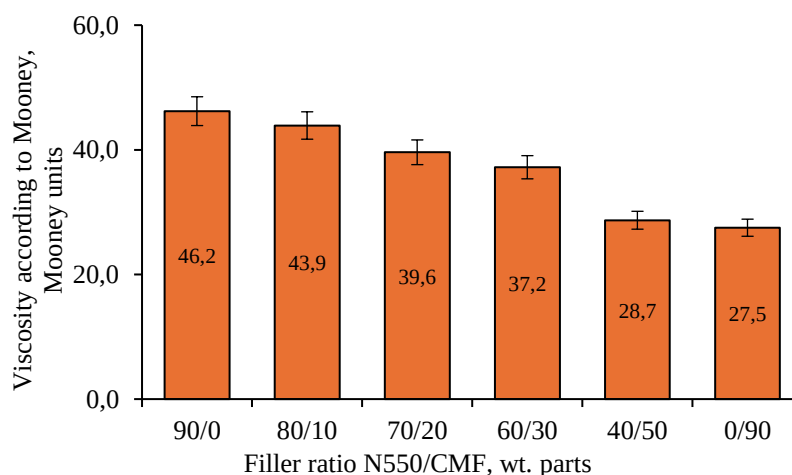


Figure 3. Dependence of the change in Mooney viscosity of rubber compounds on the dosage of CMF in elastomeric compositions based on BNKS-18 AMN

When N550 carbon black was replaced with CMF, the Mooney viscosity of the rubber compounds decreased by 5.0-40.5% as the CMF content increased. This reduction is attributed to the differences in the physicochemical surface properties of the fillers, particularly their specific external surface area. CMF has a surface area of 21 m²/g, whereas N550 carbon black has a higher value of 41 m²/g. Due to this difference, the ability of the combined filler system to form chain-like structures is significantly diminished, which weakens the physical interactions between the filler and the rubber matrix. As a result, the mobility of elastomer macromolecular segments increases, facilitating greater shear deformation and easier movement of macromolecules relative to one another, ultimately leading to lower viscosity (Fernandes et al., 2017). This decrease in viscosity is advantageous for processing, as it reduces the energy consumption required during the manufacturing of rubber compounds (Beknazarov et al.).

3.2 Determination of the kinetic parameters of the vulcanization process

Vulcanization of elastomeric compositions is the process in which rubber reacts with a vulcanizing agent, leading to the formation of a three-dimensional cross-linked network. During this process, the plasticity of the rubber decreases, while its elasticity and strength increase. At the initial stage, the rubber compound gradually loses its fluidity (sub-vulcanization). This is followed by the main stage, characterized by a sharp increase in strength as cross-linking intensifies. When the optimal vulcanization point is reached, the rubber achieves a balanced combination of physical and mechanical properties. After reaching this optimum, the material maintains its properties for a certain period, known as the vulcanization plateau. However, with prolonged vulcanization, reversion (over-vulcanization) occurs, leading to the breakdown of cross-links and a deterioration of rubber properties. By analyzing the kinetic parameters of the vulcanization process using rheometers, it is possible to track and evaluate all major stages of network formation and structural changes during vulcanization (Shutilin, 2003).

Table 4 shows the kinetic parameters of the vulcanization process of industrial rubber compounds based on BNKS-18 AMN with carbon-mineral filler.

Table 4. Kinetics of vulcanization of rubber compounds based on BNKS-18 AMN

Filler ratio N550 / CMF, wt. parts	M_L , dH·m	t_{s2} , min	$t_{s(90)}$, min	M, dN·m
90 / 0 (industrial)	6.62	1.66	4.33	26.87
80 / 10	3.87	1.92	4.23	25.58
70 / 20	3.30	1.91	4.07	24.99
60 / 30	2.80	2.06	4.69	23.15
40 / 50	2.55	2.24	4.59	21.41
0 / 90	2.10	2.55	5.11	16.34

Notes:

1. M_L – minimum torque, dN·m;
2. t_{s2} – vulcanization start time, determined by an increase in minimum torque by 2 Nm, min;
3. $t_{c(90)}$ – optimal vulcanization time, min;
4. ΔM – difference between maximum and minimum torque, dN·m.

The analysis of the vulcanization kinetics revealed that partial substitution of N550 carbon black with CMF results in a 41.5-68.3% decrease in M_L compared to the control composition containing only carbon black. This reduction reflects the enhanced fluidity of the modified rubber mixtures (Brum et al., 2019). These findings align with the observed trends in Mooney viscosity changes, confirming the consistency of the results. Furthermore, the pronounced decrease in this parameter highlights the significant role of metal impurities present in the CMF (Table 1), which strongly affect the vulcanization kinetics (Kabulov et al., 2022).

It was found that partial replacement of N550 carbon black with CMF leads to a notable increase (up to 53.6%) in the onset time of vulcanization (t_{s2}), indicating higher resistance to sub-vulcanization. As a result, the optimal vulcanization time also rises by up to 15.3%. However, these effects are observed only at higher CMF concentrations (30-90 wt%). This behavior is likely associated with the high porosity of the CMF surface, which enhances the adsorption of vulcanizing system components. Such adsorption reduces their availability in the rubber matrix, thereby slowing down the vulcanization reaction (Dominic et al., 2019).

The analysis of the difference between the maximum and minimum torques (ΔM), which serves as an indirect measure of polymer crosslinking density (Ovcharov, 2001), showed that incorporating CMF derived from coal shale by-products into elastomeric compositions causes a reduction of up to 39.2% in this parameter compared to the industrial control formulation. This decrease suggests weaker interactions within both the «rubber-filler» and «filler-filler» systems. Such a reduction in interfacial bonding is expected to have a significant impact on the elasticity and strength of the resulting rubber materials.

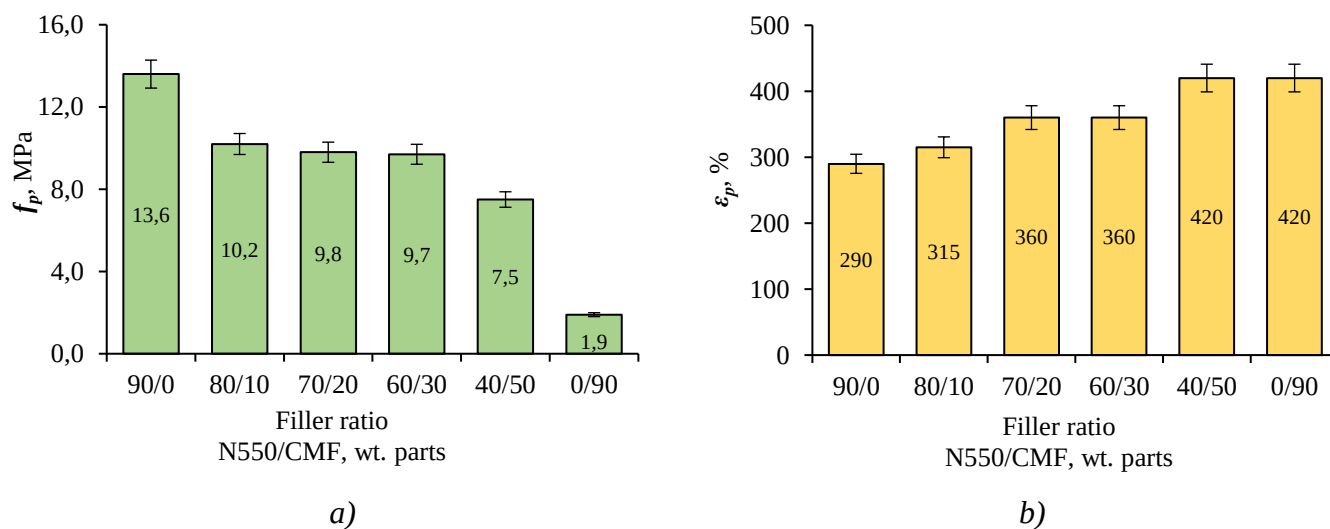
3.3 Study of the effect of CMF on the physical and mechanical properties of elastomeric compositions

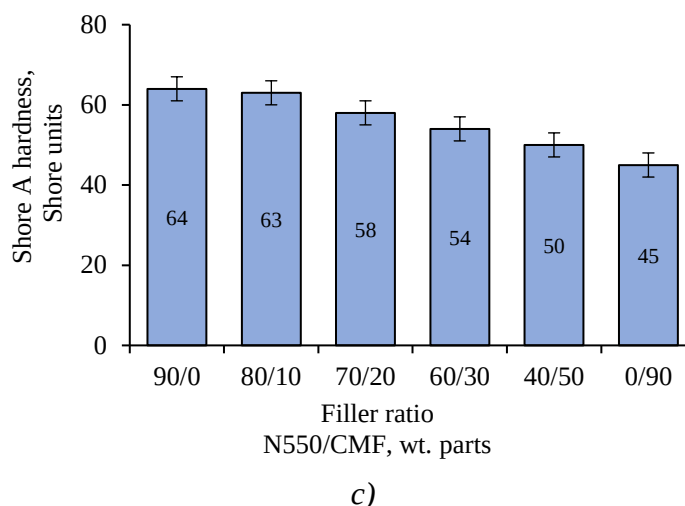
To evaluate the impact of CMF on rubber performance, the physical and mechanical properties of the vulcanizates were examined. The analysis included measuring the conditional tensile strength (f_p), elongation at break (ε_p), and Shore A hardness.

The industrial BNKS-18 AMN-based elastomeric composition is designed for the production of sealing products that must comply with the requirements of TU 2512-046-00152081-2003 (TU 2512-046-00152081-2003, 2003). According to this standard, the finished products should exhibit the following technical specifications:

- Conditional tensile strength (f_p): not less than 7.8 MPa;
- Elongation at break (ε_p): at least 150%;
- Shore A hardness: within the range of 60-85 units.

Figure 4 presents the results of testing the physical and mechanical properties of special-purpose rubber compounds in which CMF was used as a partial or complete replacement for N550 carbon black.





a) conditional tensile strength; b) relative elongation at break; c) Shore A hardness

Figure 4. Physical and mechanical characteristics of elastomeric compositions based on BNKS-18 AMN containing CMF in various dosages

It was found that partial substitution of N550 carbon black with CMF at dosages of up to 30 wt% results in a 28.7% reduction in conditional tensile strength (f_p). Despite this decrease, the strength values remain within the technical requirements for this type of rubber. However, when the CMF content exceeds 30 wt%, a sharp decline in tensile strength is observed (Figure 4a). The reduction in rubber strength in the presence of CMF can be attributed to its inert filler effect, which leads to non-uniform distribution of applied stress during tensile testing (Zhang et al., 2004; Şehriban et al., 2024). A similar trend was observed in the Shore A hardness values (Figure 4c). The hardness of the industrial composition was 64 Shore units, while formulations with CMF ranged from 63 to 45 Shore units, depending on the level of replacement. Conversely, relative elongation at break (ε_p) increased by up to 1.5 times with higher CMF dosages (Figure 4 b). This effect correlates with the observed changes in f_p and is explained by a reduction in intermolecular forces between polymer chains, which enhances their mobility and flexibility (Karaagaç, 2014). The differences in strength characteristics of CMF-containing rubbers are most likely due to a lower crosslink density of the vulcanization network combined with a decrease in reinforcing filler content. At higher filler loadings, variations in particle structure and surface energy may cause filler agglomeration or dilution effects, which further reduce strength. This behavior suggests that CMF particles are less capable of bearing and distributing stress within the polymer matrix, leading to deterioration of the rubber's mechanical properties (Arayapraneet et al., 2005).

3.4 Determination of the cross-linking density of rubbers

Rubber is produced through the vulcanization process, during which linear macromolecules of rubber are chemically cross-linked, forming a three-dimensional network structure. This transformation fundamentally alters the material's properties, giving the final product its characteristic strength and elasticity. One of the key structural parameters of amorphous network polymers is the degree of cross-linking, which directly influences their performance. The physical and mechanical properties of vulcanized rubber are closely related to both the crosslink density and the overall architecture of the vulcanization network (Kimet et al., 2020).

To describe the spatial network structure of rubbers, key parameters are used, including the crosslink density (ν) and the number of crosslinks per cubic centimeter of vulcanizate (n). These indicators provide essential information about the degree of network formation and are crucial for evaluating the performance characteristics of vulcanized rubber materials (Averko-Antonovich et al., 2002).

Table 5 presents the results of determining the spatial network indicators of the studied elastomeric compositions containing CMF in various ratios.

Table 5. Spatial network indicators of industrial rubbers

Filler ratio N550 / CMF, wt. parts	Name of indicators	
	$n \cdot 10^{-19}, \text{cm}^{-3}$	$v \cdot 10^4, \text{mol/cm}^3$
90 / 0 (industrial)	10.56 ± 0.5	1.75 ± 0.1
80 / 10	10.16 ± 0.5	1.68 ± 0.1
70 / 20	9.64 ± 0.5	1.60 ± 0.1
60 / 30	9.28 ± 0.5	1.54 ± 0.1
40 / 50	8.18 ± 0.4	1.36 ± 0.1
0 / 90	6.66 ± 0.3	1.11 ± 0.1

The analysis of the spatial network parameters of special-purpose rubber compounds in which CMF was used to replace the synthetic filler N550 demonstrated that the addition of CMF caused a reduction of up to 36.9% in the number of cross-links (n) compared to the formulation containing only carbon black. These findings are consistent with the results obtained from evaluating the vulcanization kinetics (Table 5). A less dense crosslinking network leads to increased elasticity of the vulcanizates, as it reduces the intermolecular interactions between macromolecular chain segments located between the network nodes (Zhovner et al., 2003). Moreover, due to their smaller particle size and larger specific surface area, carbon black particles facilitate a higher degree of crosslinking with the elastomer matrix compared to CMF (Savetlana et al., 2017).

3.5 Study of the effect of CMF on the relative residual compression deformation of rubbers

Modern technology heavily relies on rubber products, which are essential components in various machines and often directly influence their operational efficiency. When designing rubbers for such applications, it is crucial to consider both the operating conditions and the types of deformation the material will experience during service. Selecting the key performance indicators for rubber products is often the most challenging part of development. For non-stressed rubbers, these indicators typically include relative elongation, tensile strength, and elastic modulus. In contrast, for stressed rubbers, residual deformation becomes a critical parameter. Since the geometric dimensions of rubber products must remain nearly unchanged throughout their service life, the relative residual compression deformation (RRCD) is considered one of the most important indicators. It reflects the rubber's ability to maintain its elastic properties under continuous compression. A lower RRCD value indicates better performance and higher suitability of the rubber for long-term use (Ilyicheva et al., 2021).

Given that the BNKS-18 AMN-based compositions under study are designed for the production of sealing products, which are typically mounted in a fixed position and subjected to static compression deformation caused by the weight of the machinery and operational loads, tests were carried out to measure the RRCD of these materials (Figure 5).

Comparative analysis of the sealing performance of BNKS-18 AMN-based rubbers showed that replacing the semi-reinforcing N550 carbon black with CMF leads to a slight increase in RRCD values, by up to 5.5%, as the CMF content rises compared to the formulation with only industrial filler. This trend can be explained by the higher elasticity of the macromolecular chain segments between the network nodes in CMF-containing compositions. This enhanced flexibility facilitates the return of the polymer chains to their original conformation after compression, thereby maintaining the sealing properties of the material.

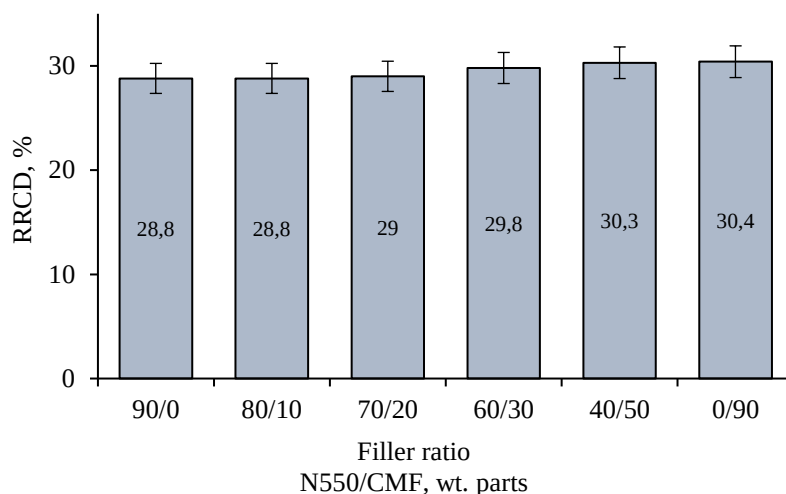


Figure 5. Dependence of the change in the relative residual compression deformation of elastomeric compositions on the filler ratio

3.6 Study of the effect of CMF on the resistance of rubbers to aggressive environments

Rubbers are widely used for sealing devices because of their high elasticity, excellent shock-absorbing capacity, and other valuable performance characteristics. Typically, these seals operate in direct contact with hydrocarbon-based working media, which can significantly alter their composition and properties over time (Fedorova et al., 2022). Considering this, it was important to investigate how different dosages of CMF affect the resistance of BNKS-18 AMN-based rubbers to aggressive liquid environments. For this purpose, tests were conducted using a 70:30 mixture of isooctane and toluene as the standard medium (Figure 6).

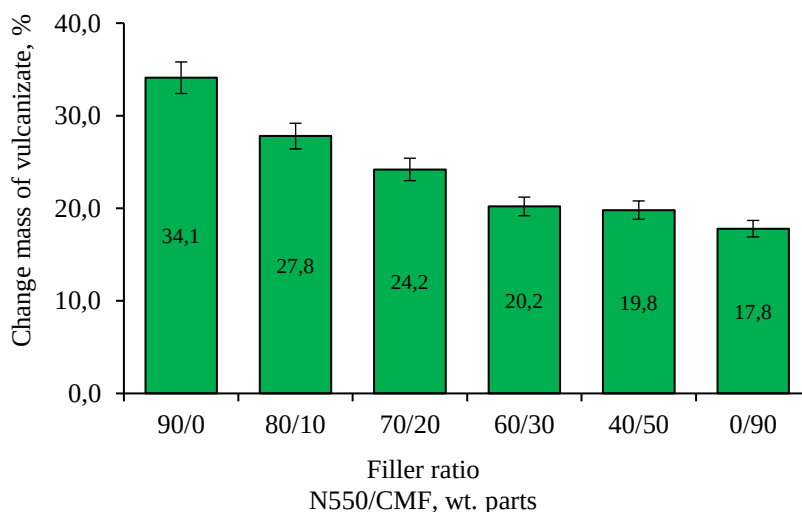


Figure 6. Dependence of the change in mass of rubbers on CMF after exposure to liquid aggressive media

The study of BNKS-18 AMN-based elastomeric compositions containing CMF demonstrated that increasing the CMF content enhances the resistance of vulcanizates to swelling in aggressive liquid media. Specifically, as the CMF dosage rises, the resistance improves by up to 1.9 times compared to the composition filled only with N550 carbon black. This behavior is likely linked to the physicochemical properties of the CMF surface. The interaction between aggressive liquids and filled rubbers largely depends on the wettability and activity of the filler, as well as the strength of the filler-rubber network it forms. Fillers are generally classified into active and inert types. Active fillers contribute to the higher strength and wear resistance of rubbers. Inert fillers, on the other hand, primarily impart special properties, such as heat resistance or enhanced chemical resistance

(Vorobyova, 1981). Given these characteristics, the improved resistance of CMF-containing rubbers is most likely due to the inert nature of CMF, which limits the penetration of aggressive media into the rubber matrix.

4. Conclusion

This study examined the effect of a natural carbon-mineral filler (CMF), derived as a by-product of coal shale mining at the Balausa deposit (Republic of Kazakhstan), on the properties of BNKS-18 AMN-based elastomeric compositions designed for the production of sealing products. The findings showed that complete replacement of N550 carbon black with CMF led to a decrease in Mooney viscosity of the rubber compounds by up to 40.5%, indicating improved processability compared to the industrial reference composition. Rheometric analysis revealed that increasing the proportion of CMF enhanced the resistance to premature sub-vulcanization, with a rise of up to 53.6%. In terms of mechanical properties, full substitution of N550 with CMF caused a reduction in conditional tensile strength by up to 86.0%, while the relative elongation at break increased by up to 1.5 times. Notably, replacing up to 10 wt% of carbon black with CMF allowed for the production of rubbers that met the required technical specifications for sealing applications. Furthermore, higher CMF loadings preserved the sealing performance (variation within 5.5%) and significantly improved the resistance to aggressive liquid media, with an increase of up to 1.9 times. Overall, these results demonstrate that carbon-mineral filler can serve as a sustainable and cost-effective alternative to conventional fillers in the rubber industry, offering environmental benefits while maintaining satisfactory performance in sealing products.

5. Supplementary Materials: No supplementary material.

6. Author Contributions

Conceptualization - V.B., A.K.; methodology - S.N., A.K.; software - V.B.; validation - A.K., V.B., S.N., A.K.; formal analysis - A.K., S.N.; investigation - V.B., S.N., A.K.; resources - A.K.; data curation - A.K., S.N.; writing-original draft preparation - A.K., V.B., S.N., A.K.; writing-review and editing - A.K., S.N.; visualization - V.B.; supervision - A.K.; project administration - S.N.; funding acquisition - S.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

7. Author Information

Bobrova, Valeryia – Researcher, Belarusian State Technological University, 13a Sverdlov St., Minsk, Belarus, 220006; email: bobrova@belstu.by, <https://orcid.org/0009-0005-7417-194X>

Nechipurenko, Sergey – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Belarusian State Technological University, 13a Sverdlov St., Minsk, Belarus, 220006; e-mail: nechipurenkos@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7463-1679>

Kasperovich, Andrei – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, Belarusian State Technological University, 13a Sverdlov St., Minsk, Belarus, 220006; email: kasp@belstu.by, <https://orcid.org/0000-0003-4403-6235>

Kaiaidarova, Aigerim – Researcher, Belarusian State Technological University, 13a Sverdlov St., Minsk, Belarus, 220006; e-mail: aigerim_ko@list.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3982-2805>

8. Funding: This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant numbers AP26101951, BR21882289, and AP26103293.

9. Acknowledgements: We would like to express our sincere gratitude to Adilet Alikulov for his valuable technical assistance, which contributed significantly to the success of this work.

10. Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the study's design, data collection, analysis, manuscript writing, or publication decisions.

11. References

1. Arayaprane, W., Na-Ranong, N., Rempel, G.L. (2005). Application of rice husk ash as fillers in the natural rubber industry. *J Appl Polym Sci* 98(1), 34-41. <https://doi.org/10.1002/app.21004>
2. Averko-Antonovich, I.Yu., Bikmullin, R.T. (2002). Methods for studying the structure and properties of polymers (Metody issledovaniya struktury i svoystv polimerov in Russian), KSTU, Kazan.
3. Balasooriya, W., Schrittester, B., Pinter, G., Schwarz, T., Conzatti, L. (2019). The Effect of the Surface Area of Carbon Black Grades on HNBR in Harsh Environments. *Polymers* 11(1), 61. <https://doi.org/10.3390/polym11010061>
4. Basak, G.K., Goswami, L., Chattopadhyay, B., Bandyopadhyay, A. (2012). Plasticizing Polystyrene with Waste Leather Bufing Dust: a Drive Towards Waste-Polymer Composite Synthesis. *Polym Polym Compos* 20(3), 279-288. <https://doi.org/10.1177/096739111202000306>
5. Beknazarov, K., Tokpayev, R., Nakyp, A., Karaseva, Y., Cherezova, E., El Fray, M., Volfson, S., Nauryzbayev, M. (2024). Influence of Kazakhstan's Shungites on the Physical-Mechanical Properties of Nitrile Butadiene Rubber Composites. *Polymers* 16(23), 3370. <https://doi.org/10.3390/polym16233370>
6. Da Rocha, E.B.D., Batista, M.R., Linhares, F.N., Da Silva, A.L.N., Delpech, M.C., De Sousa, A.M.F., Furtado, C.R.G. (2019). Cyclic uniaxial stress-strain testand rheological behavior of carbon black/metakaolin dual-fillersystem used in nitrile rubber compounds. *Polym Test* 77, 105906. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105906>
7. Dominic, M., Joseph, R., Sabura Begum, P., Kanoth, B. P., Chandra, J., Thomas, S. (2019). Green Tire Technology: Effect of Rice Husk Derived Nanocellulose (RHNC) in Replacing Carbon Black (CB) in Natural Rubber (NR) Compounding. *Carbohydr Polym* 230(41), 115620. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115620>
8. Fedorova, A.F., Davydova, M.L., Shadrinov, N.V., Borisova, A.A., Fedorov, A.L., Antoev, K.P., Khaldeeva, A.R., Pavlova, V.V. (2022). Issledovanie izmeneniya svoystv uplotnitel'nyh rezin v usloviyah vozhdeystviya uglevodorodnoj sredy i temperaturnogo rezhima. [Study of changes in the properties of sealing rubbers under the influence of a hydrocarbon environment and temperature conditions]. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики [Natural Resources of the Arctic and Subarctic]* 27(2), 316-326. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-316-326>
9. Fengge, G. (2004). Clay/polymer composites: the story. *Mater Today* 11, 50-55. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(04\)00509-7](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(04)00509-7)
10. Fernandes, M.R.S., Sousa, A.M.F. de, Furtado, C.R.G. (2017). Rice husk ash as filler in tread compounds to improve rolling resistance. *Polimeros* 27(1), 55-61. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2385>
11. Garishin, O.K., Shadrin, V., Beliaev, A., Kornev, Yu.V. (2018). Micro and nanoshungites – Perspective mineral fillers for rubber composites used in the tires. *Mater Phys Mech* 40(1), 56-62. https://doi.org/10.18720/MPM.4012018_7
12. Garishin, O.K., Svistkov, A.L., Gerasin, V.A. (2018). Simulation of the elastic-plastic behavior of polyolefin-based nanocomposites with a different structure of layered filler. *Polym Sci Ser A* 51, 407-415. <https://doi.org/10.1134/S0965545X09040063>
13. GOST 12535-84. (1985). Rubber compounds. Method for determining vulcanization characteristics on a vulcanometer (Smesi rezinovye. Metod opredeleniya vulkanizacionnykh harakteristik na vulkametre in Russian), Standards Publishing House, Moscow.
14. GOST 263-75. (1989). Method for determining Shore A hardness (Metod opredeleniya tverdosti po Shoru A in Russian), Standards Publishing House, Moscow.
15. GOST 269-66. (1993). Rubbers. Methods for testing resistance to liquid aggressive media in an unstressed state (Rezina. Obshchie trebovaniya k provedeniyu fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy in Russian), Standards Publishing House, Moscow.

16. GOST 270-75. (1975). Rubber. Method for determining elasticity and strength properties under tension (Rezina. Metod opredeleniya uprugoprochnostnykh svoystv pri rastyazhenii in Russian), Standards Publishing House, Moscow.
17. GOST 9.029-74. (1982). Methods for testing resistance to aging under static compression deformation (Metody ispytaniy na stojkost' k starenuyu pri staticheskoy deformatsii szhatiya in Russian), Standards Publishing House, Moscow.
18. GOST 9.030-74. (2006). Rubbers. Methods for testing resistance to liquid aggressive media in an unstressed state (Reziny. Metody ispytaniy na stojkost' v nenapryazhennom sostoyanii k vozdeystviyu zhidkikh agressivnykh sred in Russian), Standardinform, Moscow.
19. GOST R 54556-2011. (2013). Butadiene-nitrile rubbers (Kauchuki butadien-nitril'nye in Russian), Standardinform, Moscow.
20. GOST P 54552-2011. (2013). Rubbers and rubber compounds. Determination of viscosity, stress relaxation, and subvulcanization characteristics using a Mooney viscometer (Kauchuki i rezinovyie smesi. Opredelenie vyazkosti, relaksatsii napryazheniya i harakteristik podvulkanizatsii s ispol'zovaniem viskozimetra Muni in Russian), Standardinform, Moscow.
21. Ignatov, I., Mosin, O. (2014). Explanation for the Mpemba Effect. *Nanotechnol Res Pract* 3, 141-158.
22. Ilyicheva, T.M., Eremin, E.N. (2021). Effect of the acrylonitrile content in nitrile-butadiene rubber on the relative residual deformation of vulcanizate. *J Phys Conf Ser* 1901(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012088>
23. Jurkiewicz, K., Pawlyta, M., Burian, A. (2018). Structure of Carbon Materials Explored by Local Transmission Electron Microscopy and Global Powder Diffraction Probes. *C* 4(4), 68. <https://doi.org/10.3390/c4040068>
24. Kabulov, A.T., Beknazarov, K.I., Tokpayev, R.R., Atchabarova, A.A., Bulybaev, M.E., Khassanov, D.A., Kubasheva, D.B., Slyambayeva, A.K., Kishibayev, K.K., Nauryzbayev, M.K. (2022). Production of Dry Building Mixes Using Waste of the Mining and Metallurgical Complex of Kazakhstan. *Int J Biol Chem* 15, 83-90. <https://doi.org/10.26577/ijbch.2022.v15.i2.011>
25. Karaagaç B. (2014). Use of ground pistachio shell as alternative filler in natural rubber/styrene-butadiene rubber-based rubber compound. *Polym Compos* 35(2), 245-252. <https://doi.org/10.1002/pc.22656>
26. Kim, D.Y., Park, J.W., Lee, D.Y., Seo, K.H. (2020). Correlation between the Crosslink Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber Compound via Accelerators and Reinforcement. *Polymers* 12(9), 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12092020>
27. Lua, Y., Liua, J., Houa, G., Mac, J., Wang, W., Weid, F., Zhang, L. (2016). Thermal degradation and flame retarding characteristics of polypropylene composites incorporated with boron mud. *Compos Sci Technol* 137, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.06.002>
28. Ovcharov, V.V. (2001). Properties of rubber compounds and rubbers: evaluation, regulation, stabilization (Svoystva rezinovykh smesey i rezin: ocenka, regulirovanie, stabilizatsiya in Russian). Published by SANT-TM, Moscow.
29. Rooj, S., Das, A., Morozov, I.A., Stöckelhuber, K.W., Stoczek, R., Heinrich, G. (2013). Reinforcement of Solution Styrene Butadiene Rubber by Silane Functionalized Halloysite Nanotubes. *J Macromol Sci A Pure Appl Chem* 50, 1091-1106. <https://doi.org/10.1080/10601325.2013.829349>
30. Rooj, S., Das, A., Stöckelhuber, K.W., Mukhopadhyay, N., Bhattacharyya, A.R., Jehnichen, D. (2012). Pre-intercalation of long chain fatty acid in the interlayer space of layered silicates and preparation of montmorillonite/natural rubber nanocomposites. *Appl Clay Sci* 68, 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.03.005>
31. Rooj, S., Das, A., Stöckelhuber, K.W., Reuter, U., Heinrich, G. (2012). Highly Exfoliated Natural Rubber/Clay Composites by “Propping-Open Procedure”: The Influence of Fatty-Acid Chain

- Length on Exfoliation. *Macromol Mater Eng* 297(4), 369-383.
<https://doi.org/10.1002/mame.201100185>
32. Savetlana, S.; Zuhendri; Sukmana, I.; Saputra, F.A. (2017). The effect of carbon black loading and structure on tensile property of natural rubber composite. *IOP Conf Ser Mater Sci. Eng* 223, 12009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/223/1/012009>
33. Şehriban, Ö., Ünüğü, T., Abacı, U., Karaagac, B. (2024). Coffee grounds as sustainable filler for bio-based rubber composites. *Polym Compos* 45(14), 12611-12623.
<https://doi.org/10.1002/pc.28654>
34. Shakun, A., Vuorinen, J., Hoikanen, N.M., Poikelispaa, M., Das, A. (2014). Hard nanodiamonds in soft rubbers: Past, present and future. *Compos A Appl Sci Manuf* 64, 49-69.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.014>
35. Shutilin, Yu.F. (2003). Reference guide on the properties and application of elastomers: monograph (Spravochnoe posobie po svoystvam i primeneniyu elastomerov: monografiya in Russian), Voronezh State Technological Academy, Voronezh.
36. Tang, Q., Wang, F., Liu, X., Tang, M., Zeng, Z., Liang, Z., Guan, X., Wang, J., Mu X. (2016). Surface modified palygorskite nanofibers and their applications as reinforcement phase in cis-polybutadiene rubber nanocomposites. *Appl Clay Sci* 133, 175-181.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.06.003>
37. Theng, B.K.G. (2012). Formation and Properties of Clay-Polymer Complexes. *Dev Clay Sci* 4, 153-162.
38. TU 2512-046-00152081-2003. (2003). Unvulcanized commercial rubber compounds. Technical conditions (Smesi rezinovyh ne vulkanizovannykh tovarnykh. Tekhnicheskie usloviya in Russian), Standards Publishing House, Moscow.
39. Valera-Zaragoza, M., Yescas-Yescas, A., Jurez-Arrelano, E.A., Aguirre-Cruz, A., Aparicio-Saguilan, A., Ramirez-Vargas, E., Sanchez-Valdes, S., Sepulveda-Guzman, S. (2014). Immobilization of TiO₂ nanoparticles on montmorillonite clay and its effect on the morphology of natural rubber nanocomposites. *Polym Bull* 71(6), 1295-1313.
<https://doi.org/10.1007/s00289-014-1123-4>
40. Vorobyova, G.Ya. (1981). Chemical resistance of polymer materials (Himicheskaya stojkost' polimernykh materialov in Russian), Chemistry, Moscow.
41. Xie, W., Gao, Z., Liu, K., Pan, W.-P., Vaia, R., Hunter, D., Singh, A. (2001). Thermal characterization of organically modified montmorillonite. *Thermochim Acta* 367, 339-350.
[https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(00\)00690-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(00)00690-0)
42. Zhang, Q., Liu, Q., Zhang, Y., Cheng, H., Lu, Y. (2012). Formation and properties of clay-polymer complexes. *Appl Clay Sci* 65, 134-142.
43. Zhang, S.W., Liu H., He, R. (2004). Mechanisms of wear of steel by natural rubber in water medium. *Wear* 256(3-4), 226-232. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00416-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00416-2)
44. Zhovner, N.A., Chirkova, N.V., Khlebov, G.A. (2003). Structure and Properties of Elastomer-Based Materials: Textbook (Struktura i svoystva materialov na osnove elastomerov: uchebnoe posobie in Russian), VyatSU, Kirov.
45. Zoromba, M.S., Bassyouni, M., Abdel-Hamid, S.M.-S. (2015). Effect of modified kaolinite by using fatty acids on nr- and sbr-reinforced composites. *Rubber Chem Technol* 88(3), 449-462.
<https://doi.org/10.5254/rct.15.84910>

Эластомерлік композицияларда көміртекті тақтатас өндірудің жанама өнімдеріне негізделген көміртекті минералды толтырғышты қолдану

Валерия Боброва, Сергей Нечипуренко, Андрей Касперович, Айгерим Кайайдарова

Аңдатпа. Биологиялық және жаңартылатын ресурстарды термопластар мен резеңкеде толтырғыш немесе жаңа компоненттер ретінде пайдалану олардың мұнай мен табиғи газдан алынған толтырғыштардың қоршаған ортаға әсерін азайту қабілетінің арқасында назар аудартады. Бұл зерттеу көміртекті тақтатастарды қайта өңдеудің жанама өнімдерінен алынған көміртекті минералды толтырғышты тығыздағыш материалдарға арналған резеңке композициялардағы стандартты өнеркәсіптік толтырғыштарды ішінара немесе толық ауыстыру ретінде пайдалануды қарастырады. N550 жартылай армирленген күйені алмастыратын көміртек-минералды толтырғыштың арақатынасымен ерекшеленетін және тұтқыр серпімді, кинетикалық, физикалық-механикалық, құрылымдық және пайдалану қасиеттеріне бағаланған алты резеңке композиция жасалды. Көміртекті көміртекті-минералды толтырғышпен толық ауыстыру технологиялық өнімділікті жақсартты, Муни тұтқырлығын 40,5%-ға төмендетті және мерзімінен бұрын вулканизацияға төзімділікті 53,6%-ға арттырды. 10 мас.% дейін ауыстырған кезде N550 материалдар қажетті беріктік пен қаттылықты сақтады. Сонымен қатар, каучуктердің иілгіштігі толтырғыштың мөлшері жоғары болған кезде шамамен 1,5 есе өсті. Толтырғыштың мөлшері артқан кезде де тығыздау тұрақты болып қалды, ал қатты сұйық ортаға төзімділік екі есеге жуық өсті (1,9 есеге дейін). Бұл нәтижелер көміртекті-минералды толтырғыш кәдімгі толтырғыштарға тәуелділікті азайта отырып, резеңке тығыздағыштардың қызмет ету мерзімін ұзарта алатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: көміртек-минералды толтырғыш, өнеркәсіптік эластомерлік композициялар, Муни бойынша тұтқырлық, салыстырмалы қалдық қысу деформациясы

Применение углерод-минерального наполнителя на основе побочных продуктов добычи углистых сланцев в эластомерных композициях

Валерия Боброва, Сергей Нечипуренко, Андрей Касперович, Айгерим Кайайдарова

Аннотация: Использование биологических и возобновляемых ресурсов в качестве наполнителей или новых компонентов в термопластах и каучуках привлекло к себе внимание благодаря их потенциальной способности снижать воздействие на окружающую среду наполнителей, получаемых из нефти и природного газа. В этом исследовании изучалось использование углерод-минерального наполнителя, получаемого из побочных продуктов переработки каменноугольных сланцев, в качестве частичной или полной замены стандартных промышленных наполнителей в резиновых композициях для уплотнительных материалов. Было изготовлено шесть резиновых композиций, отличающихся соотношением углерод-минерального наполнителя, заменяющего полуармирующую сажу N550, и которые были оценены на вязкоупругие, кинетические, физико-механические, структурные и эксплуатационные свойства. Полная замена технического углерода углеродно-минеральным наполнителем улучшила технологические характеристики, снизив вязкость по Муни на 40,5% и повысив устойчивость к преждевременной вулканизации на 53,6%. При замене до 10 мас.% N550 материалы сохраняли требуемую прочность и твердость. Кроме того, эластичность каучуков увеличилась почти в 1,5 раза при более высоком содержании наполнителя. Даже при повышенном количестве наполнителя герметичность оставалась стабильной, а стойкость к агрессивным жидким средам почти удвоилась (до 1,9 раза). Эти результаты свидетельствуют о том, что углеродно-минеральный наполнитель может продлить срок службы резиновых уплотнительных изделий, снижая при этом зависимость от обычных наполнителей.

Ключевые слова: углерод-минеральный наполнитель, промышленные эластомерные композиции, вязкость по Муни, относительная остаточная деформация сжатия

Design and industrial verification of the catalytic reforming process

Rizagul Dyussova^{1*}, Gaini Seitenova², Moldir Borashova³, Yekaterina Zhakmanova⁴, Yakobs Sergeyevs¹

¹Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan; dyussova_rm@enu.kz; Ya.sergeyevs@pnhz.kz

²The Association of Producers and Consumers of Petrochemical Products (Petrochemical Association), Astana, Kazakhstan; seitenova_gzh@enu.kz

³Atyrau Oil and Gas University, Atyrau, Kazakhstan; borasheva_23@aogu.edu.kz

⁴L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; 980815450705@enu.kz

*Correspondence: dyussova_rm@enu.kz

Citation: Dyussova, R., Seitenova, G., Borashova, M., Zhakmanova, Ye., Sergeyevs, Ya. (2025). Design and industrial verification of the catalytic reforming process. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, 152(3), 74-89. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-74-89>

Academic Editor:
E.Ye. Kopsishev

Received: 28.08.2025
Revised: 15.09.2025
Accepted: 15.09.2025
Published: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Abstract: Catalytic reforming with continuous catalyst regeneration (CCR) is one of the key processes in the production of high-octane gasolines. The need to improve its energy and resource efficiency while complying with modern environmental standards remains a relevant and pressing issue. Particularly challenging is the development of accurate mathematical models of this process under industrial operating conditions, considering catalyst degradation, fluctuations in feedstock composition, and significant thermal effects. The purpose of the article is to develop and calibrate a mathematical model of the CCR reforming process using Aspen Hysys, demonstrated through a case study of the Atyrau Refinery. The research methodology includes the collection of operational data (feedstock composition, reactor parameters, catalyst properties), construction of a detailed process flowsheet, thermodynamic modeling, and calculation of material and energy balances. The developed model was calibrated using actual industrial data and tested for reproducibility and predictive accuracy. The results confirm that the proposed model reliably predicts reformat yield and octane number, as well as identifies optimal process parameters under variable production conditions. The article emphasizes the technological advantages of CCR reforming, including high process stability, extended catalyst service life, and improved energy efficiency. The practical significance of the research lies in the possibility of applying the developed model to optimize the operation of existing CCR units and for the training of engineering personnel. The proposed approach can also be adapted for other refineries with similar technological configurations.

Keywords: catalytic reforming, continuous catalyst regeneration, Aspen Hysys, mathematical modeling, process optimization, high-octane gasoline.

1. Introduction

The current level of development of world economic systems is accompanied using oil refining and petrochemical products everywhere. The international petroleum products market is among the most investment-intensive sectors of global trade. Over a hundred countries are involved in producing refined petroleum, regardless of whether they possess their own hydrocarbon reserves. In some states, petroleum products are primarily manufactured for export, whereas in Southeast Asia and the Pacific region the focus remains on satisfying domestic demand (Ivanchina et al., 2021; Ivashkina et al., 2023). Given the unique performance characteristics and relatively low cost of petroleum-based products, the oil refining and petrochemical industries are expected to retain their strategic importance for the foreseeable future (Muhammad Nadeem Khalid, 2023). Currently, three oil refineries operate in Kazakhstan (Atyrau, Pavlodar, Shymkent). The total capacity of the three main oil refineries in Kazakhstan for oil refining as of 2024 is 16.7 million tons per year (Annual Report, 2024).

The catalytic reforming process is the basic process to produce high-octane components of motor gasoline and aromatic hydrocarbons for most oil refineries in Kazakhstan. However, modern environmental requirements increasingly limit the content of aromatic hydrocarbons in gasoline and force oil refineries to introduce new processes that provide the necessary octane characteristics. At the same time, it is impossible to completely abandon the production of reformate. At present, this is the cheapest and most traditional way of upgrading the straight-run gasoline fraction of 85–180°C. In addition, for many enterprises, this is the only way to produce hydrogen, which is increasingly required with the constant growth of capacities for hydrodesulfurization of gasoline and diesel fuels (Lopes et al., 2020; Orazbayev et al., 2021).

The method of mathematical modeling is the most cost-effective in terms of economic costs and efficiency. In the work (Ivashkina et al., 2023), engineering models of oil refining are considered as a method for increasing the efficiency of multi-stage gasoline production. The application of engineering mathematical models in oil refining makes it possible to optimize the composition of commercial gasolines by reducing the reliance on costly additives. This is achieved through a more rational use of reformate and catalytic cracking gasoline in fuel blending, which can lower production costs by approximately 0.1–1.0%. With such models, it becomes feasible to predict the composition of gasolines with required properties based on known parameters of the components, including octane number, yield, and the content of aromatics, benzene, olefins, and sulfur. The performance of the final fuel depends not only on the quality of each component, but also on the characteristics of the mixture, which are influenced by hydrocarbon interactions during catalytic processes (reforming, isomerization, catalytic cracking, hydrocracking) as well as during compounding. By accounting for changes in feedstock composition, engineering models enable the calculation of gasoline blends that meet modern environmental requirements while simultaneously lowering production costs through reduced use of expensive streams and minimizing excess margins in key quality indicators such as octane number, sulfur content, and aromatic hydrocarbons.

The study (Ivanchina et al., 2021) presents an approach to optimizing the SRR catalytic reforming process. The approach is based on the use of a mathematical model. The model considers the activity of the catalyst, the instability of its operation, and changes in the hydrocarbon composition of the feedstock. The model allows monitoring the production process and finding the optimal operating mode, which is determined by the conditions of equilibrium of the coke formation reactions and hydrogenation of intermediate pressing products. Using a mathematical model, it is possible to improve the technical indicators of the production process, such as the yield and octane number of the product. In addition, mathematical modeling allows assessing the efficiency of the catalyst and can help decide on replacing it with a new one. According to the research of (Orazbayev et al., 2022), an efficient methodology was proposed for building a system of interconnected process unit models based on diverse sources of data, including fuzzy information. This approach enabled the creation of hybrid models capable of predicting both the yield of catalyzate and its quality parameters. Furthermore, a scheme was developed to integrate the

models of the main units of a catalytic reforming plant into a unified modeling framework. The resulting system provides a comprehensive tool for simulating plant operations, enhancing production efficiency by increasing the output of target products and improving their quality characteristics.

Modern research in the field of catalytic reforming and modeling of oil refining processes demonstrates a steady interest in the development of new catalysts and digital optimization tools. Thus, significant progress has been made in the field of catalyst technologies for producing high-octane gasoline (Gupta & Gupta, 2022; Jarullah et al., 2023; Velázquez et al., 2023; Wei et al., 2008), including approaches to prolonging service life and improving regeneration methods. It was shown in (Boukezoula et al., 2022; Ma et al., 2024; Mokheimer et al., 2024; Pasandide & Rahmani, 2021; Wu et al., 2025; Yang et al., 2022) that the introduction of improved mathematical models and hybrid optimization algorithms can reduce energy costs, reduce coking, and improve the accuracy of forecasting process parameters. At the same time, the direction of integrating machine learning with process modeling is developing (Garma et al., 2024; Moon et al., 2025; Naderi et al., 2025; Samad et al., 2023), which opens new prospects for creating intelligent control and forecasting systems in conditions of uncertainty. These results validate the significance of employing Aspen HYSYS in combination with the adaptation of models to real industrial data, while also underscoring the potential of integrating conventional modeling techniques with advanced digital technologies.

The purpose of this paper is to analyze and critically assess existing mathematical models of the catalytic reforming process with continuous catalyst regeneration, to identify their inherent limitations, and to highlight approaches that improve process efficiency, selectivity, and catalyst performance through advanced simulation and modeling strategies.

2. Materials and methods

The object of the study is the catalytic reforming unit with continuous catalyst regeneration with a benzene extraction unit of Atyrau Oil Refinery LLP (ANPZ). The licensor of the processes and the developer of the basic design package is Axens (France). The working design, supply of equipment and construction of the complex were performed by Sinopec Engineering Co. Ltd (Group). The year of commissioning of the complex is 2014 (Seitenova G.Zh., Dyussova R.M., et al., 2023).

The catalytic reforming unit with continuous catalyst regeneration with a benzene extraction unit consists of the following sections:

- section 100 – catalytic reforming, for obtaining high-octane components of gasoline (or raw materials for the future aromatics complex) and raw materials of section 300;
- section 200 – continuous regeneration of the catalytic reforming catalyst;
- section 300 – extractive distillation of Morphylane, for obtaining a benzene-toluene fraction;
- section 400 – separation (rectification) of the benzene-toluene fraction, obtaining benzene and toluene; - section 500 - auxiliary section (Zainullin et al., 2020).

The feedstock for the catalytic reforming unit consists of a mixture of stabilized heavy naphtha, obtained from the gasoline hydrotreating and fractionation unit, as well as from the naphtha hydrotreating unit. The processing capacity of the catalytic reforming unit (section 100) is 1,000 tons per year, determined by the volume of feedstock available at the plant. The nominal capacity of section 300, dedicated to extractive distillation using the Morphylane process, is 417 tons per year, while section 400, responsible for separating the benzene–toluene fraction to produce commercial benzene, has a capacity of 133 tons per year. The operational flexibility of the complex allows for throughput fluctuations in the range of 50–100%, which defines the selection of process equipment and automated control systems to ensure stable operation within the specified limits. The total number of operating hours amounts to 7,920 annually.

Reforming reactions take place in reactors with a moving catalyst bed, from which the

catalyst is removed for regeneration and returned to the reactors again. The circulation and regeneration of the catalyst is carried out on a continuous basis with fully automated control of all operations. To facilitate chemical reactions that contribute to an increase in octane number, elevated temperatures of approximately 500 °C are required, which necessitates preheating of the feedstock. Moreover, several key reactions are highly endothermic and consume significant amounts of heat. As a result, the catalyst bed is distributed across multiple reactors, with inter-reactor furnaces installed to compensate for heat losses and maintain the required reaction conditions (Orazbayev et al., 2021).

As we know, high efficiency of the reforming process mainly occurs with a combination of high temperature and low operating pressure. These parameters lead to a short operating life of the catalyst in traditional fixed-bed reactors. Therefore, the advantage of this reforming unit compared to traditional units is the continuous regeneration of the catalyst. The main research method is mathematical modeling of the catalytic reforming unit using the Aspen Hysys model developed by Aspen Tech (Rekoske et al., 2017; Sapre & Katzer, 2020; Smith et al., 2022).

3. Results

The catalytic reformer model was created using the Distributed Control System (DCS) diagrams, process and instrumentation diagrams, column and reactor specifications, catalyst loading, laboratory analysis data, hourly average unit data, and daily material balances.

Modeling steps:

1. Data collection

2. Review and analysis of the obtained data:

- Structuring, grouping, and validation;

- Application of standard methodology for concluding;

- It is essential that it is applied by process experts and, with good engineering judgment (a thorough understanding of the process and data quality);

- The accepted conclusions can be revised at;

- Optimizer task (automatic calibration tool);

- Verification of results.

3. Entering reactor data

4. Calibrating the reformer reactor (Calibration Environment)

5. Within the Simulation Environment:

- Building the rest of the scheme;

- Performing simulation runs to assess the reliability of reactor predictions;

- Setting up a Case Study (e.g. to generate linear programming data).

The HYSYS model consists of three sections:

1. Plant data analysis (red rectangle in Figure 1).

2. Linear programming (green rectangle in Figure 1).

3. Reactor, furnaces, fractionation columns and hydrogen recycle loop with blowdown.

Refinery System (RefSYS) reactors are operational models, meaning they are not very sensitive to reactor designs and catalyst compositions. Essentially, the model theory is distorted to match the actual data (Figure 2). This is done in the Calibration Environment and using the measured Net Product (Measurement) as the target.

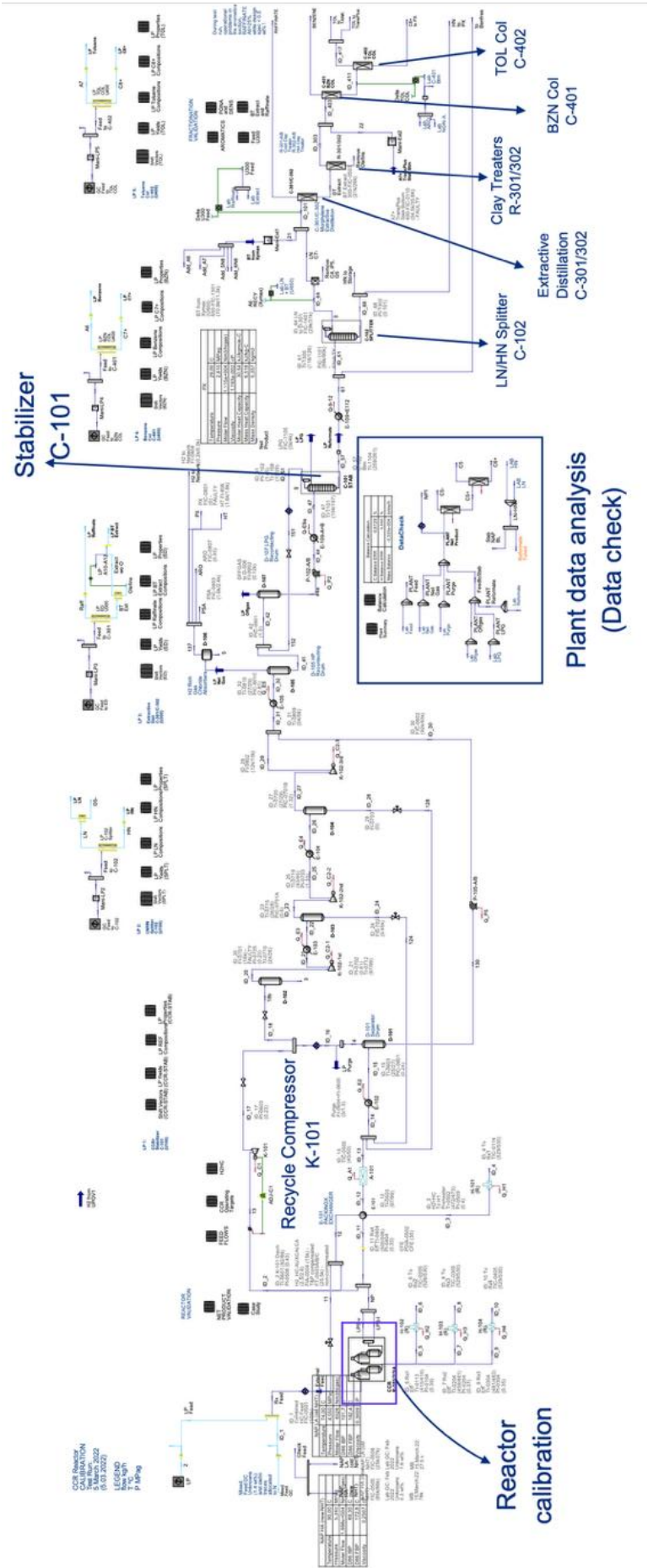


Figure 1. The catalytic reformer process flow diagram

Design	Feed Data	Reactor Section	Stabilizer Tower	Results
Results				
Summary			External Feed	Internal Feed 15.0
Feed Blend				Blend
Product Yields				
Product Properties				
Reactors				
Heaters				
Product Streams				
	Mass Flow [tonne/h]		105.5	0.0000
	Volume Flow Rate [m3/h]		141.3	0.0000
	Std. Vol Flow [m3/h]		139.8	0.0000
	Molar Flow [Nm3/h(gas)]		2.167e+004	0.0000
	Molecular Weight		109.1	113.4
	Specific Gravity (60F/60F)		0.7475	0.7538
	API Gravity		57.79	56.20
	Composition, Mol Frac			
	H2		0.0000	0.0000
	P1		0.0000	0.0000
	P2		0.0000	0.0000
	OL2		0.0000	0.0000
	P3		0.0000	0.0000
	O3		0.0000	0.0000
	IP4		0.0000	0.0000
	NP4		0.0000	0.0000
	P4		0.0000	0.0000
	O4		0.0000	0.0000
	IP5		0.0000	0.0000
	NP5		0.0000	0.0000
	P5		0.0000	0.0000
	O5		0.0000	0.0000
	5N5		0.0000	0.0000
	22DMC4		0.0000	0.0000
	23DMC4		2.531e-004	0.0000
	MBP6		0.0000	0.0000
	2MCS		0.0000	1.740e-005
	3MCS		5.443e-003	3.697e-005
	SBP6		0.0000	0.0000
	NP6		3.797e-002	2.766e-004
	O6		0.0000	0.0000
	5N6		2.463e-002	6.322e-004
	A6		3.770e-003	2.347e-004
	6N6		2.035e-002	5.030e-003
	22DMC5		1.524e-003	2.321e-004
	23DMC5		1.742e-002	1.216e-002
	24DMC5		8.708e-003	1.168e-003

Figure 2. Dialog box «Measured net product»

The reforming model uses a fixed set of components suitable for the reforming process. This set is based on the standard list of components of the gasoline reformer REFSRK.

Aspen reforming components are grouped based on carbon number (Table 1).

Table 1. Components grouped

№	Components in program	Reforming components
1	MBP	Highly branched iso-paraffins
2	SBP	Single side chain iso-paraffins
3	5N	5-carbon (cyclopentane) naphthenes
4	6N	6-carbon (cyclohexane) naphthenes
5	N	Grouped 5- and 6-carbon naphthenes
6	NP	Normal paraffins
7	P	Grouped iso- and normal paraffins
8	O	Olefins
9	A	Aromatics

Depending on the carbon number, the component will either be a pure component (e.g. nP₄)

or a group of pure components with a similar structure (e.g. MBP7). All A8 isomers are presented as pure components.

Additional pure components for C₆ and C₇ are added so that individual iso-paraffins can be accounted for in the fractionation section that processes the product from the reactor block.

The full list of components processed by the reforming unit is given in Table 2.

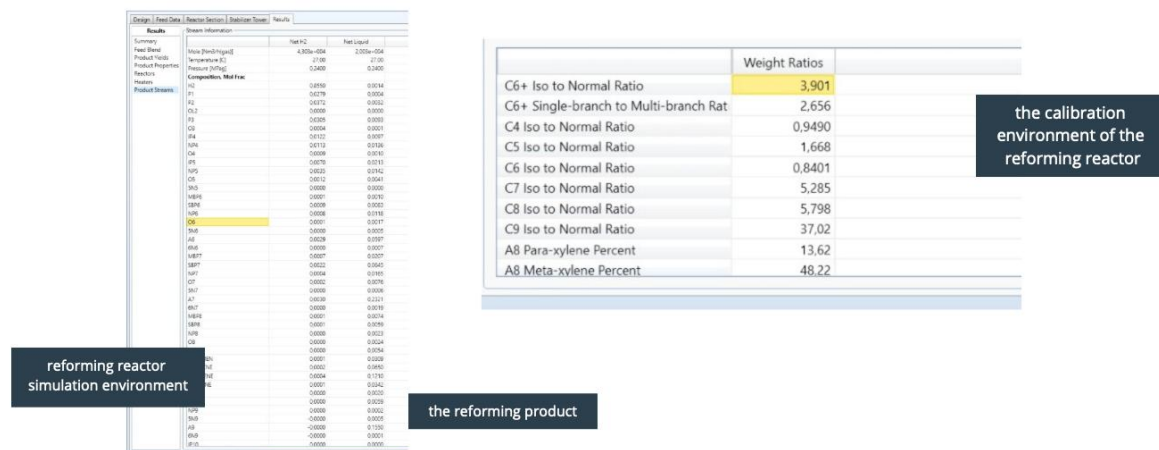


Figure 3. Isomer ratios

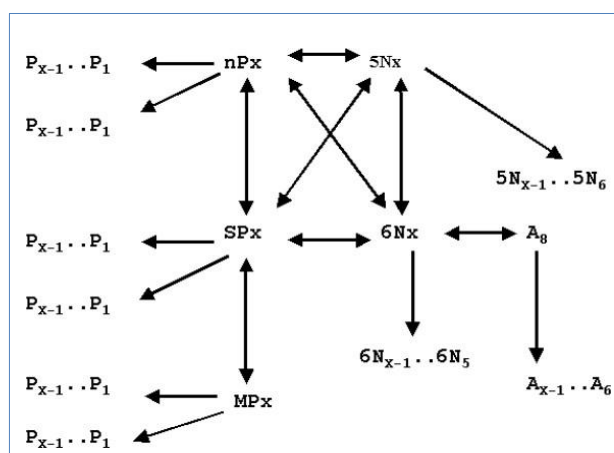


Figure 4. Reforming reaction routes

Table 2. List of components processed by the reforming unit

№	Formula	Hysys Components	№	Formula	Hysys Components
1	H ₂	Hydrogen	39	5N ₇	Branched 7 carbon cyclopentanes
2	P ₁	Methane	40	A ₇	Toluene
3	P ₂	Ethane	41	6N ₇	Methylcyclohexane
4	OL ₂	Ethylene (C ₂ H ₄)	42	MBP ₈	Multi-branch 8 carbon paraffins
5	P ₃	Propane	43	SBP ₈	Single-branch 8 carbon paraffins
6	O ₃	Propylene (C ₃ H ₆)	44	O ₈	Octenes (C ₈ H ₁₆)
7	IP ₄	Isobutane	45	NP ₈	n-Octane
8	NP ₄	n-Butane	46	5N ₈	Branched 8 carbon cyclopentanes
9	P ₄	Total butanes	47	ETHYLBEN	Ethyl-benzene
10	O ₄	Butylenes (C ₄ H ₈)	48	O-XYLENE	1,2-dimethylbenzene

11	IP ₅	Isopentane	49	M-XYLENE	1,3-dimethylbenzene
12	NP ₅	n-Pentane	50	P-XYLENE	1,4-dimethylbenzene
13	P ₅	Total pentanes	51	A ₈	8 Carbon aromatics
14	O ₅	Pentylenes (C ₅ H ₈)	52	6N ₈	8 Carbon cyclohexanes
15	5N ₅	Cyclopentane	53	IP ₉	9 Carbon isoparaffins
16	22DMC ₄	22-Dimethylbutane	54	NP ₉	9 Carbon normal paraffins
17	23DMC ₄	23-Dimethylbutane	55	5N ₉	9 Carbon cyclopentanes
18	MBP ₆	Multi-branch butanes	56	A ₉	9 Carbon aromatics
19	2MC ₅	2-Methylpentane	57	6N ₉	9 Carbon cyclohexanes
20	3MC ₅	3-Methylpentane	58	IP ₁₀	10 Carbon isoparaffins
21	SBP ₆	Single-branch pentanes	59	NP ₁₀	10 Carbon normal paraffins
22	NP ₆	n-Hexane	60	5N ₁₀	10 Carbon cyclopentanes
23	O ₆	Hexenes (C ₆ H ₁₂)	61	A ₁₀	10 Carbon aromatics
24	5N ₆	Methylcyclopentane	62	6N ₁₀	10 Carbon cyclohexanes
25	A ₆	Benzene	63	IP ₁₁	11 Carbon isoparaffins
26	6N ₆	Cyclohexane	64	NP ₁₁	11 Carbon normal paraffins
27	22DMC ₅	22-Dimethylpentane	65	5N ₁₁	11 Carbon cyclopentanes
28	23DMC ₅	23-Dimethylpentane	66	A ₁₁	11 Carbon aromatics
29	24DMC ₅	24-Dimethylpentane	67	6N ₁₁	11 Carbon cyclohexanes
30	MBP ₇	Multi-branch 7 carbon paraffins	68	P ₁₂	12 Carbon paraffins
31	2MC ₆	2-Methylhexane	69	N ₁₂	12 Carbon naphthenes
32	3MC ₆	3-Methylhexane	70	A ₁₂	12 Carbon aromatics
33	3EC ₅	3-Ethylpentane	71	P ₁₃	13 Carbon paraffins
34	SBP ₇	Single-branch 7 carbon paraffins	72	N ₁₃	13 Carbon naphthenes
35	NP ₇	n-Heptane	73	A ₁₃	13 Carbon aromatics
36	O ₇	Heptene (C ₇ H ₁₄)	74	P ₁₄	14 Carbon paraffins
37	DMCP	Dimethylcyclopentane	75	N ₁₄	14 Carbon naphthenes
38	ECP	Ethylcyclopentane	76	A ₁₄	14 Carbon aromatics

The detailed kinetic scheme includes 50 kinetic groups that are linked by a network of 112 reactions. The reaction routes used for C₆-C₈ are shown in the following diagram. As the carbon number increases above 8, the complexity of the pathways decreases.

Coke formation in a reformer is modeled by reacting paraffins, C₅ cyclic naphthenes, and aromatics in a first-order reaction mechanism. All C₅ cyclic naphthenes have a common activation energy, as do the aromatics and paraffins. The frequency coefficients vary with carbon amount and type.

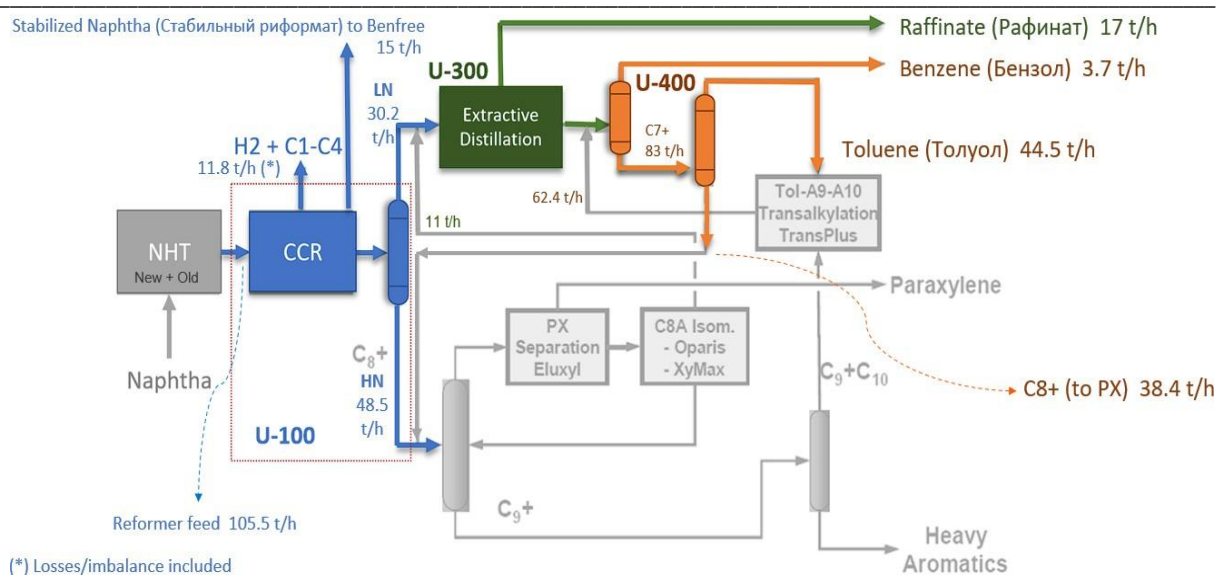


Figure 5. Model boundaries

Figure 5 shows the simulation boundaries of the three units implemented in the HYSYS reforming model: U-100 (blue), U-300 (green) and U-400 (orange). A portion of the stabilized reformate is sent to Benfree (15 t/h), and two external feed streams (62.4 t/h with Trans Plus and 11 t/h with XyMax) contribute to the final products. The reforming unit (U-100) includes the following units:

1. Reactor (R-101/2/3/4)
2. Stabilization (C-101)
3. Reformate separation (C-102)

The purpose of U-100 is to obtain a reformate fraction rich in aromatic compounds with a high octane number, along with high-purity hydrogen, LPG and a light reformate fraction rich in toluene (A₇).

The reformer catalyst regeneration loop (U-200) and the water-chloride balance are not included in the model. The HYSYS reactor model assumes that operators will control the catalyst chlorination according to the catalyst supplier's specifications. The activity of the chlorinated catalyst is determined during calibration based on measured values of light ends, reactor temperature drop, and coke yield. The reformer (U-100) is typically modeled as a single unit in planning models (i.e., as a single lp submodel). An example of a simplified scheme is shown below in figure 6.

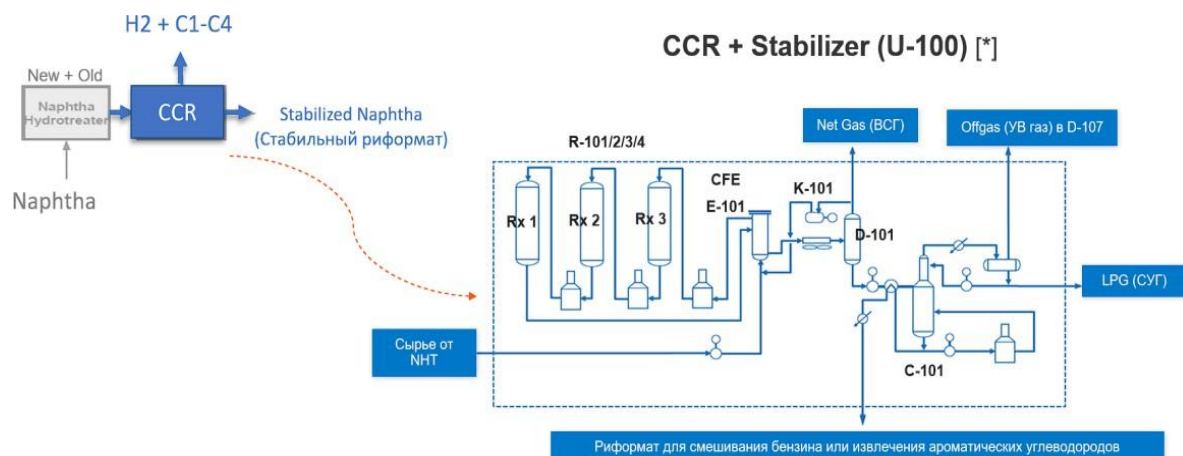


Figure 6. CCR Simplified Schematic

When the reformer operates in gasoline mode, the stabilized reformat from the C-101 stabilizer still is sent to the gasoline blending park or tank. An alternative mode of operation was chosen for calibration of the HYSYS model: the aromatic mode. Light gasoline (LN) from the reformat splitter overhead and BT (benzene-toluene) from the XyMax are processed in the Morphyane section (U-300). This is an extractive distillation, which is modeled by the HYSYS component splitter. The aromatic extract from the extractive distillation section is clay scrubbed in R-301/R-302. Hot clay scrubbing (R-302) converts traces of olefins (and/or diolefins) into higher boiling components via olefin alkylation (Figure 7). Some of the valuable aromatic product produced by catalytic reforming is lost to remove olefinic impurities.

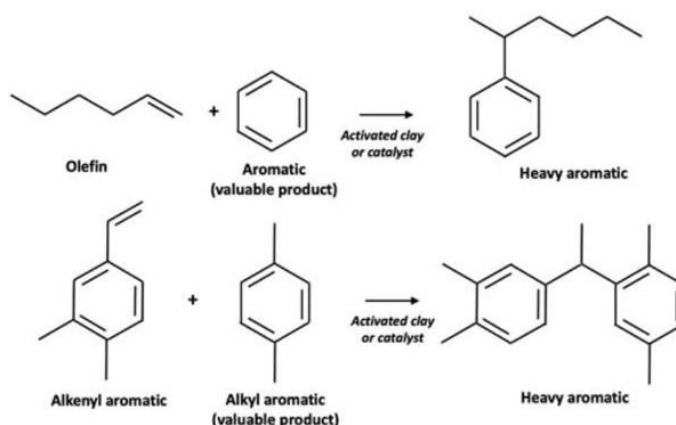


Figure 7. Alkylation of olefins (R-302)

Finally, the processed U-300 extract is combined with A7+ from the TransPlus stabilizer bottoms (U-700), and valuable aromatics are recovered in the benzene and toluene column sections (U-400).

The quality of the CCR reactor feed is determined by a mixture of hydrotreated (HT) streams:

1. Straight-run gasoline.
2. Gasoline from the DT GO unit (Prime D).
3. Cracking gasoline from the FCC unit (Prime G).
4. Coker gasoline (which is processed in the “old” gasoline hydrotreater).
5. Raffinate (which is processed in the “new” gasoline hydrotreater).

The HYSYS standard reformer block was used to model the 4-bed CCR catalytic reformer. This block includes the reactor, product separator and hydrogen recirculation loop integrated with the model block. The feed-to-product heat exchanger (CFE E-101) is modeled internally as a simple heat exchanger with a hot side approach.

The reformer has 2 products: H₂ Product and Net Liquid. These streams are calculated using the internal instantaneous vapor-liquid equilibrium model and considering the pressure and temperature specified for the product separator (Reactor Control parameter in the Reactor Section tab). In the reformer, the H₂ recycle is assumed to come from the top of this separator. The H₂ product is the “net” gas phase produced (i.e. excluding H₂ recycle).

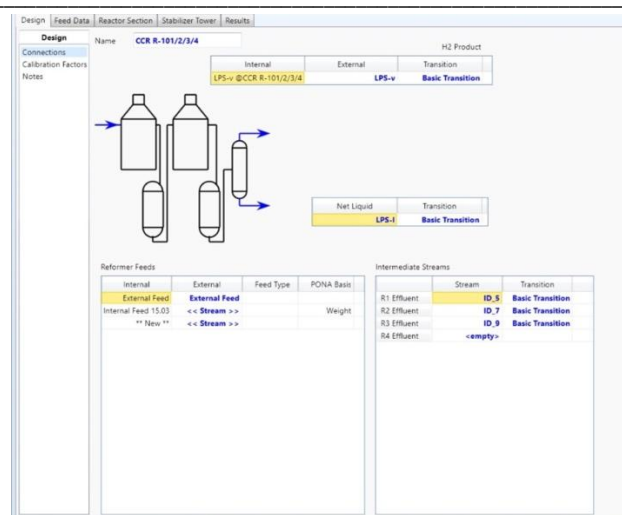


Figure 8. Reforming products

The reactor product gas portion leaving the product separator (D-101) is recycled to the reactor inlet, with the flow rate typically adjusted to obtain the desired H₂HC ratio. This ratio is important for catalyst stability and the effect of removing reaction products and condensables from the catalyst and supplying the catalyst with available hydrogen. Increasing the H₂HC ratio will move the naphtha through the reactors at a higher rate and provide greater heat removal for the endothermic heat of reaction.

Key reactor operating parameters can be entered in the CR Operating Targets spreadsheet:

- 1) Inlet weighted average temperature (°C).
- 2) Product separator (D-101) pressure (MPa g) and temperature (°C).
- 3) H₂HC (Recycle compressor flow rate (Nm³/h) can be entered as an alternative).

For the CFE (E-101) and preheater (H-101) simulations, the effluent from reactor №4 was reconstructed by adding 61 kNm³/h (approximately 18 t/h) to the product H₂ (Figure 8). The H₂HC ratio was determined to be 2.6 mol/mol in the reactor block, resulting in a calculated H₂ recycle purity of 89 mol.% in D-101 once the recycle loop converges. The reformers are continuous catalyst regeneration (CCR) units; Axens process with 4 radial flow reactors. Only catalyst is injected into the reactors; this is used to calculate the weighted average inlet temperature.

The vessel volume is necessary when modeling reactors in a steady state, since it determines the residence time. The effective reactor volume (catalyst volume) is calculated based on the mass of the catalyst and the density of the catalyst particles.

4. Discussion

The results of catalytic reforming modeling showed high accuracy in reproducing material and energy balances, predicting the yield of the reformat and its octane number. This is consistent with studies (Ivanchina et al., 2021; Ivashkina et al., 2023), which demonstrated that engineering models allow for the degradation of the catalyst, fluctuations in the composition of raw materials, and thereby increase the efficiency and cost-effectiveness of production. A comparison with (Orazbayev et al., 2021, 2022) confirms that the integration of industrial statistics with thermodynamic modeling is a universal method for optimizing the operation of CCR installations and can also serve as a tool for training engineering personnel and digitalizing processes at refineries.

However, there are still areas for further work – more detailed modeling of catalyst deactivation and coke formation (Zainullin et al., 2020), as well as the use of hybrid methods combining mechanistic modeling and machine learning. This will expand the applicability of the developed model to various refineries and increase its predictive value in the context of changing raw material composition and stricter requirements for sustainable development.

5. Conclusion

The model developed for the purpose of optimal control of a catalytic reformer is a good calibration of the available data and is therefore adequate for updating the linear programming submodel.

As a rule, when performing new calibrations, it is important to check the hydrogen balance "original" and "corrected" (i.e. after adjusting the material balance). A reasonable range for this is from 98% to 102%. If the material balance is confirmed to be good, but this value is bad, the GC data should be reviewed, the feed and product analyses may be inconsistent. An error does not always mean that the hydrogen yield itself is incorrect.

The default material balance reconciliation performed by the reformer model consists of distributing the material balance error across all products by normalizing their consumption upward or downward by the same factor. This approach is not recommended when the hydrogen or carbon imbalance is high.

The amount of final product obtained has a direct impact on its final quality. Therefore, reconciliation should be performed with reasonable calculation when balance errors are too large.

It is recommended to recalibrate once a year when major changes occur in the plant or when forecasts seem to diverge from actual operation.

The review of existing models for catalytic reforming with continuous catalyst regeneration has demonstrated the growing importance of advanced simulation tools for understanding and optimizing this complex process. While many models effectively describe reaction kinetics and product distribution, challenges remain in the accurate representation of catalyst deactivation, heat integration, and multi-reactor system dynamics. Integrating empirical data, kinetic modeling, and digital tools such as Aspen Plus and machine learning approaches opens new perspectives for improving predictive accuracy and operational efficiency. Future research should focus on refining model parameters through real-time plant data and exploring hybrid modeling techniques that combine mechanistic and data-driven methods.

6. Supplementary Materials: All figures in a high quality version are given here (<https://drive.google.com/drive/folders/1ThEVonP1sjC5Z2VuF9csILHiiMU3hHg6>)

7. Author Contributions

Research concept, text writing - R.D.; project administration - G.S.; data analysis - M.B.; data collection and processing, illustrations - Y.S.; data collection and processing - Y.Zh.

8. Author Information

Dyussova, Rizagul – postdoctoral fellow, Toraighyrov University, 64, Lomov str., Pavlodar, Kazakhstan, 140000; email: dyussova_rm@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>.

Seitenova, Gaini – Head of the project office, Association of Producers and Consumers of Oil and Gas Chemical Products (Oil and Gas Chemical Association), 8 Kunayev St., Astana, Kazakhstan, 010000; e-mail: seitenova_gzh@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>.

Borashova, Moldir – doctoral student, Atyrau Oil and Gas University, 1 Azattyk Avenue, Atyrau, Kazakhstan, 060000; borasheva_23@aogu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0009-2842-0078>.

Zhakmanova, Yekaterina – doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; e-mail: 980815450705@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0545-5912>.

Sergeyevs, Yakobs – doctoral student, Toraighyrov University, 64 Lomov str., Pavlodar, Kazakhstan, 140000; email: Ya.sergeevs@pnhz.kz, <https://orcid.org/0009-0009-2090-9143>.

9. Funding: This research was funded under grant funding for research of young scientists under the project "Zhas Galym" for 2023-2025, implemented by the Science Committee of the Ministry

of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, under the program AP19175752 "Scientific and technical support for energy saving and resource efficiency of the technology for the preparation of high-octane gasoline and aromatic hydrocarbons".

10. Acknowledgements: Gratitude for assistance in conducting research to the General Director of the Association of Legal Entities "Association of Producers and Consumers of Petrochemical Products" (Petrochemical Association) Tolkimbaev Gabit Azhdarovich.

11. Conflicts of Interest: No conflict of interest between the authors.

12. References

1. Boukezoula, T.F., Bencheikh, L., Belkhiat, D.E.C. (2022). A heterogeneous mathematical model for a spherical fixed bed axial flow reactor applied to a naphtha reforming process: enhancing performance challenge using a non-uniform catalyst distribution in the pellet. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis* 135(5), 2323–2340. <https://doi.org/10.1007/S11144-022-02257-Z/FIGURES/5>
2. Garma, R., Sioud, D., Binous, H., Bellagi, A. (2024). Introduction to the modeling of complex chemical reaction equilibrium using gPROMS® and GAMS®. *Computer Applications in Engineering Education* 32(3), e22714. <https://doi.org/10.1002/CAE.22714>
3. Gupta, A., Gupta, S.K. (2022). Catalyst regeneration techniques in naphtha reforming: Short review. *Chemical and Process Engineering* 43(2), 101–108. <https://doi.org/10.24425/CPE.2022.140813>
4. Ivanchina, E., Chernyakova, E., Pchelintseva, I., Poluboyartsev, D. (2021). Mathematical modeling and optimization of semi-regenerative catalytic reforming of naphtha. *Oil and Gas Science and Technology* 76. <https://doi.org/10.2516/OGST/2021041>
5. Ivashkina, E.N., Koksharov, A.G., Ivanchina, E.D., Chuzlov, V.A., Nazarova, G.Y., Chernyakova, E.S., Dolganov, I.M. (2023). Engineering models of oil refining: increasing the efficiency of multi-stage gasoline production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering* 334(4), 195–208. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3793>
6. Jarullah, A.T., Ahmed, A.N., Altabbakh, B.A., Ahmed, A.M. (2023). Design of New Composites Nano-Catalysts for Naphtha Reforming Process: Experiments and Process Modeling. *Tikrit Journal of Engineering Sciences* 30(2), 46–59. <https://doi.org/10.25130/tjes.30.2.6>
7. Lopes, I.S., Figueiredo, M.C., Sá, V. (2020). Criticality Evaluation To Support Maintenance Management of Manufacturing Systems. *International Journal of Industrial Engineering and Management* 11(1), 3–18. <https://doi.org/10.24867/IJIE-2020-1-248>
8. Ma, X.C., He, C., Chen, Q.L., Zhang, B.J. (2024). Modeling and optimization for the continuous catalytic reforming process based on the hybrid surrogate optimization model. *Computers & Chemical Engineering* 191, 108841. <https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2024.108841>
9. Mokheimer, E.M.A., Shakeel, M.R., Harale, A., Paglieri, S., Mansour, R.Ben. (2024). Fuel reforming processes for hydrogen production. *Fuel* 359, 130427. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.130427>
10. Moon, J.A., Syauqi, A., Lim, H. (2025). Multi-objective optimization of hydrogen production based on integration of process-based modeling and machine learning. *Chemical Engineering Journal* 520, 166148. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2025.166148>
11. Naderi, M., Rashidi, H., Reynolds, A., Doherty, W. (2025). Aspen Plus modelling of the MILENA dual fluidised bed biomass gasifier technology. *International Journal of Thermofluids* 29, 101334. <https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2025.101334>

12. Orazbayev, B., Zhumadillayeva, A., Kodanova, S., Iskakova, S., Orazbayeva, K. (2021). Improving the efficiency of technological units for the production of high-quality motor fuels using fuzzy mathematics methods. *E3S Web of Conferences* 288, 01020. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202128801020>
13. Orazbayev, B., Zhumadillayeva, A., Orazbayeva, K., Iskakova, S., Utenova, B., Gazizov, F., Ilyashenko, S., Afanaseva, O. (2022). The System of Models and Optimization of Operating Modes of a Catalytic Reforming Unit Using Initial Fuzzy Information. *Energies* 15(4), 1573. <https://doi.org/10.3390/EN15041573>
14. Pasandide, P., Rahmani, M. (2021). Simulation and optimization of continuous catalytic reforming: Reducing energy cost and coke formation. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(58), 30005–30018. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.06.151>
15. Rekoske, J.E., Abrevaya, H., Bricker, J.C., Zhu, X., Bricker, M. (2017). Advances in Refining Technologies. *Advances in Refining Catalysis*, 3–58. <https://doi.org/10.1201/9781315370125-2/ADVANCES-REFINING-TECHNOLOGIES-JAMES-REKOSKE-HAYIM-ABREVAYA-JEFFERY-BRICKER-XIN-ZHU-MAUREEN-BRICKER>
16. Samad, A., Ahmad, I., Kano, M., Caliskan, H. (2023). Prediction and optimization of exergetic efficiency of reactive units of a petroleum refinery under uncertainty through artificial neural network-based surrogate modeling. *Process Safety and Environmental Protection* 177, 1403–1414. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2023.07.046>
17. Sapre, A.V., Katzer, J.R. (2020). Some Aspects of Modeling in Petroleum Processing. *Computer-Aided Design of Catalysts*, 553–602. <https://doi.org/10.1201/9781003067115-13>
18. Smith, J.M., Van Ness, H.C., Abbott, M.M., Swihart, M.T. (2022). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*, 762.
19. Velázquez, H.D., Cerón-Camacho, R., Mosqueira-Mondragón, M.L., Hernández-Cortez, J.G., Montoya de la Fuente, J.A., Hernández-Pichardo, M.L., Beltrán-Oviedo, T.A., Martínez-Palou, R. (2023). Recent progress on catalyst technologies for high quality gasoline production. *Catalysis Reviews* 65(4), 1079–1299. <https://doi.org/10.1080/01614940.2021.2003084>
20. Khalid M.N. (2023). View of Analysis of the world production of petroleum products. <https://doi.org/10.32523/2789-4320-2023-2-108-118>
21. Wei, W., Bennett, C.A., Tanaka, R., Hou, G., Klein, M.T. (2008). Detailed kinetic models for catalytic reforming. *Fuel Processing Technology* 89(4), 344–349. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2007.11.014>
22. Wu, J., Chen, G., Chen, A., Gao, Z., Wu, X., Cheng, H., Li, Y., Wang, Y., Qian, Z., Zhang, X., Xu, C., Chen, Z., Zhang, L. (2025). Molecular-Level Modeling of Naphtha Continuous Catalytic Reforming Process. *Chemical Engineering Science* 309, 121430. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2025.121430>
23. Yang, X., Wang, S., He, Y. (2022). Review of catalytic reforming for hydrogen production in a membrane-assisted fluidized bed reactor. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 154, 111832. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111832>
24. Zainullin, R.Z., Zagoruiko, A.N., Koledina, K.F., Gubaidullin, I.M., Faskhutdinova, R.I. (2020). Multi-Criterion Optimization of a Catalytic Reforming Reactor Unit Using a Genetic Algorithm. *Catalysis in Industry* 12(2), 133–140. <https://doi.org/10.1134/S2070050420020129/FIGURES/3>
25. Annual report (2024). <https://www.kmg.kz/ru/company/>
26. Seitenova G.Zh., Dyussova R.M., Burumbayeva G.R. (2023). Mathematical modeling of oil refining processes as a method of resource saving and energy efficiency. *Neft i gaz* 133, 10. <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2023-1.13>

Каталитикалық реформалау процесін жобалау және өнеркәсіптік тексеру

Ризагуль Дюсова, Гайни Сейтенова, Мөлдір Борашова, Екатерина Жакманова, Якобс Сергеевс

Аңдатпа: Катализатордың үздіксіз регенерациясы (CCR) каталитикалық риформингі жоғары октанды бензиндерді өндірудегі негізгі процестердің бірі болып табылады. Қазіргі экологиялық стандарттарды сақтай отырып, оның энергетикалық және ресурстық тиімділігін арттыру қажеттілігі өзекті және шұғыл мәселе болып қала береді. Катализатордың деградациясын, бастапқы шикізат құрамының ауытқуын және маңызды жылу әсерлерін ескере отырып, өндірістік жұмыс жағдайында осы процестің нақты математикалық модельдерін жасау өте қиын міндет болып табылады. Мақаланың мақсаты Атырау мұнай өңдеу зауытының мысалында көрсетілген Aspen hysys көмегімен CCR риформинг процесінің математикалық моделін әзірлеу және калибрлеу болып табылады. Зерттеу әдістемесі пайдалану деректерін жинауды (шикізат құрамы, реактор параметрлері, катализатор қасиеттері), егжей-тегжейлі технологиялық схеманы құруды, термодинамикалық модельдеуді және материалдық және энергетикалық баланстарды есептеуді қамтиды. Әзірленген модель нақты өндірістік деректерді қолдана отырып калибрленді және репродуктивтілік пен болжау дәлдігіне тексерілді. Нәтижелер ұсынылған модель риформингтің шығуын және октан санын сенімді түрде болжайтынын, сондай-ақ әртүрлі өндірістік жағдайларда процестің оңтайлы параметрлерін анықтайтынын растайды. Мақалада CCR риформингінің технологиялық артықшылықтары, соның ішінде процестің жоғары тұрақтылығы, катализатордың ұзақ қызмет ету мерзімі және энергия тиімділігінің жоғарылауы көрсетілген. Зерттеудің практикалық маңыздылығы қолданыстағы CCR қондырғыларының жұмысын оңтайландыру және инженерлік персоналды оқыту үшін әзірленген модельді қолдану мүмкіндігі болып табылады. Ұсынылған тәсілді ұқсас технологиялық конфигурациясы бар басқа мұнай өңдеу зауыттарына да бейімдеуге болады.

Түйін сөздер: каталитикалық реформалау, катализатордың үздіксіз регенерациясы, Aspen HYSYS, математикалық модельдеу, процестерді оңтайландыру, жоғары октанды бензин.

Разработка и промышленная проверка процесса каталитического риформинга

Ризагуль Дюсова, Гайни Сейтенова, Молдир Борашова, Екатерина Жакманова, Якобс Сергеевс

Аннотация: Каталитический риформинг с непрерывной регенерацией катализатора (CCR) является одним из ключевых процессов в производстве высокооктановых бензинов. Необходимость повышения его энергетической и ресурсоэффективности при соблюдении современных экологических стандартов остается актуальной и неотложной проблемой. Особенно сложной задачей является разработка точных математических моделей этого процесса в промышленных условиях эксплуатации, учитывающих деградацию катализатора, колебания состава исходного сырья и значительные тепловые эффекты. Целью статьи является разработка и калибровка математической модели процесса риформинга CCR с использованием Aspen HYSYS, продемонстрированной на примере Атырауского нефтеперерабатывающего завода. Методология исследования включает сбор эксплуатационных данных (состав сырья, параметры реактора, свойства катализатора), построение подробной технологической схемы, термодинамическое моделирование и расчет материального и энергетического балансов. Разработанная модель была откалибрована с

использованием реальных промышленных данных и протестирована на воспроизводимость и точность прогнозирования. Результаты подтверждают, что предложенная модель надежно предсказывает выход риформинга и октановое число, а также определяет оптимальные параметры процесса при различных производственных условиях. В статье подчеркиваются технологические преимущества риформинга CCR, включая высокую стабильность процесса, увеличенный срок службы катализатора и повышенную энергоэффективность. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанной модели для оптимизации работы существующих установок CCR и для обучения инженерного персонала. Предложенный подход также может быть адаптирован для других нефтеперерабатывающих заводов с аналогичной технологической конфигурацией.

Ключевые слова: каталитический риформинг, непрерывная регенерация катализатора, Aspen HYSYS, математическое моделирование, оптимизация процесса, высокооктановый бензин.

Facile thermal oxidation and carbon coating strategy for fabricating a 3D Zn/ZnO@C anode

Yerzhigit Serik^{1,2}, Nurbolat Issatayev³, Moldir Arkharbekova^{1,2}, Zhumabay Bakenov^{1,3,4}, Arailym Nurpeissova^{1,4}, Aliya Mukanova^{1,4*}

¹National Laboratory Astana, Kazakhstan; nla@nu.edu.kz

²Department of Chemistry, Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; enu@enu.kz

³Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering and Digital Sciences, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan; nu@old.nu.edu.kz

⁴Institute of Batteries, Astana, Kazakhstan

*Correspondence: aliya.mukanova@nu.edu.kz

Citation: Serik, Y., Issatayev, N., Arkharbekova, M., Bakenov, Z., Nurpeissova, A., Mukanova, A. (2025). Facile Thermal Oxidation and Carbon Coating Strategy for Fabricating a 3D Zn/ZnO@C Anode. *Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series*, 152(3), 90-103. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-90-103>

Academic Editor:
E.Ye. Kopsishev

Received: 06.08.2025
Revised: 30.08.2025
Accepted: 01.09.2025
Published: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Abstract: With the increasing demand for efficient and environmentally friendly energy storage, developing alternatives to commercial graphite anodes in lithium-ion batteries (LIBs) has become a major research focus. Zinc oxide (ZnO) is a promising candidate due to its high theoretical capacity (978 mAh/g), but its practical application is limited by large volume expansion, low electrical conductivity, and poor cycling stability. In this study, a three-dimensional (3D) Zn/ZnO foam was synthesized via thermal oxidation and then coated with carbon through carbonization of polyethylene oxide (PEO). The 3D porous structure facilitates ion and electron transport, while the carbon coating mitigates volume changes during cycling and enhances overall conductivity. Structural and chemical analyses using XRD, SEM, SEM-EDS, and FTIR confirmed the successful fabrication of the Zn/ZnO@C composite. Electrochemical tests showed that Zn/ZnO@C maintained a specific capacity of approximately 380 mAh/g after 100 cycles at a current density of 50 mA/g, compared to only 100 mAh/g for the uncoated Zn/ZnO sample. This significant improvement in performance highlights the potential of carbon-coated Zn/ZnO foam as a high-performance anode material for next-generation lithium-ion batteries.

Keywords: lithium-ion batteries; electrode materials; energy storage systems; electrochemistry

1. Introduction

The substantial rise in fossil fuel consumption over the past two decades for electricity generation has emerged as a major contributor to global ecological degradation, including greenhouse gas emissions, climate change, and air pollution. As a result, the global energy landscape is undergoing a transformation toward sustainable and environmentally friendly alternatives. Renewable energy technologies, particularly solar and wind power, have been increasingly adopted to address these challenges. However, these sources are inherently intermittent and

location-dependent, necessitating the development of efficient, reliable, and scalable energy storage systems to ensure a stable power supply and grid integration (Cai et al., 2020).

Among the various energy storage technologies available, lithium-ion batteries (LIBs) have garnered considerable attention due to their high energy density, long cycle life, low self-discharge, and relatively high efficiency. These characteristics have made LIBs indispensable in applications ranging from portable electronics to electric vehicles and grid-level storage systems. However, the demand for high-performance batteries continues to increase, prompting the need for further improvements in specific capacity, rate capability, and cycling stability (Hao et al., 2020; Tarascon & Armand, 2001).

Conventional LIB anodes, particularly those based on two-dimensional (2D) electrode structures and commercial graphite, are reaching their theoretical performance limits. Graphite anodes offer a theoretical capacity of only 372 mAh/g, which restricts the energy density of LIBs. Attempts to increase electrode mass loading often lead to thicker electrodes with prolonged ion diffusion paths and higher internal resistance, ultimately degrading the battery's rate performance and fast-charging ability (Y. Liu et al., 2019). To address these challenges, three-dimensional (3D) structured current collectors and electrode architectures have emerged as a promising design strategy. The 3D porous framework offers a high surface area for active material deposition, facilitates electrolyte infiltration, shortens ion/electron transport pathways, and accommodates volume expansion during cycling, thereby enhancing both energy and power performance (Zhang et al., 2017).

In pursuit of higher-capacity anode materials, transition metal oxides (TMOs) have attracted significant attention due to their abundance, environmental benignity, and high theoretical capacities. Materials such as CuO (674 mAh/g), NiO (718 mAh/g), and particularly ZnO (978 mAh/g) have been widely investigated as potential anode candidates (Issatayev, Adylkhanova, et al., 2024; Issatayev et al., 2021). Among these, ZnO stands out for its high theoretical capacity, low cost, nontoxicity, and chemical stability. However, ZnO-based anodes face several critical challenges, including low intrinsic electrical conductivity, sluggish lithium-ion diffusion kinetics, and substantial volume expansion (~300%) during lithiation/delithiation processes. These drawbacks often result in mechanical degradation, particle pulverization, and rapid capacity fading upon cycling (Khac et al., 2021).

To mitigate these limitations, researchers have developed various strategies, among which carbon coating has emerged as one of the most effective approaches. Carbonaceous materials, such as graphene, carbon nanotubes, and amorphous carbon, serve as conductive matrices or protective layers that enhance electronic conductivity, buffer volume changes, and prevent direct contact between ZnO and electrolyte, thereby minimizing side reactions and stabilizing the solid electrolyte interphase (SEI) layer (Y. Liu et al., 2019). For instance, Thauer et al. (2023) reported ZnO/C composites prepared via the calcination of zinc glycerolate under nitrogen, achieving a specific capacity of 212 mAh/g compared to 100 mAh/g for bare ZnO at a current density of 100 mA/g (Thauer et al., 2021a). Bai et al. (2013) synthesized ZnO@C nanospheres via a one-step co-pyrolysis of zinc and acetylacetone, yielding a carbon-coated structure, demonstrating enhanced electrochemical stability (Bai et al., 2014). Recent studies have also highlighted the effectiveness of hydrothermal synthesis and annealing techniques in developing ZnO nanorods coated with carbon, achieving improved capacity retention and structural integrity (Ding et al., 2019).

Further improvements can be achieved by combining carbon coating with 3D current collector designs. In this context, metal foams - such as copper or zinc foams - offer a self-supporting, conductive, and porous scaffold for growing active materials. When combined with a carbon layer, the resulting 3D hybrid structures exhibit synergistic effects: the foam provides structural robustness and continuous electron pathways, while the carbon coating ensures surface passivation and conductivity. This dual-function approach provides a viable pathway for achieving high-performance ZnO-based anodes (Issatayev et al., 2021).

Building on these recent advances, the present study introduces a novel 3D Zn/ZnO@C foam electrode synthesized through a simple and scalable two-step process. In the first step, commercial

Zn foam is thermally oxidized to form a conformal ZnO layer. Subsequently, the Zn/ZnO composite is coated with polyethylene oxide (PEO) via dip-coating and subjected to carbonization under an argon atmosphere. PEO serves as the carbon precursor, producing a thin, uniform carbon layer upon pyrolysis. This carbon layer not only enhances electronic conductivity but also provides mechanical stability during cycling. The 3D foam structure offers improved electrolyte accessibility and reduced ion diffusion resistance, contributing to superior electrochemical kinetics. Electrochemical evaluation revealed that the Zn/ZnO@C foam exhibited significantly enhanced performance compared to uncoated Zn/ZnO foam, delivering a reversible capacity of approximately 380 mAh/g after 100 cycles at 100 mA/g. The results of this work underscore the effectiveness of integrating carbon coating and 3D architecture for developing high-performance ZnO-based anodes for next-generation lithium-ion batteries.

2. Materials and methods

2.1 Materials

Zn foam deposited in Ni foam was purchased from DEK Research. Polyethylene oxide (PEO, average $M_w = 100000$) and Acetonitrile were purchased from Sigma Aldrich. The authors used OpenAI's ChatGPT (GPT-4, accessed via chat.openai.com) as a language support tool to assist with academic writing, grammar refinement, and paraphrasing, and for generating the animated 3D structure of Zn foam and modified electrodes. No data or results were generated by the AI; all scientific input, analysis, and interpretation were solely the responsibility of the authors.

2.2 Synthesis of Zn/ZnO foam

The porous ZnO electrodes were fabricated by thermal oxidation of pure Zn foam (0.5 mm thickness, 95-98% porosity) in air using a muffle furnace. At first, Zn foam was cut into disks with a 14 mm diameter. Cut disks were cleaned by ultrasonication in a solution of ethanol and acetone in the ratio of 1:1 to remove dust and dirt. After the cleaning process, the washed disks were dried in a vacuum oven at 60°C for 3 h to completely dry any moisture. After all of these preparation processes, Zn foams were placed into a muffle furnace to 500°C for 15 minutes at a controlled rate of 5°C per minute. As a result of thermal oxidation, Zn/ZnO foams were obtained. The average mass of the ZnO coating was approximately 8–10 mg.

2.3 Synthesis of Zn/ZnO@C foam

The carbon layer was obtained by dip coating the Zn/ZnO foam into a 15% solution of PEO. After each dipping, polymer-coated Zn/ZnO foam was dried at 50°C in a drying oven for 30 minutes with ventilation turned off. This dip coating process was repeated several times to ensure a uniform polymer coating. Finally, the obtained polymer-coated Zn/ZnO foam was annealed at 600°C for 1h in an argon atmosphere, with a ramping rate of 5°C per minute. To investigate the effect of carbon coating on the electrochemical performance of Zn/ZnO foam anode, the polymer coating was applied in 5 and 7 layers.

2.4 Material Characterization

The structural characterization of the obtained materials was performed by X-ray diffraction (XRD) using a MiniFlex 600/600-C Benchtop X-ray diffractometer (Rigaku, Japan) covering diffraction angles from 25° to 95° at a scanning rate of 5° per minute. Scanning electron microscopy (SEM, JEOL JSM-IT800, Japan) coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) was used to examine film morphologies.

2.5 Electrochemical measurements

The electrochemical performance of the samples was investigated using CR2032 coin-type batteries assembled in an argon-filled glove box (MBRAUN, LABmaster PRO Glovebox, Germany) containing <0.1 ppm O₂ and <0.1 ppm H₂O. Lithium chips are used as an opposite and reference electrode. The lithium hexafluorophosphate (LiPF₆) dissolved in a mixture of ethylene carbonate

(EC), diethyl carbonate (DEC), and ethyl methyl carbonate (EMC) in a volume ratio of 1:1:1 was utilized as an electrolyte. Celgard 2400, microporous polypropylene, was employed as the separator membrane. After assembly, the coin cells were kept overnight, and following this rest, they were tested on a Neware BTS4000 test (Neware Co., Shenzhen, China) system across a potential range of 0.05 to 2.5 V vs. Li/Li^+ . The mass of ZnO and carbon in the Zn/ZnO@C foam is utilized for calculating the current. Current density was calculated using the total mass of ZnO and carbon (6–8 mg).

3. Results

According to the conducted research, the morphological and electrochemical analyses were done and demonstrated in subsection 3.1. Meanwhile, the chemical equations provided in subsection 3.2 and discussed in section 4.

3.1. Figures and Schemes

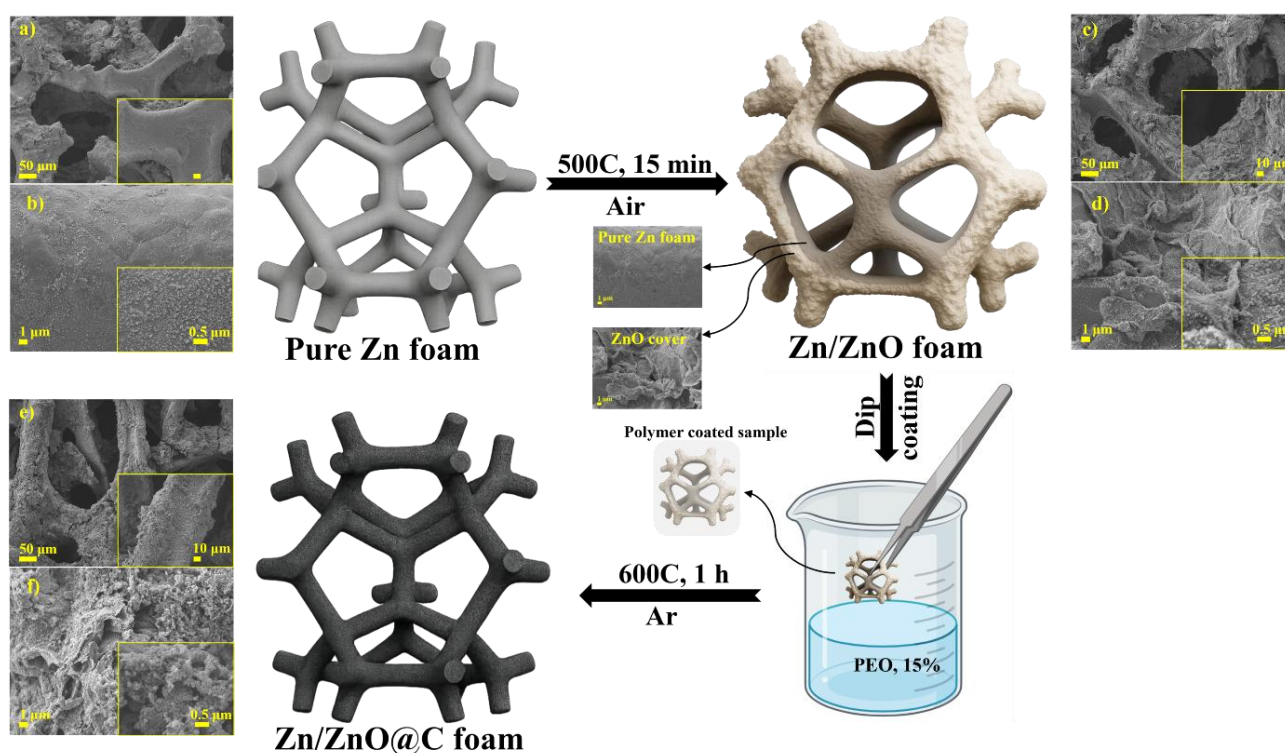


Figure 1. Experimental part illustration and SEM images at various magnifications: a-b) Zn foam, c-d) Zn/ZnO foam, e-f) Zn/ZnO@C foam

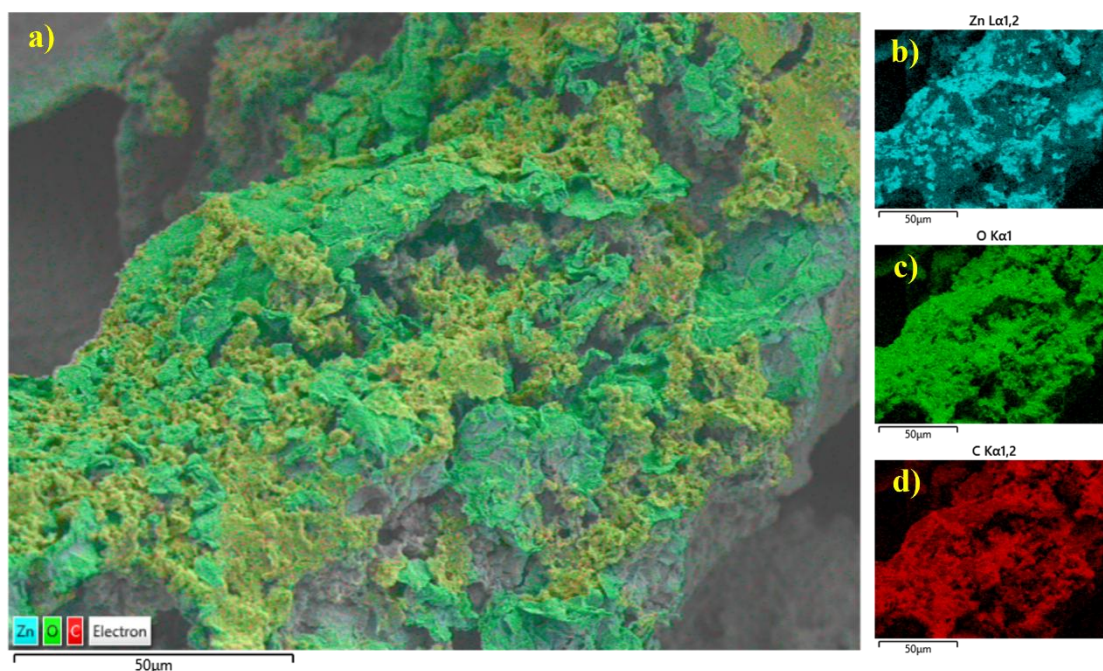


Figure 2. EDS mapping of Zn, O, and C elements on the surface of Zn/ZnO@C foam

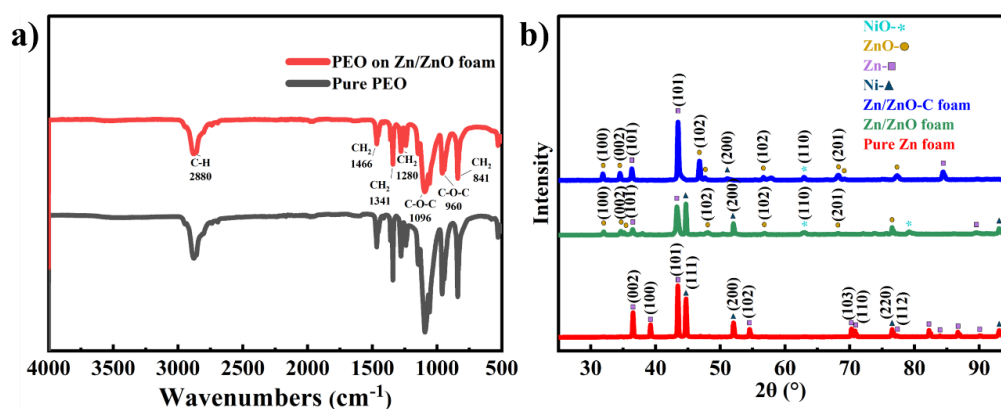


Figure 3. a) FTIR spectra of pure PEO and coated on Zn/ZnO foam; b) XRD patterns of pure Zn foam, Zn/ZnO foam, and Zn/ZnO-C foam

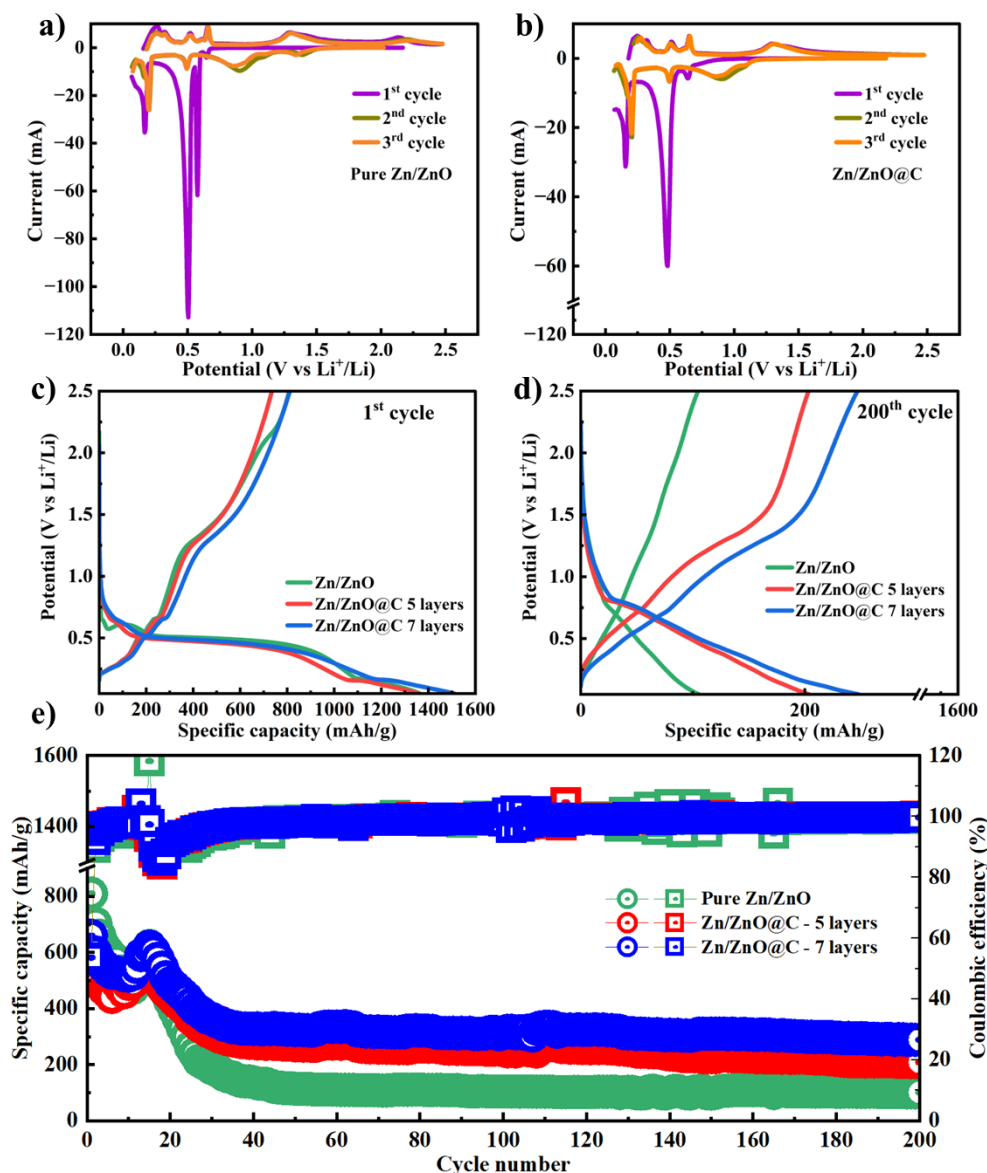


Figure 4. dQ/dV plots of (a) pure Zn/ZnO foam and (b) Zn/ZnO@C foam and potential profiles of all electrodes at (c) the 1st cycle and (d) 100th cycle at the current density of 50 mA/g. (e) Cycle performance of all synthesized electrodes

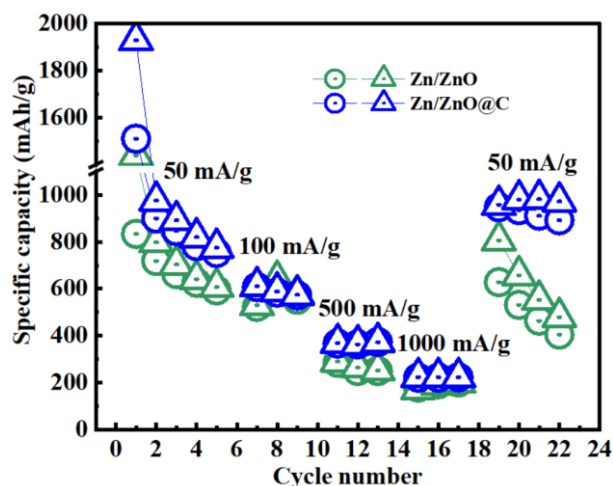


Figure 5. The rate capability of Zn/ZnO foam and Zn/ZnO@C foam

3.2 Chemical Equations



4. Discussion

The Zn/ZnO–C foam was synthesized via a straightforward two-step process, as illustrated in Figure 1. In the first step, pure Zn foam underwent thermal oxidation to develop a conformal ZnO layer on its surface. This was followed by a dip-coating procedure using a polyethylene oxide (PEO) solution and subsequent carbonization in a tube furnace under an argon atmosphere. Here, PEO acted as the carbon source, enabling the formation of a uniform carbon coating on the Zn/ZnO surface. This carbon layer is crucial, as it enhances the electronic conductivity of the electrode and helps stabilize its electrochemical behavior by mitigating volume changes during lithium cycling.

To evaluate the morphological evolution throughout each synthesis stage, scanning electron microscopy (SEM) was conducted on the pristine Zn foam, oxidized Zn/ZnO foam, and carbon-coated Zn/ZnO@C foam (Figure 1). The SEM images of the untreated Zn foam reveal a highly porous, three-dimensional architecture composed of interconnected pores, which provides a large surface area beneficial for ion transport and subsequent surface modification. At low magnification, variations in topography were noted - some regions appeared smooth, while others showed a degree of roughness. High-magnification images further disclosed the presence of fine particles, likely corresponding to a thin native oxide layer formed from atmospheric exposure.

Following thermal oxidation, a significant transformation in surface morphology was observed. The Zn/ZnO foam exhibited increased roughness and surface complexity, confirming the formation of ZnO. SEM images indicated that the metal surface was uniformly covered with nanoscale ZnO particles, forming a dense and adherent oxide film. The absence of microcracks or delamination reflects good mechanical integrity of the oxide layer, a critical factor for long-term cycling stability.

In the final modification stage, the Zn/ZnO foam underwent multiple dip-coating cycles in a 15 wt% PEO solution, followed by carbonization. This resulted in the formation of Zn/ZnO@C foam with a well-distributed carbon layer. High-magnification SEM images revealed a further increase in surface texture, indicative of successful carbon deposition. The coating appeared to be continuous, porous, and uniformly spread across the foam framework. The uniformity and presence of porosity were confirmed through SEM at different magnifications, which demonstrated continuous coverage without cracks or agglomerations, while SEM–EDS mapping (Figure 2) further verified the homogeneous distribution of carbon and oxygen signals. The porous nature of the coating was supported by nanoscale voids observed in high-magnification SEM images, typical for polymer-derived carbons after pyrolysis (Thauer et al., 2021; Zhang et al., 2018). Although layer thickness and specific surface area were not directly quantified, these morphological observations strongly indicate a uniform and porous coating.

To support these morphological findings, elemental mapping was performed using SEM–EDS analysis (Figure 2). The oxygen distribution map (Figure 2c) confirmed the successful formation of a ZnO layer via thermal oxidation. Simultaneously, carbon mapping (Figure 2d) validated the presence of a uniform carbon layer formed during PEO carbonization. It should be noted that the oxygen detected in EDS mapping originates from ZnO, NiO (formed via partial oxidation of the Ni substrate), and residual oxygen-containing groups in the carbon.

The structural evolution of the materials was further characterized by X-ray diffraction (XRD), as shown in Figure 2b. The XRD pattern of pristine Zn foam exhibited sharp diffraction peaks at 36.5°, 39.2°, 43.5°, 54.4°, 70.3°, 70.8°, and 77.1°, corresponding to the (002), (100), (101), (102), (103), (110), and (112) planes of metallic Zn, respectively (Chou et al., 2019; Lin et al., 2012; Pramanik et al., 2023). Additionally, peaks at 44.8°, 52.1°, and 76.6° matched the (111), (200), and

(220) planes of Ni, confirming the Ni substrate underneath the Zn coating, consistent with the SEM observations (Srinivasa et al., 2021).

Following thermal oxidation and carbonization, new peaks emerged at 32.1°, 34.7°, 35.2°, 48.1°, 56.8°, 68.1°, and 76.6°, indexed to the (100), (002), (102), (102), (201), (110), and (112) planes of ZnO, which confirm the successful synthesis of ZnO (Ghosh & Raychaudhuri, 2008). Furthermore, peaks at 63.1° and 79.1°, corresponding to the (200) and (222) planes of NiO, were also detected, indicating partial oxidation of the Ni substrate during the thermal treatment step (Rahdar et al., 2015; Song et al., 2022).

To confirm the presence of the PEO-derived carbon coating, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) was conducted on the polymer-coated samples (Figure 3a). The spectrum showed a prominent peak at 2877 cm⁻¹, corresponding to the asymmetric C–H stretching of methylene groups - a signature of pure PEO (Abdelrazek et al., 2018). Additionally, characteristic CH₂ wagging vibrations appeared at 1341 cm⁻¹ and 1467 cm⁻¹. A cluster of strong bands around 1092 cm⁻¹, accompanied by peaks at 1145 cm⁻¹ and 1060 cm⁻¹, was assigned to the C–O–C stretching vibrations, with the 1092 cm⁻¹ band being the most intense (Arinova et al., 2023). Minor peaks at 960 cm⁻¹ and 841 cm⁻¹ were attributed to asymmetric rocking motions of CH₂, while the absorption band at 531 cm⁻¹ corresponded to C–O–C bending (Kumar et al., 2014; Tleukenov et al., 2022). These FTIR results support the successful deposition of a PEO-derived carbonaceous layer on the Zn/ZnO surface. The oxygen functionalities observed in the carbon layer arise from decomposition of PEO during carbonization and partial contribution from ZnO. Their concentration was effectively controlled by carbonization at 600°C under Ar, which removed most oxygen-containing groups while retaining a fraction of stable residual functionalities. This selective removal enhances conductivity while limited residual oxygen improves interfacial wettability and ion transport. Although these groups were not quantitatively measured in our study, the improved conductivity and stable cycling performance of the Zn/ZnO@C electrode are consistent with prior reports on ZnO/C composites where oxygen functionalities were analyzed by XPS (Thauer et al., 2021; Bui et al., 2021; Zhang et al., 2018).

Figures 4a and 4b present the differential capacity (dQ/dV) curves for the bare Zn/ZnO foam and the Zn/ZnO–C foam, respectively. For the pristine Zn/ZnO foam, the cathodic scan reveals a distinct peak at approximately 0.1 V, which corresponds to the alloying reaction between Zn and Li⁺, as described by Eq. 1 (Belliard & Irvine, n.d.). A prominent peak observed at around 0.5 V is attributed to the formation of the solid electrolyte interphase (SEI), a typical feature of the initial lithiation cycle (Belliard & Irvine, n.d.). Additionally, a strong reduction peak at 0.65 V is associated with the conversion reaction of ZnO with Li⁺ ions (Eq. 2) (J. Liu et al., 2008). Since the ZnO layer was formed by thermal oxidation on Zn-coated Ni foam, the presence of NiO is also expected and was confirmed through XRD and SEM analyses. A smaller peak at 0.58 V corresponds to the reduction of NiO to metallic Ni, as represented by Eq. 3 (Issatayev, Abdumutaliyeva, et al., 2024).

As the electrochemical cycling progresses, structural and morphological changes - such as electrolyte decomposition—cause a shift of these cathodic peaks to higher potentials in subsequent cycles. During the anodic scan, multiple peaks appear at 0.27 V, 0.3 V, 0.52 V, and 0.65 V, which are indicative of a multi-step dealloying process of the Li–Zn alloy (Gachot et al., 2008; Huang et al., 2011; N. Li et al., 2014; Shen et al., 2013). Additionally, anodic peaks at approximately 1.2 V and 2.1 V correspond to the reversible reformation of ZnO and NiO, respectively, as represented by Eq. 4 and 5 (Issatayev, Abdumutaliyeva, et al., 2024; N. Li et al., 2014).

Interestingly, in the differential capacity (dQ/dV) profile of the Zn/ZnO–C electrode (Figure 4b), peaks attributed to NiO are no longer observed, which contrasts with the pure Zn/ZnO foam. This absence suggests that the NiO component does not actively participate in electrochemical reactions with Li⁺ ions, likely due to passivation by the carbon coating. Nonetheless, the remaining peaks closely resemble those seen in the uncoated sample, thereby confirming the electrochemical inertness of the carbon layer and its non-involvement in redox processes (Issatayev, Abdumutaliyeva, et al., 2024).

This interpretation is further supported by the potential–capacity profiles at a current density of 50 mA g⁻¹, shown in Figures 4c and 4d, which are consistent with the dQ/dV features described

above. As commonly observed in conversion-type electrodes, the initial discharge capacities of all samples were noticeably higher than those recorded in subsequent cycles, a behavior attributed to SEI formation. Specifically, the initial charge/discharge capacities of Zn/ZnO, Zn/ZnO@C-5, and Zn/ZnO@C-7 were 809/1363 mAh g⁻¹, 734/1361 mAh g⁻¹, and 810/1510 mAh g⁻¹, respectively. The corresponding initial coulombic efficiencies (ICE) were 59% for bare Zn/ZnO and 54% for both carbon-coated samples. These lower ICE values in carbon-coated electrodes are attributed to their higher surface area, which increases active sites for electrolyte decomposition and SEI formation. SEM/EDS and porous morphology support this, consistent with previous reports linking higher surface areas and oxygen groups to larger irreversible capacities (Thauer et al., 2021).

The lower ICE values in the carbon-coated electrodes are most likely due to their higher specific surface areas, which increase the number of active sites available for electrolyte decomposition and SEI formation. As a result, more Li⁺ ions are irreversibly consumed during the initial cycle, contributing to the lower coulombic efficiency.

Despite this early inefficiency, the long-term cycling results indicate that carbon-coated samples achieve significantly improved stability. By the 100th cycle, the Zn/ZnO, Zn/ZnO@C-5, and Zn/ZnO@C-7 electrodes-maintained charge/discharge capacities of 104/105 mAh g⁻¹, 317/320 mAh g⁻¹, and 383/389 mAh g⁻¹, respectively. Moreover, their coulombic efficiencies improved to 99.3%, 99.2%, and 98.4%, indicating that the lithiation/delithiation processes became highly reversible over extended cycling.

To further explore this long-term stability, the cycling performance was evaluated at a current density of 50 mA g⁻¹ across a voltage range of 0.05–2.5 V, as shown in Figure 4e. The data reinforces the superior capacity retention of carbon-coated samples compared to the bare Zn/ZnO electrode. After 100 cycles, the Zn/ZnO sample maintained a specific capacity of ~100 mAh g⁻¹, while Zn/ZnO@C-5 and Zn/ZnO@C-7 retained ~320 mAh g⁻¹ and ~380 mAh g⁻¹, respectively.

All electrodes initially exhibited a decrease in capacity over the first 20 cycles, which can be attributed to the ~300% volume expansion of ZnO during lithiation/delithiation. This significant expansion impairs the mechanical integrity of the electrode, leading to layer cracking and loss of active material. However, following this initial degradation, a moderate increase in specific capacity was observed, likely due to the exposure of new electrochemically active sites formed because of structural fracturing. Eventually, with prolonged cycling, mechanical degradation reaches a critical point beyond which capacity undergoes irreversible fading.

The presence of a carbon coating plays a crucial role in mitigating this issue. Owing to its electrical conductivity and structural flexibility, the carbon layer effectively suppresses the negative impact of volume fluctuations, thereby enhancing the cycling stability. Notably, this improvement is attributed to the mechanical buffering effect of the carbon rather than its electrochemical activity. This is further supported by the absence of any carbon-related peaks in the differential capacity (dQ/dV) profiles, indicating that the carbon does not participate in redox reactions within the cell (Wang et al., 2022).

As shown in Figure 5, the discharge capacities of Zn/ZnO@C foam at current densities of 50, 100, 500, and 1000 mA g⁻¹ were 1929, 615, 371, and 225 mAh g⁻¹, respectively. When the current was reduced back to 50 mA g⁻¹, the capacity quickly recovered to 964 mAh g⁻¹, demonstrating excellent rate reversibility and structural integrity. In contrast, the pristine Zn/ZnO foam delivered lower discharge capacities of 1445, 533, 292, and 174 mAh g⁻¹ at the same respective current densities, and showed a lower recovery capacity of 811 mAh g⁻¹ when returned to 50 mA g⁻¹. The performance degradation observed in Zn/ZnO foam can be attributed to increased internal resistance and structural instability under rapid charge/discharge cycling, which may lead to mechanical degradation and loss of electrochemical active sites. By comparison, the good electrochemical performance of Zn/ZnO@C foam is ascribed to the uniform carbon coating that enhances electronic conductivity and suppresses volume expansion during lithiation/delithiation. This buffering effect not only preserves the electrode's structural integrity but also facilitates ion/electron transport, resulting in higher specific capacities, improved rate capability, and good reversibility. These results confirm

that the introduction of carbon significantly improves the electrochemical kinetics and mechanical stability of Zn/ZnO-based electrodes for lithium-ion batteries (Thauer et al., 2021a).

To benchmark our approach, Table 1 compiles ZnO-based electrodes coated with carbon from different precursors alongside their electrochemical metrics, providing direct context that our PEO-derived Zn/ZnO@C foam delivers competitive or superior performance.

Table 1. Comparison of ZnO-based anodes with carbon coatings from different precursors.

Sample	Carbon Source / Coating Method	Capacity After 100 Cycles (mAh/g)	Current Density	Bare ZnO after 100 cycles (mAh/g)	DOI / Reference
ZnO/C (from zinc glycerolate)	Calcination of zinc glycerolate in N ₂	300	100 mA/g	100	(Thauer et al., 2021b)
ZnO/C microspheres	Sol-gel + calcination	490	100 mA/g	360	(Guo et al., 2020)
ZnO/C	Atomic layer deposition	430	200 mA/g	200	(Y. Li et al., 2017)
ZnO/C microspheres	ZnO nanorods coated with carbon nanotubes	330 (50 cycles)	0.25C	-	(J. Liu et al., 2009)
Zn/ZnO@C foam (coated)	Dip coating with PEO + pyrolysis	380	50 mA/g	100	This work

5. Conclusion

In summary, a carbon-coated Zn/ZnO anode was successfully fabricated on Zn foam via thermal oxidation followed by carbonization, and demonstrated as a three-dimensional (3D) structured material for lithium-ion batteries (LIBs). Structural and compositional analyses using XRD, SEM, SEM-EDS, and FTIR confirmed the successful formation of the carbon-coated ZnO on the 3D foam substrate. The interconnected porous architecture provided a high surface area that enhanced electrolyte accessibility and shortened lithium-ion diffusion paths. Additionally, the carbon layer effectively buffered the large volume changes of ZnO during cycling and improved its intrinsic electronic conductivity. As a result, the Zn/ZnO@C electrode delivered significantly improved electrochemical performance, achieving a stable capacity of approximately 380 mAh g⁻¹ at 50 mA g⁻¹ after 100 cycles, compared to only ~100 mAh g⁻¹ for the uncoated Zn/ZnO electrode under the same conditions. This substantial enhancement highlights the potential of carbon-coated Zn/ZnO foams as promising anode materials for next-generation high-performance LIBs.

6. Supplementary Materials: No supplementary materials.

7. Author Contribution:

Author Contributions: Conceptualization - A.N., A.M.; methodology – A.N., N.I.; software, - Y.S.; validation - Y.S., M.A., Z.B.; formal analysis - Z.B., A.N., A.M.; investigation - Y.S., M.A.; resources - Z.B., A.N., A.M.; data curation - Y.S., M.A.; writing - original draft preparation - Y.S., N.I.; writing - review and editing - N.I., Z.B., A.N., A.M.; visualization - Y.S., N.I., M.A.; supervision - N.I., A.N., A.M.; project administration - A.M.; funding acquisition - A.N., A.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information:

Serik, Yerzhigit - research assistant, National Laboratory Astana, Kabanbay Batyr Ave. 53, Astana, Kazakhstan. Department of Chemistry, Eurasian National University, Satpayev St. 2, Astana, Kazakhstan, 010000; email: yerzhigit.serik@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0002-0222-9872>

Issatayev, Nurbolat - researcher, Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering and Digital Sciences, Nazarbayev University, Kabanbay Batyr Ave. 53, Astana, Kazakhstan, 010000; nurbolat.issatayev@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4988-4014>

Arkharbekova, Moldir - research assistant, National Laboratory Astana, Kabanbay Batyr Ave. 53, Astana, Kazakhstan. Department of Chemistry, Eurasian National University, Satpayev St. 2, Astana, Kazakhstan, 010000; email: moldir.arkharbekova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0002-4939-3645>

Bakenov, Zhumabay - Professor, National Laboratory Astana, Kabanbay Batyr Ave. 53, Astana, Kazakhstan. Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering and Digital Sciences, Nazarbayev University, Kabanbay Batyr Ave. 53, Astana, Kazakhstan. Institute of Batteries, Kabanbay Batyr Ave. 53, Astana, Kazakhstan, 010000; email: Zbakenov@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2781-4955>

Nurpeissova, Arailym - leading researcher, National Laboratory Astana, Kabanbay Batyr Ave. 53, Astana, Kazakhstan. Institute of Batteries, Kabanbay Batyr Ave. 53, Astana, Kazakhstan, 010000; email: arailym.nurpeissova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9657-2964>

Mukanova, Aliya - leading researcher, National Laboratory Astana, Kabanbay Batyr Ave. 53, Astana, Kazakhstan. Institute of Batteries, Kabanbay Batyr Ave. 53, Astana, Kazakhstan, 010000; email: aliya.mukanova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1171-176X>

9. Funding: This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP19578472 and BR21882402).

10. Acknowledgements: The authors would like to express their gratitude to the Core Facility of Nazarbayev University for granting access to the characterization equipment.

11. Conflicts of interest: The authors declare no conflicts of interest.

12. References

1. Abdelrazek, E.M., Abdelghany, A.M., Badr, S.I., Morsi, M.A. (2018). Structural, optical, morphological and thermal properties of PEO/PVP blend containing different concentrations of biosynthesized Au nanoparticles. *Journal of Materials Research and Technology* 7(4), 419–431. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.06.009>
2. Arinova, A., Kalimuldina, G., Nurpeissova, A., Bakenov, Z. (2023). Electrophoretic Deposition of Poly(ethylene oxide) Gel-Polymer Electrolyte for 3D NiO/Ni Foam Anode Based Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society* 170(10), 100501. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/acfe3e>
3. Bai, Z., Zhang, Y., Fan, N., Guo, C., Tang, B. (2014). One-step synthesis of ZnO@C nanospheres and their enhanced performance for lithium-ion batteries. *Materials Letters* 119, 16–19. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.12.060>
4. Belliard, F., Irvine, J.T.S. (2001). Electrochemical performance of ball-milled ZnO±SnO₂ systems as anodes in lithium-ion battery. *Journal of Power Sources* 97-98, 219-222. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00544-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00544-4)
5. Cai, Z., Ou, Y., Wang, J., Xiao, R., Fu, L., Yuan, Z., Zhan, R., Sun, Y. (2020). Chemically resistant Cu–Zn/Zn composite anode for long cycling aqueous batteries. *Energy Storage Materials* 27, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.01.032>
6. Chou, H.S., Yang, K.Di, Xiao, S.H., Patil, R.A., Lai, C.C., Vincent Yeh, W.C., Ho, C.H., Liou, Y., Ma, Y.R. (2019). Temperature-dependent ultraviolet photoluminescence in hierarchical Zn, ZnO and ZnO/Zn nanostructures. *Nanoscale* 11(28), 13385–13396. <https://doi.org/10.1039/c9nr05235f>
7. Ding, Y., Sun, J., Liu, X. (2019). Carbon-decorated flower-like ZnO as high-performance anode materials for Li-ion batteries. *Ionics* 25(9), 4129–4136. <https://doi.org/10.1007/s11581-019-02981-y>

8. Gachot, G., Grugeon, S., Armand, M., Pilard, S., Guenet, P., Tarascon, J. M., Laruelle, S. (2008). Deciphering the multi-step degradation mechanisms of carbonate-based electrolyte in Li batteries. *Journal of Power Sources* 178(1), 409–421. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.110>
9. Ghosh, M., Raychaudhuri, A.K. (2008). Ionic environment control of visible photoluminescence from ZnO nanoparticles. *Applied Physics Letters* 93(12). <https://doi.org/10.1063/1.2987479>
10. Hao, X.P., Xu, Z., Li, C.Y., Hong, W., Zheng, Q., Wu, Z.L. (2020). Kirigami-Design-Enabled Hydrogel Multimorphs with Application as a Multistate Switch. *Advanced Materials* 32(22). <https://doi.org/10.1002/adma.202000781>
11. Huang, X.H., Xia, X.H., Yuan, Y.F., Zhou, F. (2011). Porous ZnO nanosheets grown on copper substrates as anodes for lithium ion batteries. *Electrochimica Acta* 56(14), 4960–4965. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.03.129>
12. Issatayev, N., Abdumutaliyeva, D., Tashenov, Y., Yeskozha, D., Seipiyev, A., Bakenov, Z., Nurpeissova, A. (2024). Three-dimensional carbon coated and high mass-loaded NiO@Ni foam anode with high specific capacity for lithium ion batteries. *RSC Advances* 14(54), 40069–40076. <https://doi.org/10.1039/d4ra07119k>
13. Issatayev, N., Adylkhanova, A., Salah, M., Bakenov, Z., Kalimuldina, G. (2024). Room temperature growth of NiS hierarchical nanoflowers on the flexible electrode surface as a cathode for lithium-ion batteries. *Materials Letters* 354. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135341>
14. Issatayev, N., Nuspeissova, A., Kalimuldina, G., Bakenov, Z. (2021). Three-dimensional foam-type current collectors for rechargeable batteries: A short review. *Journal of Power Sources Advances* 10. <https://doi.org/10.1016/j.powera.2021.100065>
15. Khac, V., Bui, H., Pham, T.N., Hur, J., Lee, Y.-C., Bui, V.K.H., Pham, T.N., Hur, J., Lee, Y., Julien, C.M. (2021). Review of ZnO Binary and Ternary Composite Anodes for Lithium-Ion Batteries. <https://doi.org/10.3390/nano>
16. Kumar, K.K., Ravi, M., Pavani, Y., Bhavani, S., Sharma, A.K., Narasimha Rao, V.V.R. (2014). Investigations on PEO/PVP/NaBr complexed polymer blend electrolytes for electrochemical cell applications. *Journal of Membrane Science* 454, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.12.022>
17. Li, N., Jin, S.X., Liao, Q.Y., Wang, C.X. (2014). ZnO anchored on vertically aligned graphene: Binder-free anode materials for lithium-ion batteries. *ACS Applied Materials and Interfaces* 6(23), 20590–20596. <https://doi.org/10.1021/am507046k>
18. Lin, J.H., Huang, Y.J., Su, Y.P., Liu, C.A., Devan, R.S., Ho, C.H., Wang, Y.P., Lee, H.W., Chang, C.M., Liou, Y., Ma, Y.R. (2012). Room-temperature wide-range photoluminescence and semiconducting characteristics of two-dimensional pure metallic Zn nanoplates. *RSC Advances* 2(5), 2123–2127. <https://doi.org/10.1039/c2ra00972b>
19. Liu, J., Li, Y., Huang, X., Li, G., Li, Z. (2008). Layered double hydroxide nano- and microstructures grown directly on metal substrates and their calcined products for application as Li-ion battery electrodes. *Advanced Functional Materials* 18(9), 1448–1458. <https://doi.org/10.1002/adfm.200701383>
20. Liu, Y., Zhu, Y., Cui, Y. (2019). Challenges and opportunities towards fast-charging battery materials. *Nature Energy* 4(7), 540–550. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0405-3>
21. Pramanik, S., Das, S., Karmakar, R., Irsad Ali, S., Mukherjee, S., Dey, S., Chandra Mandal, A., Meikap, A.K., Kuiri, P.K. (2023). Enhancement of UV luminescence in Zn/ZnO nanocomposites synthesized by controlled thermal oxidation of Zn nano-octahedrals. *Journal of Luminescence* 257. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.119746>
22. Rahdar, A., Aliahmad, M., Azizi, Y. (2015). NiO Nanoparticles: Synthesis and Characterization. *JNS* 5.
23. Shen, X., Mu, D., Chen, S., Wu, B., Wu, F. (2013). Enhanced electrochemical performance of ZnO-loaded/porous carbon composite as anode materials for lithium ion batteries. *ACS Applied Materials and Interfaces* 5(8), 3118–3125. <https://doi.org/10.1021/am400020n>

24. Song, R., Zhang, N., Dong, H., Wang, P., Ding, H., Wang, J., Li, S. (2022). Self-standing three-dimensional porous NiO/Ni anode materials for high-area capacity lithium storage. *Materials and Design* 215. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110448>
25. Srinivasa, N., Hughes, J.P., Adarakatti, P.S., Manjunatha, C., Rowley-Neale, S.J., Ashoka, S., Banks, C.E. (2021). Facile synthesis of Ni/NiO nanocomposites: The effect of Ni content in NiO upon the oxygen evolution reaction within alkaline media. *RSC Advances* 11(24), 14654–14664. <https://doi.org/10.1039/d0ra10597j>
26. Tarascon, J.-M., Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries.
27. Thauer, E., Zakharova, G.S., Andreikov, E.I., Adam, V., Wegener, S.A., Nölke, J.H., Singer, L., Ottmann, A., Asyuda, A., Zharnikov, M., Kiselkov, D.M., Zhu, Q., Puzyrev, I.S., Podval'naya, N.V., Klingeler, R. (2021). Novel synthesis and electrochemical investigations of ZnO/C composites for lithium-ion batteries. *Journal of Materials Science* 56(23), 13227–13242. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06125-4>
28. Tleukenov, Y.T., Kalimuldina, G., Arinova, A., Issatayev, N., Bakenov, Z., Nurpeissova, A. (2022). Polyacrylonitrile-Polyvinyl Alcohol-Based Composite Gel-Polymer Electrolyte for All-Solid-State Lithium-Ion Batteries. *Polymers* 14(23). <https://doi.org/10.3390/polym14235327>
29. Wang, X., Wang, Y., Wu, M., Fang, R., Yang, X., Wang, D.W. (2022). Ultrasonication-assisted fabrication of porous ZnO@C nanoplates for lithium-ion batteries. *Microstructures* 2(3). <https://doi.org/10.20517/microstructures.2022.11>
30. Zhang, X.Q., Cheng, X.B., Chen, X., Yan, C., Zhang, Q. (2017). Fluoroethylene Carbonate Additives to Render Uniform Li Deposits in Lithium Metal Batteries. *Advanced Functional Materials* 27(10). <https://doi.org/10.1002/adfm.201605989>

3D Zn/ZnO@C анодын алу үшін қарапайым термиялық тотығу және көміртеппен қаптау әдісі

Ержігіт Серік, Нұрболат Исатаев, Молдир Архарбекова, Жумабай Бакенов, Арайлым Нұрпейсова, Алия Муканова

Аңдатпа. Қазіргі таңда литий-иондық батареялар (LIBs) үшін жоғары өнімді және тұрақты анодтық материалдарды дамыту – өзекті ғылыми мәселелердің бірі. Бұл жұмыста термиялық тотығу және көміртектендіру әдістері арқылы Zn/ZnO негізіндегі үшөлшемді (3D) көбік тәрізді анод синтезделіп, оның беті полиэтиленоксид (PEO) арқылы көміртеппен қапталды. Электродтың құрылымы мен құрамы XRD, SEM, EDS және FTIR әдістері арқылы сипатталды. Үшөлшемді кеуекті құрылым литий иондары мен электрондардың тасымалын жақсарта отырып, көлемдік кеңеюдің әсерін азайтады. Көміртеп қабаты ZnO-ның электрөткізгіштігін арттырып, цикл кезінде оның құрылымдық тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Электрохимиялық зерттеу нәтижелері Zn/ZnO@C электродының 100 циклдан кейін $50 \text{ mA} \cdot \text{g}^{-1}$ ток тығыздығында шамамен $380 \text{ mA} \cdot \text{saғ} \cdot \text{g}^{-1}$ сыйымдылықты тұрақты сақтайтынын көрсетті, ал көміртеппен қапталмаған Zn/ZnO аноды тек $\sim 100 \text{ mA} \cdot \text{saғ} \cdot \text{g}^{-1}$ көрсетті. Алынған нәтижелер көміртеппен қапталған Zn/ZnO көбік анодтарының болашақ жоғары өнімді литий-иондық батареялар үшін перспективалы материал екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: литий-ионды батареялар; электрод материалдары; энергия сақтау жүйелері; электрохимия.

Простая стратегия термического окисления и нанесения углеродного покрытия для получения 3D анода Zn/ZnO@C

Ержигит Серик, Нурболат Исатаев, Молдир Архарбекова, Жумабай Бакенов, Арайлым Нурпейсова, Алия Муканова

Аннотация: В настоящее время разработка высокоэффективных и стабильных анодных материалов для литий-ионных батарей (LIBs) является актуальной научной задачей. В данной работе методом термического окисления и карбонизации был синтезирован анод на основе Zn/ZnO в виде трёхмерной (3D) пористой пены, поверхность которого была покрыта углеродом с использованием полиэтиленоксида (PEO) в качестве прекурсора. Структура и состав электрода были охарактеризованы методами XRD, SEM, EDS и FTIR. Трёхмерная пористая архитектура способствует улучшенному переносу литиевых ионов и электронов, а также снижает влияние объёмного расширения. Углеродное покрытие повышает электропроводность ZnO и обеспечивает структурную стабильность материала в процессе циклирования. Электрохимические испытания показали, что электрод Zn/ZnO@C сохраняет стабильную удельную ёмкость около 380 мА·ч/г после 100 циклов при плотности тока 50 мА/г, тогда как необработанный электрод Zn/ZnO продемонстрировал лишь ~100 мА·ч/г. Полученные результаты подтверждают перспективность пеноматериалов Zn/ZnO с углеродным покрытием в качестве анодных материалов для литий-ионных батарей нового поколения.

Ключевые слова: литий-ионные батареи; электродные материалы; системы накопления энергии; электрохимия.

От наблюдений к анализу: полевые исследования как первый этап изучения русловых изменений

Жулдыз Ержанова^{1*}, Талгат Таукенов², Меруерт Мусабаева¹, Габит Есимбеков¹

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан; zhuldyz.yerzhanova@gmail.com; musabaeva_meruert@mail.ru; gabitnisa@gmail.com

²Программа развития ООН в Казахстане; talgattaukenov@gmail.com

*Корреспонденция: zhuldyz.yerzhanova@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты летних полевых исследований 2024–2025 годов по изучению русловых процессов на реке Есиль в пределах Акмолинской области. Основная цель исследования заключалась в выявлении на космических снимках участков с русловыми деформациями и их подтверждение данными полевых наблюдений. Всего на исследуемом отрезке русла протяженностью более 500 км было выделено 17 ключевых участков, из которых подробно рассмотрены 5 репрезентативных. Впервые для данной территории проведен анализ морфологических признаков и определены типы русловых процессов в соответствии с гидроморфологической теорией руслового процесса, разработанной Государственным гидрологическим институтом РФ. Полевые исследования позволили выявить основные участки, наиболее подверженные к размыву и подготовить детальное описание береговой линии исследуемой реки и инженерных сооружений. Результаты включают как качественные характеристики (описание морфологии русла, определение типов русловых процессов), так и количественные данные (высота, ширина и протяженность размываемых берегов, параметры дорожного полотна). Выявлен тип руслового процесса с повышенной эрозионной опасностью, представляющий существенные риски для инженерных сооружений и населенных пунктов. Сопоставление данных дистанционного зондирования с результатами полевых наблюдений показало высокую эффективность комплексного подхода для уточнения масштаба и характера русловых изменений. Полученные результаты создают основу для разработки комплексной методики мониторинга береговых линий рек и будут использованы при подготовке диссертации по исследованию возможностей применения данных дистанционного зондирования Земли при выявлении и мониторинге русловых процессов.

Цитирование:

Ержанова, Ж., Таукенов, Т., Мусабаева, М., Есимбеков, Г. (2025). От наблюдений к анализу: полевые исследования как первый этап изучения русловых изменений. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 152(3), 104-121. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-104-121>

Академический редактор:
Н.Е. Рамазанова

Поступила: 19.09.2025
Исправлена: 25.09.2025
Принята: 27.09.2025
Опубликована: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Ключевые слова: река Есиль, полевые методы исследований, русловые и эрозионные процессы, эрозия береговых линий, речная эрозия, дистанционное зондирование

1. Введение

Одним из наиболее значимых проявлений русловых процессов, представляющих опасность, являются размывы берегов рек, которые создают как непосредственную опасность (Yusicheva et al., 2022), так и потенциальные риски, связанные с освоением пойменных территорий. В этом контексте изучение динамики русловых процессов и сопутствующих им опасных явлений, способных негативно повлиять на хозяйственное использование и экологию приречных территорий, приобретает особую актуальность.

В настоящее время при изучении русловых процессов активно применяются методы экспертного анализа космических и ортофотоснимков по их дешифровочным признакам (Mandal, 2017; Wu et al., 2023; Taukenov et al., 2018; Ballanti et al., 2017; Dragičević et al., 2017; Nath et al., 2024). Широкую популярность приобретают исследования на основе полуавтоматизированных и автоматизированных методов дешифрирования с применением специализированных программных обеспечений и машинного обучения (Tobón-Marín, 2020; Boothroyd et al., 2021; Gonzales-Inca et al., 2022; Wang et al., 2023; Sultana et al., 2025; Gharti et al., 2025). Однако, несмотря на широкие возможности дистанционных методов, полевые исследования остаются необходимым этапом, целью которого является верификация проявлений русловых деформаций (Gharti et al., 2025; Nath et al., 2024).

В работе Mandal S., посвященной оценке смещения берегов реки Ганг (Индия) в районе города Мальда и потери сельскохозяйственных угодий, полевые данные, включая визуальные наблюдения и расчет индекса ВЕНІ (Bank Erosion Hazard Index), легли в основу анализа эрозионной опасности данной реки. Методология ВЕНІ включала в себя измерения высот берега, уклонов, глубины корней, плотности корней и степень покрытия берега растительностью в % (Mandal, 2017).

Комплексный подход к изучению временных и пространственных изменений реки Барак (Индия) представлен в работе Apurba Nath и Susmita Ghosh, где анализ трансформаций береговых форм и изменений в структуре землепользования и растительного покрова был основан на сочетании дистанционного зондирования и полевых наблюдений. Полевые наблюдения позволили авторам выявить как участки, наиболее подверженные водной эрозии, так и относительно стабильные зоны, установить степень эрозионной активности, а также подтвердить влияние антропогенной деятельности на русловую динамику (Nath et al., 2024).

В исследовании Gharti и др. для оценки пространственно-временной динамики русла реки Уэст-Рапти (Непал) был применен метод поперечных сечений, позволивший выявить участки интенсивных русловых деформаций. Полевые наблюдения на этих участках способствовали классифицировать типы русловых процессов, идентифицировать зоны зарастания старых русел, а также подтверждать эффективность инженерных сооружений, стабилизирующих поток. Таким образом, сочетание методов дистанционного зондирования и ГИС-анализа, поперечных сечений и полевой верификации обеспечило комплексное понимание русловой деформации и ее геоэкологических последствий (Gharti et al., 2025).

В работе Кузнецовой и др., посвященной количественной оценке размыва берегов небольшого горного ручья в России, ключевую роль сыграли натурные измерения с использованием штыревого метода (erosion pins). Трехкратные полевые наблюдения позволили определить линейные показатели размыва, выявить различия в подверженности пород эрозионным процессам, а также количественно оценить вклад одного сильного паводка в общий объем эродированного материала. В дополнение к прямым измерениям применялась фотофиксация, позволившая визуально зафиксировать изменения морфологии склонов и уточнить причины исчезновения штырей на отдельных участках (Kuznetsova et al., 2019).

В исследовании Алексовой и др. по исследованиям рек Северной Македонии подчеркивается, что данные дистанционного зондирования и пространственного моделирования требуют обязательной полевой верификации для повышения достоверности оценки природных рисков. Авторы отмечают, что без натурных наблюдений невозможно

учесть локальные геоморфологические и социальные особенности, критически важные при интерпретации многорисковых зон (Aleksova et al., 2024).

Полевые наблюдения, проведенные Вешкурцевой на реке Ишим в пределах Российской Федерации, позволили выявить ключевые участки активного оврагообразования, зарастания и заиления русла. Рекогносцировка местности показала, что данные процессы обусловлены как естественными причинами (оползни на песчаных, слабо закрепленных берегах), так и антропогенным воздействием, включая строительство плотин и мостовых переходов, влияющих на гидрологический режим и способствующих деградации русла. Это подчеркивает важность полевых наблюдений для диагностики русловых деформаций и уточнения факторов их формирования (Veshkurtseva, 2008).

Воробьев и Кадыров в ходе полевых исследований русла реки Оки (Россия) в 2014–2018 гг. применили метод простых реперов для оценки линейных скоростей береговой эрозии. Натурные наблюдения позволили с высокой точностью зафиксировать отступление берегов на различных участках и проследить динамику русловых деформаций во времени. Авторы подчеркивают, что использование простых реперов остается эффективным и доступным способом мониторинга эрозионных процессов, особенно при многолетних исследованиях, требующих надежных данных о реальной динамике береговой линии (Vorob'ev et al., 2020).

В исследовании Акияновой и др. дана количественная оценка антропогенной трансформации морфологических элементов долин рек Есиль и Нура на основе совмещения дистанционного зондирования и полевых наблюдений. Полевой этап включал аэрофотосъемку с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) Phantom 4, GNSS-съемку с приемником Trimble R8, а также верификацию участков с характерными формами рельефа в долинах. Работа демонстрирует эффективность применения полевых методов для пространственной привязки и уточнения результатов анализа космических снимков, особенно в условиях антропогенно-модифицированных ландшафтов (Akiyanova et al., 2019).

Как показывает анализ литературы, несмотря на существующие различия в методиках полевых исследований, именно натурные наблюдения остаются основой для достоверной оценки и выявления плановых деформаций русел и смещений береговой линии рек. Авторы Mussina и др. отмечают, что исследования русловых деформаций в Казахстане находятся на начальной стадии, в значительной степени фрагментированы. Также, по мнению авторов, при исследовании русловых деформаций горной реки Улкен Алматы отсутствие данных полевых исследований, наряду с другими ограничениями, могут повлиять на точность и достоверность результатов долгосрочных прогнозов (Mussina et al., 2025).

Настоящая работа представляет результаты полевого этапа научного исследования, проведенного в 2024 и 2025 годах на реке Есиль, с целью верификации признаков русловых процессов на ключевых участках путем натурных наблюдений, сопоставленных с космическими снимками и теоретическими положениями. Исследование направлено на уточнение фактических проявлений русловых деформаций на космических снимках и является попыткой восполнить дефицит полевых данных в научных исследованиях реки Есиль. Мы предполагаем, что комплексный подход к изучению русловых процессов на основе данных дистанционного зондирования Земли и полевых наблюдений позволит не только достоверно выявлять участки русловых деформаций реки Есиль, но и определять природные и антропогенные факторы их развития.

2. Материалы и методы

Район исследований. Объектом исследования является река Есиль в пределах Акмолинской области. Есиль представляет собой трансграничный водоток и является одним из левых крупных притоков Иртыша на территории Российской Федерации, ее общая протяженность составляет 2450 км, площадь водосбора 177000 км². В верховьях, на территории исследований, Есиль протекает в узкой долине со скалистыми берегами, ниже г.

Астаны заметно расширяется и приобретает черты широкопойменной реки с многочисленными излучинами и старицами. В 50 км к востоку от столицы находится Астанинское водохранилище, оказывающее влияние на гидрологический режим реки Есиль. Сток реки характеризуется как неоднородный в течение гидрологического года и по годам. Половодье приходится на период апрель-май, в этот период формируется 85-95% годового стока. Питание преимущественно снеговое. Основные притоки Есиля в пределах Акмолинской области: правые – Колутон, Жабай, Акканбурлык; левые – Терисаккан (Ongdas et al., 2020).

Методы исследований. Для предварительного выделения потенциальных участков с русловыми деформациями на реке Есиль были использованы космические снимки ГИС сервиса Google Earth Pro. Данный сервис собирает и предоставляет космические снимки (World View 1 и 2, SPOT 6,7 и др.) от разных поставщиков, что обеспечивает их высокое пространственное разрешение (до 0,6 м для панхроматического и 2-2,4 м для мультиспектрального канала). В исследуемой территории снимки представлены Maps Data: Google, CNES/Airbus от 12.06.2024, 06.07.2023, 05.08.2022 и 01.05.2015 гг. Эти данные позволяют детально анализировать структуру русла, выявлять излучины, бровки размывов, старицы и антропогенные элементы, что послужило основой для выбора ключевых участков для полевых исследований. Для анализа использовались разновременные снимки, преимущественно полученные в периоды низкой межени для дешифрирования русла, границы поймы уточнялись по материалам съемок, выполненных во время половодий и паводков.

Дешифровочные признаки русловых деформаций были составлены с учетом «Рекомендаций по использованию аэрокосмической информации при изучении руслового процесса» (Snishchenko et al., 1985) с актуализацией в 2021 г. и дополнены отдельными характеристиками размываемых берегов на основе современных исследований Р. С. Чалова в области морфодинамики речных русел (Chalov et al., 2023; Chalov, 2011). Размывы береговой линии рек по космическим снимкам определяются следующими признаками:

- зонам размыва должна соответствовать четко выраженная бровка берега, крутой береговой откос, лишенный растительности, со следами недавних обрушений (ключевые участки 1, 2, 3, 5);

- наличие излучин: угол подхода стрежня потока к берегу: чем он больше, тем больше скорость размыва (меандры). В прямолинейном русле стрежень потока располагается в его центральной части, к берегам скорость потока снижается. В этих условиях берега не размываются;

- расширение русла: в разветвленном русле при отмирании протоки поток сосредоточивается в одном из них, где наблюдается усиление размывов берегов и общее расширение русла;

- у разветвленных на рукава рек (русловые протоки) размываются и острова, и берега рек (ключевой участок 1);

- наличие островов и формирование отмелей: при большом стоке наносов и на реках с галечным аллювием у оголовков островов либо обособленно в русле формируется отмель (ключевой участок 1);

- в отмирающем рукаве (при незавершенном меандрировании) преобладают процессы аккумуляции, размывы локализуются на коротких участках, в развивающемся рукаве (излучине) преобладает размыв русла, протяженность размываемых берегов возрастает;

- в относительно прямолинейном, неразветвленном русле наблюдается слабый размыв одного, обычно незатопляемого в половодье берега, тогда как противоположный пойменный – отлогий, возле него происходит аккумуляция наносов. На небольших реках с таким руслом берега вообще часто не размываются, так как из-за малого стока наносов прирусловые отмели не формируются (ключевой участок 5);

- зоны подтопления и изменения водного зеркала, на снимках могут быть видны зоны регулярного или временного затопления прилегающих к реке территорий (ключевой участок 3);

- антропогенные факторы (дорожные насыпи в пойме, дамбы, мосты, добыча песка или гравия), урбанизированные территории, нижние бьефы водохранилищ (за счет прохождения волн попусков – искусственных сбросов воды) (ключевые участки 2,3,4).

Ключевыми участками для проведения полевых исследований были выбраны участки русла реки Есиль в районах автомобильных мостов и населенных пунктов, где река протекает в непосредственной близости к жилым домам и другим строениям. Это обусловлено необходимостью детального анализа влияния русловых процессов на инфраструктуру и обеспечения безопасности данных объектов.

Определение типов русловых процессов осуществлялось по классификации и признакам, предложенной Государственным гидрологическим институтом России (ГГИ) в рамках гидроморфологической теории руслового процесса (Kondrat'ev et al., 1982). Участки с прямолинейной формой русла, не выделенные как самостоятельный тип по ГГИ, были классифицированы по схеме Р.С. Чалова, согласно которой данные участки относятся к типу прямолинейных русел, формирующихся под контролем коренного берега или инженерных сооружений (Chalov, 2011). При этом применялся метод экспертного дешифрирования космических снимков и полевых данных, поскольку методы автоматизированного дешифрирования для данной задачи пока не разработаны. Процесс дешифрирования подразделяют на этапы:

1. Первый этап – обнаружение русла с его внутрирусловыми образованиями, выделение поймы и долины;

2. Второй этап – описание типа руслового процесса. Определяются признаки, далее они группируются и опознается тип руслового процесса.

3. Третий этап – анализ руслового процесса на участке реки, включая антропогенную деятельность (Snishchenko et al., 1985).

После анализа космических снимков и определения ключевых участков был проведен полевой этап исследования. Маршруты были запланированы с учетом дорожной сети и условий проходимости местности. В ходе работ применялись методы наблюдений, фотосъемка и простые линейные измерения на доступных участках русла. Метод наблюдений был направлен на сбор визуальных данных для выявления текущих изменений в русле реки и процессов, происходящих на берегах (отложение наносов, изменения направления течения, обрушение берегов, формирование островков и др.). На различных участках, в том числе около мостов и населенных пунктов, проводилась визуальная оценка состояния береговой линии и русла реки Есиль. Фиксировались особенности русловых процессов, определялись зоны наиболее активной эрозии и аккумуляции наносов.

Фотосъемка состояния русла и берегов с координатной привязкой необходима для документирования и последующего анализа, выявления динамики изменений при систематических наблюдениях, а также для использования в отчетных материалах и научных публикациях. При благоприятных погодных условиях выполнялась аэрофотосъемка с использованием БПЛА. Линейные измерения (высота бровки берега, протяженность размываемого берега, ширина дорожного полотна) выполнялись непосредственно на местности с использованием измерительной рулетки с точностью до 0,1 м.

В полевых исследованиях использовались смартфон Oukitel G1 с GPS датчиком и навигационной ГИС программой QField, для качественной фотосъемки применялись смартфон, зеркальный фотоаппарат Nikon D3100 и БПЛА DJI Mavic 2 Pro. Линейные измерения проводились с использованием мерных лент. Программные обеспечения: Google Earth Pro и QField (бесплатное open-source приложение для сбора и редактирования полевых данных для QGIS на смартфоне или планшете, работающее и офлайн при условии предварительной загрузки маршрутов).

3. Результаты

Исследуемый отрезок русла реки Есиль от села Ижевское Аршалынского района до г. Державинск составляет около 525 км по руслу. Всего по результатам дешифрирования космических снимков и полевых исследований было выделено 17 ключевых участков русла реки. В данной статье представлен анализ 5 репрезентативных участков, которые демонстрируют различные типы русловых процессов и условия взаимодействия с инфраструктурой (рисунок 1). Остальные участки в дальнейшем будут использованы для обобщения характеристик и верификации полученных результатов.

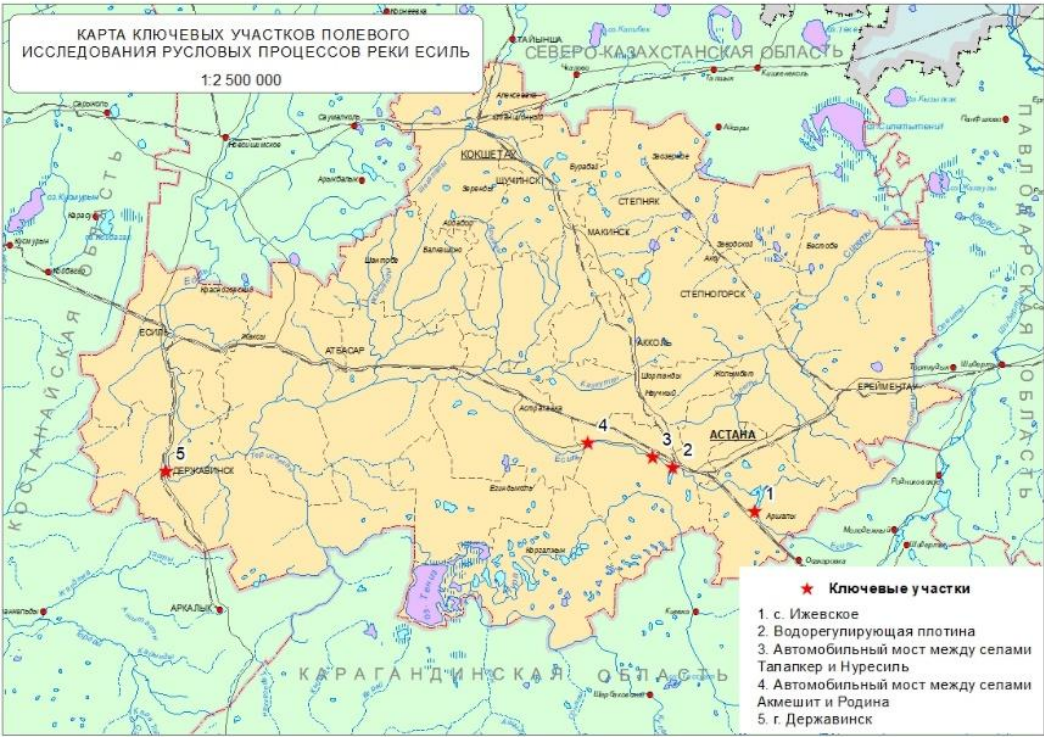


Рисунок 1. Карта ключевых участков полевого исследования русловых процессов реки Есиль (Источник: составлено авторами)

Для систематизации собранных материалов был составлен сводный журнал наблюдений (Таблица 1), представляющий собой аналог полевого дневника. Такая структура позволила объединить результаты дешифрирования космических снимков и полевых исследований в единую базу данных, которая обеспечивает сопоставимость и возможность последующего анализа.

Таблица 1. Сводный журнал наблюдений по ключевым участкам реки Есиль

№	Название участка/Дата проведения полевых наблюдений	Координаты (широта, долгота)	Признаки ключевого участка	Тип руслового процесса	Инфраструктурные объекты поблизости	Опасности для объектов
1	Ключевой участок 1 – с. Ижевское (выше Астанинского водохранилища)	50°52'36" с.ш. 72°09'29" в.д.	береговой откос, лишенный растительности, разветвление русла на	русловая многорукавность	жилые дома, столбы и линии электропередач	заиление и зарастание растительностью островов, потенциальное разрушение

	ща) 24.07.2025 г.		рукава, наличие островов. Дата снимка: 12.06.2024			левой береговой линии
2	Ключевой участок 2 – водорегулиру- ющая плотина 06.07.2025 г.	51°09'51" с.ш. 71°21'29" в.д.	береговой откос, лишенный растительно- сти, антропогенн- ые факторы: плотин. Дата снимка: 12.06.2024	прямолинейное неразветвленное русло	дачный массив	потенциальное разрушение береговой линии
3	Ключевой участок 3 - мост между сёлами Талапкер и Нурсиль 13.07.2024 г	51°13'54" с.ш. 71°09'22" в.д.	выраженная извилистая бровка берега, береговой откос, лишенный растительно- сти, антропогенн- ые факторы: мост. Дата снимка: 06.07.2023	пойменная многорукавность	дорожное полотно, мост автомобиль- ный, пешеходный	потенциальное разрушение береговой линии выше моста
4	Ключевой участок 4 - дорожное полотно между сёлами Акмешит и Родина 27.07.2024 г 13.07.2025 г	51°19'30" с.ш. 70°31'9" в.д.	антропогенн- ые факторы: мост. Дата снимка: 06.07.2023	пойменная многорукавность, правая протока с элементами свободного меандрирования, незавершенное меандрирование	дорожная насыпь, водопротек- ное сооружение	потенциальное разрушение насыпной части автодороги и водопротекного сооружения, подтопление дорожной насыпи
5	Ключевой участок 5 - г. Державинск 29.07.2024 г	51°05'39" с.ш. 66°19'43" в.д.	прямолиней- ное неразветвле- нное русло, выраженная бровка берега, береговой откос, лишенный растительно- сти.	Ограниченное меандрирование, свободное меандрирование	пойменные луга	потенциальная размыва береговой линии

			Дата снимка: 05.08.2022			
--	--	--	-------------------------------	--	--	--

Участки приведены в порядке расположения по течению реки. Даты полевых наблюдений не соответствуют хронологической последовательности, так как обследования проводились в разные годы; отдельные участки повторно посещались в качестве эталонных.

3.1. Описание ключевых участков

3.1.1. Ключевой участок 1

Согласно предварительному анализу космического снимка, Ключевой участок 1 расположен на берегу реки Есиль в пределах села Ижевское Аршалынского района, выше Астанинского водохранилища. Выше по течению русло реки протекает в узкой долине, правый берег которой обрамлен скалистыми выступами. В районе села Ижевское река выходит за пределы скалистых участков, русло расширяется, формируются протоки, осередки и русловые острова. На пойме правого берега определяются старицы, свидетельствующие о прошлых деформациях русла. С левого берега заметны небольшие овраги, выходящие непосредственно в русло, что указывает на развитие эрозионных процессов (рисунок 2).



Рисунок 2. Ключевой участок 1 – с. Ижевское (Источник: Maps Data: Google, © 2025 CNES/Airbus, 12.06.2024; фотографии авторов)

По результатам полевого обследования в районе села Ижевское был зафиксирован участок реки с широким руслом и умеренной скоростью течения. Осередки и русловые острова, заросшие камышовой растительностью и частично затопленные, формируют систему протоков. Правый берег неоднородный: выше участка сложен коренными породами, ниже по течению, по окончании обнажений скальных пород, русло и пойма расширяются в правую сторону. В расширенной части поймы развиваются кустарниковая и древесная растительность. Левый берег пологий, относительно однородный, расчленен небольшой овражной сетью и локальными размывами береговой линии. Отмечается неустойчивое травянистое покрытие и следы антропогенного воздействия (следы транспортной техники, выпаса скота, рыболовства).

Активные эрозионные процессы выражены слабо, размывы берегов имеют локальный характер. Водная растительность развита в прибрежной полосе и на осередках, что способствует аккумуляции наносов. Совокупность этих признаков позволяет определить данный участок по типу руслового процесса как русловая многоукавность.

3.1.2. Ключевой участок 2

Ключевой участок 2 – водорегулирующая плотина находится в черте города Астаны, в районе Коктал-1 и предназначена для регулирования уровня водной акватории реки Есиль в центральной части города в летний и зимний периоды (Esekej, 2024). В створе гидротехнического сооружения русло реки имеет искусственно спрямленный характер. Выше плотины ширина зеркала воды значительно больше, чем ниже, скорость течения мала, русло затоплено и создается эффект водохранилища. Ниже плотины русло слабокриволинейное, с техногенными насыпями, нарушившие естественный режим (рисунок 3).



Рисунок 3. Ключевой участок 2 – водорегулирующая плотина (Источник: Maps Data: Google, © 2025 CNES/ Airbus, 12.06.2024; фотографии авторов)

Обследованный участок расположен ниже по течению от плотины. Левый берег представлен высоким обрывистым откосом (высота бровки берега до 3 м.) с кустарниковой и луговой растительностью по бровке, фиксируется активный размыв и обрушение грунта. Правый берег имеет антропогенный характер, вдоль него тянутся берегоукрепительные насыпи неравномерные по высоте и сооружена бетонная направляющая дамба, выступающая в русло. Эта дамба отводит основной поток к левому берегу, что усиливает его размыв, а у правого создает зоны ослабленного течения, где происходит заиливание. По типу русловых процессов участок относится к прямолинейному неразветвленному. Однако при прямолинейном плане русла здесь формируются потоки и элементы (пляжи, побочни), характерные для побочного русла. Это является следствием воздействия направляющей дамбы и гидротехнического сооружения. В рамках исследования тип руслового процесса на

данном участке планируется уточнить на основе анализа динамики размыва по разновременным космическим снимкам, включая период до активной застройки и регулирования стока.

3.1.3. Ключевой участок 3

Ключевой участок 3 представляет собой рукав реки под мостом между селами Талапкер и Нуресиль. Для корректного определения типа руслового процесса анализируется не только данный рукав, но и вся пойма рассматриваемого участка. По результатам анализа космических снимков ширина поймы реки составляет 0,5–2,5 км, характеризуется множеством равнозначных рукавов, стариц, протоков и островов (рисунок 4). Наличие этих признаков позволяет отнести данный участок к типу пойменной многоорукавности.



Рисунок 4. Фрагмент космического снимка поймы реки Есиль между селами Талапкер и Нуресиль. (а) – снимок в период летней межени (Источник: Maps Data: Google, © 2025 CNES/ Airbus, 06.07.2023) и (б) - снимок в период весеннего половодья (Источник: Maps Data: Google, © 2025 CNES/ Airbus, 01.05.2015)

Среди множества рукавов и протоков поймы выделяется ключевой участок 3. Русло на данном участке одорукавное, слабоизвилистое, неустойчивое в плане, с отдельными заливами. Берега покрыты густой растительностью, за исключением правого берега у моста, который имеет крутой откос и лишен растительного покрова. На обоих берегах присутствуют дорожная инфраструктура и следы антропогенного воздействия (рисунок 5).



Рисунок 5. Ключевой участок 3 – мост между селами Талапкер и Нуресиль (Источник: Maps Data: Google, © 2025 CNES/ Airbus, 06.07.2023; фотографии авторов)

Полевые наблюдения проводились в июле 2024 г. и 2025 г. В ходе визуального обследования участка реки была зафиксирована выраженная бровка берега и крутой откос, лишенный растительности. Высота берега составляет около 1,4 м, а длина размываемой части около 40 м. Противоположный берег в форме залива не демонстрирует признаков размыва. Правый берег выше по течению подвергается размыву, что подтвердилось во время второго полевого обследования. Остальные участки берегов покрыты камышовой растительностью у уреза воды, за которой следует зона кустарниковой и травянистой растительности. Ниже по течению за мостом наблюдаются насыпи в виде дамб, расположенные вдоль правого берега, левый берег размывается локально.

3.1.4. Ключевой участок 4

На данном космическом снимке выявлена широкая пойменная территория с выраженным антропогенным воздействием в виде автомобильной дороги, пересекающей два протока реки. Ширина поймы достигает до 3 км, ее поверхность неоднородна по характеру растительности и содержит значительное количество стариц и следов прежних русел. В пределах участка русло реки Есиль многорукавное, выделить главный рукав затруднительно. По морфологическим признакам данный отрезок относится к пойменной многорукавности, при этом отдельные рукава могут развиваться по самостоятельному типу руслового процесса (рисунок 6).



Рисунок 6. Ключевой участок 4 – дорожное полотно между селами Акмешит и Родина (Источник: Maps Data: Google, © 2025 CNES/ Airbus, 06.07.2023; фотографии авторов)

При обследовании правого рукава зафиксирована дорожная насыпь, пересекающая протоки, а также водопропускные сооружения с бетонными трубами-кульвертами. Русловые процессы на данном рукаве развиваются по типу свободного меандрирования. Вероятно, протока находится на стадии незавершенного меандрирования, что подтверждается отсутствием полной потери связи русла на излучине. Это состояние обусловило обрушение рыхлой дорожной насыпи выше берегоукрепительных конструкций (бетонных плит), установленных у водопропускных труб. Укрепления выполнены из легкосмываемого грунта, имеются следы размыва. Сила потока оказалась достаточной для разрушения и смыва бетонных элементов с противоположной стороны труб, что привело к образованию в русле каскада из отложенных наносов. Отмечен смыв части дорожной насыпи, что вызвало сужение

дороги. Ширина дорожного полотна в июле 2024 года составляла 8 м, а к июлю 2025 года сократилась до 5 м. Между протоками выявлены участки переброски стока через подземные трубы малого диаметра. Высота дороги составляет около 1,5 м, берега местами подкреплены крупными глыбами. В целом около 50 м дорожного полотна между протоками подвержено размыву.

3.1.5. Ключевой участок 5

В районе г. Державинск резкое изменение направления течения реки Есиль с юго-западного на северное объясняется пересечением двух морфоструктур – аккумулятивно-денудационной равнины Сарыарки и пластово-денудационного Торгайского плато (Medeu et al., 2010). Торгайское плато представляет собой приподнятую стабильную морфоструктуру с мощной толщей палеоген-неогеновых отложений, формирующую локальный барьер для планового смещения русла. Вследствие этого развитие поймы и смещение долины в левобережную сторону ограничиваются, формируется слабоизвилистое, прямолинейное русло с преимущественно правобережной поймой. В пределах участка русло в основном однорукавное, с относительно однородной шириной и по совокупности признаков относится к типу ограниченного меандрирования водотока. Однако в средней части ключевого участка 5 наблюдается правая излучина, ранее имевшая связь с основным руслом, а на противоположном берегу фиксируются старицы бывшего рукава. Данный участок представляет собой интерес, поскольку, находясь в условиях ограниченного меандрирования, русло в пределах поймы проявляет элементы пойменной многорукавности и завершенного меандрирования, а обособленный правый рукав находится на стадии формирования старицы (рисунок 7).



Рисунок 7. Ключевой участок 5 – г. Державинск (Источник: Maps Data: Google, © 2025 CNES/Airbus, 05.08.2022; фотографии авторов)

При визуальном осмотре левого берега определяется узкая пойма слабонаклоненная к руслу реки и покрытая кустарниковой растительностью. Выше располагается высокий крутой склон бровки, переходящий в террасу высотой около 6-7 м. В верхней части склона террасы растительность разреженная, преимущественно травянистая, заметны следы врезания и смыва, вероятно сформированные в результате высоких паводков. По бровке террасы проходит дорога, вдоль которой расположены жилые дома, постройки и коммуникации. Пойма занята густыми кустарниковыми зарослями, переходящими в прибрежно-водную растительность (камыш, тростник).

Правый берег пониженный, имеет пойменный характер. Ее поверхность широкая, с хорошо выраженной густой кустарниковой растительностью. Рельеф более мягкий и пологий по сравнению с левым берегом, ярко выраженных бровок и обрывов не наблюдается. Ниже по течению, в районе изгиба русла, на правом берегу фиксируются береговые откосы, лишенные травянистой растительности. На склонах отчетливо прослеживаются следы размыва и локального обрушения грунта. В ходе полевого обследования подтверждено наличие обрыва протяженностью около 160 м. По сравнению с участком выше по течению, где правый берег имел пойменный характер с густой растительностью, здесь наблюдается переход к более крутым береговым откосам, формирующимся в результате усиления эрозионных процессов при воздействии течения в зоне изгиба русла. Ниже по течению пойменная растительность становится значительно реже или полностью отсутствует, а за пределами береговой линии преобладают пахотные угодья.

4. Обсуждение

Результаты проведенных полевых исследований на реке Есиль в пределах Акмолинской области дополняют и уточняют данные дистанционного зондирования Земли. Выявленные участки активного размыва, формирование излучин, элементов многорукавности и стариц согласуются с положениями теории руслового процесса (Kondratyev et al., 1982; Snishchenko, 1985; Chalov, 2011). Сравнение с другими исследованиями (Mandal, 2017; Sultana et al., 2025; Gharti et al., 2025) показывает, что даже на относительно стабильных морфоструктурах локальные факторы – сезонные колебания стока, паводки, растительный покров, хозяйственное освоение поймы – могут существенно усиливать эрозионные процессы и изменять устойчивость берегов.

Особый интерес представляют участки с ограниченным меандрированием и пойменной многорукавностью, где в условиях морфоструктурных барьеров русло демонстрирует сочетание признаков стабильности и активного бокового размыва. Это соответствует выводам зарубежных авторов о пространственной и временной изменчивости береговой эрозии и миграции русел (Boothroyd et al., 2021; Dragićević et al., 2017).

Сравнение результатов дистанционного анализа с полевыми наблюдениями показало, что наиболее надежными признаками, выявляемыми на космических снимках, являются:

- форма русла (прямолинейное/извилистое русло, наличие рукавов, излучин, островов);
- четкая бровка берега и крутые откосы, лишенные растительности;
- следы образования стариц и протока.

Эти элементы хорошо различимы даже на снимках среднего разрешения, что обеспечивает высокую воспроизводимость интерпретации. Менее надежными оказались признаки, связанные с растительным покровом и мелкомасштабными изменениями (локальные овраги, заиление мелких протоков, сезонное затопление поймы). Их корректное определение осложняется разновременной съемкой и сезонными колебаниями уровня воды.

Полевые наблюдения подтвердили, что инженерные сооружения существенно изменяют естественный режим течения реки Есиль. На участке водорегулирующей плотины (участок 2) искусственное спрямление русла и наличие направляющей дамбы создают перераспределение потоков: усиливается размыв левого берега, а у правого наблюдается заиление. В зоне мостов (участок 3) формируются локальные ускорения потока и размывы откосов вблизи опор. На

участке дорожной насыпи (участок 4) перекрытие протоков и недостаточная пропускная способность труб привели к изменению направления потока, что вызвало смыв части дорожного полотна и образование каскада наносов. Эти примеры показывают, что антропогенные объекты могут не только усиливать эрозию, но и способны формировать локальные изменения морфодинамики русла. В результате вмешательства возникает трансформация естественного типа руслового процесса: например, на участке прямолинейного русла под действием направляющей дамбы и гидротехнического сооружения проявляются черты побочного типа русла.

Сопоставление данных космических снимков и полевых наблюдений показало, что дистанционное зондирование эффективно для выявления общих тенденций русловых изменений, однако именно полевой этап позволяет уточнять их масштабы, подтверждать характер эрозионных процессов и оценивать текущее состояние береговой линии. Полевые наблюдения проводились в летнюю межень, что позволило зафиксировать элементы русловой морфологии. В дальнейшем целесообразно расширить наблюдения на период половодья для оценки границ поймы и состояния русла во время затоплений. Существенным ограничением исследования является недостаточность данных по жидкому и твердому стоку, скорости потока и расходам воды по всей длине реки.

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) продемонстрировало высокую информативность: так, на ключевом участке 5 удалось получить детальное изображение размываемого берега, не интерпретируемого по космическим снимкам. Это подчеркивает необходимость полевого этапа исследований для верификации данных дистанционного зондирования и уточнения масштаба и характера русловых изменений.

5. Заключение

1. В результате проведенных исследований для участков русла реки Есиль в пределах Акмолинской области впервые выполнено определение типов руслового процесса на основе схем деформаций в соответствии с гидроморфологической теорией руслового процесса (ГГИ). Проведен анализ и дано детальное описание морфологических признаков, используемых при дешифрировании космических снимков. Дешифровочные признаки русловых деформаций, выделенных по космическим изображениям, подтвердились при натурной проверке, что свидетельствует о надежности и воспроизводимости примененной методики.

2. Полевые исследования реки Есиль подтвердили пространственную изменчивость русловых процессов: от русловой многорукавности в верхнем течении до прямолинейного русла с ограниченным меандрированием ниже по течению.

3. Наиболее активные процессы деформации береговой линии фиксируются в зонах антропогенного воздействия (направляющие дамбы, мосты, дорожные насыпи), что подтверждается отсутствием растительности и разрушением отдельных конструкций.

4. Типом руслового процесса с повышенной эрозионной опасностью для инфраструктурных объектов является пойменная многорукавность. Для таких участков характерны широкая, низкая и часто затопляемая пойма, высокая динамичность русла, затрудненное выделение главного рукава и возможность развития отдельных протоков по самостоятельному типу руслового процесса. Эти особенности повышают риски для инфраструктуры – размыв дорожных насыпей и опор мостов, повреждение водопропускных сооружений, затопление прилегающих территорий и объектов.

5. Полученные материалы свидетельствуют о перспективности комплексного подхода, сочетающего использование космических снимков, БПЛА, геоинформационных технологий и полевых наблюдений для мониторинга динамики русел рек Казахстана. Такой подход позволяет повышать точность интерпретации морфодинамических процессов, разрабатывать модели прогнозирования изменения береговой линии и учитывать влияние природных и антропогенных факторов. Будущие исследования целесообразно проводить также в периоды половодий для оценки границ поймы, скоростей размыва и смещения берегов, а также

расширять регулярный мониторинг с применением БПЛА, что будет способствовать созданию надежной системы наблюдений за русловыми процессами. Расширение применения БПЛА позволит оперативно получать обзорные снимки русла по всей ширине, фиксировать излучины и рукава, уточнять морфологические изменения.

6. Полученные результаты создают основу для разработки комплексной методики долговременного мониторинга русловых изменений рек Казахстана, прогнозирования трансформаций берегов и русла, а также оценки воздействия инженерной инфраструктуры на устойчивость береговой зоны.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация, методология - Т.Т., М.Н., Ж.Е.; программное обеспечение, валидация, формальный анализ, исследование - Ж.Е., Т.Т., Г.Е.; написание-подготовка оригинального черновика - Ж.Е.; написание-рецензирование и редактирование - М.Н., Ж.Е.; визуализация - Ж.Е.; руководство - Т.Т. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Ержанова, Жулдыз – PhD-студент образовательной программы 8D05213 - География, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; email: zhuldyz.yerzhanova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5821-9601>

Таукенов, Талгат – PhD, эксперт по ГИС ПРООН в Казахстане, ул. А. Мамбетова, 14, Астана, Казахстан, 010000; email: talgattaukenov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7394-7073>

Мусабаева, Меруерт – д.г.н., доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; email: musabaeva_meruert@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6016-1146>

Есимбеков, Габит – Ph-студент образовательной программы 8D05213 -География, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; email: gabitnisa@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-4919-7670>

9. Финансирование: Нет внешнего финансирования.

10. Благодарности: нет.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Akiyanova, F.Z., Frolova, N.L., Shaymerdenova, A.M., Karakulov, Y.M., Olezko, A.B. (2019). Impact of anthropogenic transformation of riverbeds on the water resources of arid regions (The Yesil and Nura rivers case, North Kazakhstan). *Series Geology and Technical Sciences* 6(438), 197–207. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.171>
2. Aleksova, B., Milevski, I., Dragičević, S., Lukić, T. (2024). GIS-based integrated multi-hazard vulnerability assessment in Makedonska Kamenica Municipality, North Macedonia. *Atmosphere* 15(7), 774. <https://doi.org/10.3390/atmos15070774>
3. Ballanti, L., Byrd, K., Woo, I., Ellings, C. (2017). Remote sensing for wetland mapping and historical change detection at the Nisqually River Delta. *Sustainability* 9(11), 1919. <https://doi.org/10.3390/su9111919>

4. Boothroyd, R.J., Williams, R.D., Hoey, T.B., Barrett, B., Prasojo, O.A. (2021). Applications of Google Earth Engine in fluvial geomorphology for detecting river channel change. *WIREs Water* 8(4), e21496. <https://doi.org/10.1002/wat2.1496>
5. Chalov, R.S. (2011). *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. Tom 2. Morfodinamika rechnykh rusel* [Fluvial studies: theory, geography, practice. Vol. 2: Morphodynamics of river channels]. Moscow: Krasand. https://www.rfbr.ru/view_book/1948/
6. Chalov, R.S., Kurakova, A.A., Golubtsov, G.B., Zavadskiy, A.S. (2023). Transformaciya rechnykh rusel v processe ih samorazvitiyai vliyaniya estestvennykh i antropogennykh izmenenij faktorov ruslovykh processov [Transformation of river channels in the process of their self-development and the influence of natural and anthropogenic changes in channel process factors]. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva [News of the Russian Geographical Society]*, 155(2), 88-108. <https://doi.org/10.31857/S0869607123020039>
7. Dragičević, S., Pripuzić, M., Živković, N., Novković, I., Kostadinov, S., Langović, M., Milojković, B., Čvorović, Z. (2017). Spatial and temporal variability of bank erosion during the period 1930–2016: Case study - Kolubara River Basin (Serbia). *Water* 9(10), 748. <https://doi.org/10.3390/w9100748>
8. Esekej, K. (2024, April, 25). Budut li oblagorazhivat' «vodopad» v Astane [Will the "waterfall" in Astana be improved?]. *Kazinform*. <https://www.inform.kz/ru/budut-li-oblagorazhivat-vodopad-v-astane-8b8887>
9. Gharti, S., Poudel, P., Silwal, R., Baniya S., Gautam J., Mishra O., Bista S., Dhungana D. (2025). GIS and remote sensing based assessment of West Rapti River channel migration in Nepal. *Discover Water* 5, 5. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00183-w>
10. Gonzales-Inca, C., Calle, M., Croghan, D., Torabi Haghighi, A., Marttila, H., Silander, J., Alho, P. (2022). Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI) in the integrated hydrological and fluvial systems modeling: Review of current applications and trends. *Water* 14(14), 2211. <https://doi.org/10.3390/w14142211>
11. Kondrat'ev, N.E., Popov, I.V., Snishchenko, B.F. (1982). *Osnovy gidromorfologicheskoy teorii ruslovogo protsessa* [Fundamentals of the hydromorphological theory of the channel process]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
12. Kuznetsova, Y., Golosov, V., Tsyplenkov, A., Ivanova, N. (2019). Quantifying channel bank erosion of a small mountain river in Russian wet subtropics using erosion pins. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 381, 79–84. <https://doi.org/10.5194/piahs-381-79-2019>
13. Mandal, S. (2017). Assessing the instability and shifting character of the river bank Ganga in Manikchak Diara of Malda district, West Bengal using bank erosion hazard index (BEHI). *European Journal of Geography* 8(4), 25–32.
14. Medeu, A.R. (Ed.). (2010). *Nacional'nyj atlas Respubliki Kazakhstan. Tom 1: Prirodnye usloviya i resursy* [National Atlas of the Republic of Kazakhstan. Vol. 1: Natural conditions and resources]. Institut geografii [Institute of Geography].
15. Mussina, A., Tursyngali, M., Duskayev, K., Rodrigo-Ilarri, J., Rodrigo-Clavero, M.-E., Abdullayeva, A. (2025). Forecasting channel morphodynamics in the Ulken Almaty River (Ile Alatau, Kazakhstan). *Water* 17(13), 2029. <https://doi.org/10.3390/w17132029>
16. Nath, A., Ghosh, S. (2024). Geo-spatial analyses of meandering rivers, assessing past and future impacts on bank landforms and LULC changes. *Water Policy* 26(12), 1234–1260. <https://doi.org/10.2166/wp.2024.062>
17. Ongdas, N., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A., Zinabdin, N. (2020). Application of HEC-RAS (2D) for flood hazard maps generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan. *Water* 12(10), 2672. <https://doi.org/10.3390/w12102672>
18. Snishchenko, D.V., Snishchenko, B.F. (1985). *Rekomendatsii po ispol'zovaniyu aerokosmicheskoy informatsii pri izuchenii ruslovogo protsessa* [Recommendations on the Use

- of Aerospace Information in the Study of Channel Processes]. *Gidrometeoizdat*. <https://meganorm.ru/Index2/1/4294815/4294815153.htm>
19. Sultana, M., Hoque, M.A., Pradhan, B. (2025). Assessing Meghna Riverbank dynamics and morphological changes in Bangladesh using geospatial techniques. *Applied Geomatics* 17, 147–161. <https://doi.org/10.1007/s12518-025-00620-y>
20. Taukenov, T., Dzhanaleeva, K., Yerzhanova, Z. (2018). Methods of improving the efficiency of monitoring of channel deformations of mountain rivers near built-in settlements: On the example of the Buktyrma River. *Geodesy and Cartography* 44(1), 28–35. <https://doi.org/10.3846/gac.2018.260>
21. Tobón-Marín, A., Cañón Barriga, J. (2020). Analysis of changes in rivers planforms using Google Earth Engine. *International Journal of Remote Sensing* 41(22), 8654–8681. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1792575>
22. Veshkurtseva, T.M. (2008). Vliyanie hozyajstvennoj deyatel'nosti na ruslovyje processy reki Ishim [Impact of economic activity on channel processes of the Ishim River]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie* [Bulletin of Tyumen State University. Ecology and Nature Management] 4, 143–153.
23. Vorob'ev, A.Yu., Kadyrov, A.S. (2020). Polevye issledovaniya otstupaniya beregov rusla r. Oki v 2014–2018 gg. s pomoshch'yu metoda prostyh reperov [Field studies of the retreat of the Oka River channel banks in 2014–2018 using the simple benchmarks method]. *Geograficheskij vestnik* [Geographical Bulletin] 3(54), 30–45. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-3-30-45>
24. Wang, J., Wang, F., Wang, S., Zhou, Y., Ji, J., Wang, Z., Zhao, Q., Liu, L. (2023). Flood monitoring in the middle and lower basin of the Yangtze River using Google Earth Engine and machine learning methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 12(3), 129. <https://doi.org/10.3390/ijgi12030129>
25. Wu, X., Feng, X., Fu, B., Yin, S., He, C. (2023). Managing erosion and deposition to stabilize a silt-laden river. *Science of The Total Environment* 881, 163444. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163444>
26. Yusicheva, K., Aliev, R. (2022, August, 8). Bereg reki Esil' stremitel'no obrushaetsya v Petropavlovsk. [The bank of the Yesil River is rapidly collapsing in Petropavlovsk]. *Khabar news*. <https://khabar.kz/ru/news/obshchestvo/142014-bereg-reki-esil-stremitelno-obrushaetsya-v-petropavlovsk>

Бақылаудан талдауға: далалық зерттеулер арналық өзгерістерді зерделеудің бірінші кезеңі ретінде

Жұлдыз Ержанова, Талгат Таукенов, Меруерт Мусабаева, Габит Есимбеков

Аңдатпа. Мақалада Ақмола облысы шегіндегі Есіл өзенінің арналық процестерін зерттеу бойынша 2024 және 2025 жылдардағы дала зерттеулерінің нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің негізгі мақсаты космостық суреттерде арна деформациясы орын алған аймақтарды анықтау және оларды далалық зерттеу деректерімен растау болды. Ұзындығы 500 км - ден асатын өзен арнасының зерттелген учаскесінде барлығы 17 негізгі аумақ анықталды, оның ішінде 5 репрезентативті аймақ егжей - тегжейлі қарастырылып ұсынылды. Алғаш рет осы аумақ үшін морфологиялық белгілерге талдау жүргізілді және Ресей Федерациясының Мемлекеттік гидрологиялық институты әзірлеген арналық процестердің гидроморфологиялық теориясына сәйкес арналық процестердің түрлері анықталды. Далалық зерттеулер эрозияға ең бейім болған негізгі аймақтарды анықтауға және зерттелетін өзеннің жағалау сызығының және инженерлік құрылыстардың толық сипаттамасын дайындауға мүмкіндік берді. Нәтижелерге сапалық сипаттамалар (арналардың морфологиясын сипаттау, арналық процестердің түрлерін

анықтау) және сандық деректер (эрозияға ұшыраған жағалаулардың биіктігі, ені және ұзындығы, жол бетінің параметрлері) кіреді. Инженерлік құрылыстар мен елді мекендер үшін айтарлықтай қауіп төндіретін эрозия қаупі жоғары өзен арналық процесінің түрі анықталды. Қашықтықтан зондтау деректерін далалық зерттеу нәтижелерімен салыстыру арналардағы өзгерістердің ауқымы мен сипатын нақтылау үшін кешенді тәсілдің қолдануы жоғары тиімділігін көрсетті. Алынған нәтижелер өзен жағалау сызығын бақылаудың кешенді әдістемесін әзірлеу үшін негіз болып табылады және арналық процестерді анықтау және бақылау кезінде қашықтықтан зондтау деректерін пайдалану мүмкіндіктерін зерттеу бойынша диссертацияны дайындау кезінде пайдаланылады.

Түйін сөздер: Есіл өзені, далалық зерттеу әдістері, арналық және эрозиялық процестер, жағалау сызықтарының эрозиясы, өзен эрозиясы, қашықтықтан зондтау

From Observations to Analysis: Field Research as the First Stage of Studying Riverbed Changes

Zhuldyz Yerzhanova, Talgat Taukenov, Meruert Musabayeva, Gabit Yessimbekov

Abstract: The article presents 2024-2025 field study results on channel processes of the Yesil (Ishim) River within Akmola region. The main goal was to identify areas with channel deformations on satellite images and confirm them with field data. In total, 17 key areas were identified on the studied section of the riverbed over 500 km long, and 5 representative ones were examined in detail. For the first time, morphological features were analysed for this territory, and types of channel processes were determined according to the hydromorphological theory developed by the State Hydrological Institute of the RF. Field research revealed the most erosion-prone areas and provided detailed descriptions of the river coastline and engineering structures. Results include qualitative characteristics (channel morphology, process types) and quantitative data (height, width, length of eroded banks, road surface parameters). A riverbed process with increased erosion hazard was identified, posing risks to structures and settlements. Remote sensing and field data comparison demonstrated the high efficiency of an integrated approach for clarifying the scale and nature of channel changes. The obtained results form the basis for developing a comprehensive methodology for monitoring river coastlines and will be used in preparation of a dissertation on using remote sensing data to identify and monitor riverbed processes.

Keywords: Yesil River, field research methods, channel and erosion processes, coastline erosion, river erosion, remote sensing

Development of a GIS digital framework for the Central Kazakhstan region based on cartographic materials and remote sensing data

Shnar Kairova¹, Nazym Zhengissova^{2,3*}, Zhalgas Toktarov^{2,3}, Kanat Zulpykharov^{2,4}, Dias Tokkozhayev⁴, Aisara Assanbayeva⁴, Omirzhan Taukebayev^{2,3}

¹Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan;
shynar_kairova@mail.ru; kanat.zulpykharov@gmail.com

²Space Technologies, and Remote Sensing Center, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;
nazym.zhengissova@kaznu.edu.kz; zhake0215@gmail.com;
kanat.zulpykharov@gmail.com; omirzhan.taukebayev@kaznu.edu.kz

³Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; nazym.zhengissova@kaznu.edu.kz;
zhake0215@gmail.com; omirzhan.taukebayev@kaznu.edu.kz

⁴Department of Geography, Land Management and Cadastre, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; kanat.zulpykharov@gmail.com;
tokkozhayev11@mail.ru; asanbayeva01@inbox.ru

*Correspondence: nazym.zhengissova@kaznu.edu.kz

Citation: Kairova, Sh., Zhengissova, N., Toktarov, Zh., Zulpykharov, K., Tokkozhayev, D., Assanbayeva, A., Taukebayev, O. (2025). Development of a GIS Digital Framework for the Central Kazakhstan Region Based on Cartographic Materials and Remote Sensing Data. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, 152(3), 122-141. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-122-141>

Academic Editor:
N.Ye. Ramazanov

Received: 02.05.2025
Revised: 24.09.2025
Accepted: 28.09.2025
Published: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Abstract: The article is dedicated to the creation of a digital geoinformation framework for Central Kazakhstan based on the integration of various sources of spatial data. The aim of the study is to develop a structured GIS foundation capable of supporting analysis, ecological monitoring, and spatial modeling in a region with high natural resource potential. Methods included the integration of cartographic materials, remote sensing data, and digital elevation models, followed by georeferencing, vectorization, topology assessment, and spatial data analysis. Quantitative results showed that the hydrographic network of Central Kazakhstan includes 12,681 km of rivers and streams, 1,572 lakes with a total area of 11,354 km², as well as 63,028 km of roads and 8,288 km of railways. Accuracy assessment of digitized lake boundaries demonstrated high consistency between Landsat-9 and OSM (IoU = 0.86; Dice = 0.92). Morphometric derivatives such as slope, aspect, and hillshade were generated to delineate erosion-prone zones and assess land degradation risks. The practical significance of the research lies in the creation of an updated digital GIS framework that can be applied for spatial planning, environmental monitoring, infrastructure management, and scientific purposes. The developed system supports WebGIS platforms and can evolve into a regional digital twin using real-time data.

Keywords: GIS basis; digital map; cartographic materials; remote sensing data; Central Kazakhstan Region; spatial planning; digital framework; Central Kazakhstan GIS framework.

1. Introduction

In recent decades, the role of Geographic Information System (GIS) technologies has grown significantly, becoming a key tool in managing land resources, natural hazards, and environmental sustainability (Kurowska et al., 2020). The implementation of modern digital geoinformation technologies across various sectors of the national economy is aimed at fostering its intensification and optimizing the use of natural resource potential (Zhao et al., 2024). This, in turn, requires the availability of a high-quality, structured, and spatially referenced digital foundation.

GIS is a framework designed for the collection, storage, processing, analysis, management, and presentation of spatial or geographic data (Ananda et al., 2016). GIS data structures for analysis are defined as “themes of geospatial data identified as the basis upon which all other layers of data are structured and integrated for analysis and application” (Makanga et al., 2016).

In most high-income countries, large-scale maps and structured GIS data are readily available. However, in much of the world, such data remain largely inaccessible, and the available datasets are often stored in private databases held by non-governmental organizations and corporations (Tatem et al., 2007).

In Kazakhstan and Central Asia, several local studies have highlighted the challenges of pasture degradation, soil salinization, and vegetation change under climate variability and anthropogenic pressures. Vegetation phenology in Central Asia strongly responds to climatic gradients, emphasizing the need for systematic monitoring (Kariyeva & Van Leeuwen, 2011). More than 40% of Kazakhstan’s territory shows signs of significant land degradation, with pasturelands particularly vulnerable to overgrazing and desertification processes (Issanova et al., 2020). National reports of the Kazhydromet confirm that the region has experienced a steady warming trend and recurrent droughts, directly affecting vegetation productivity (Kazhydromet, 2020). These changes have contributed to the expansion of arid zones, with semi-arid lands progressively transitioning into more arid conditions across Central Kazakhstan (Bissenbayeva et al., 2025). These findings underline the necessity of developing a structured digital GIS framework that can integrate diverse datasets and provide a reliable basis for spatial planning and sustainable resource management in Central Kazakhstan.

The central region of Kazakhstan, with its vast territory and distinct natural and socio-economic characteristics, requires the development of a digital platform that can serve as a foundation for spatial analysis, monitoring, and modeling. For this reason, geoinformation systems have become ubiquitous. Data curation, map visualization, geocoding, and online deployment using GIS technologies represent user-generated content that is interactive, geolocated, and essential. However, Central Kazakhstan faces challenges such as a lack of regularly updated spatial data and limited public accessibility of geospatial information, which complicates planning and monitoring processes. Establishing a GIS foundation is a key stage in the creation of such a digital platform.

Study area. The study area – Central Kazakhstan consists of two administrative regions: Karagandy and Ulytau, with a total land area of 42.8 million hectares (Figure 1). The region includes a denudation plain known as the Kazakh Uplands, where steppe and dry steppe (semi-desert) soil and vegetation zones are clearly expressed, characterized by a semi-arid climate. This territory accounts for 37.4 million hectares of agricultural land, of which pastures – 35.2 million hectares or 94% of all agricultural land. 15.8% of the region’s land (14.8 million hectares) is part of reserve lands, of which 87.2% are pastures (Pachikin et al., 2014).

The region plays an important role in the economic structure of Kazakhstan, with industries such as mining, agriculture, and energy production. There are about 13 thousand agricultural formations in the region. Livestock products account for 56.8% of the total gross production of the agricultural sector in the region under study. The livestock population in the region is growing both on farms and in private households. Due to the lack of pastureland, villagers are forced to keep their livestock practically in the yard, since pasture lands near settlements are not used for their intended purpose or are degrading. According to statistics from the Department of Agriculture of the Karaganda Region, as of January 1, 2022, the region contains about 800 thousand heads of cattle, over 1,381 thousand goats and sheep, and more than 537 thousand horses. Also, personal subsidiary

farms contain about 321 thousand heads of cattle, about 474 thousand heads of small cattle, and more than 164 thousand horses (World Bank, 2021).

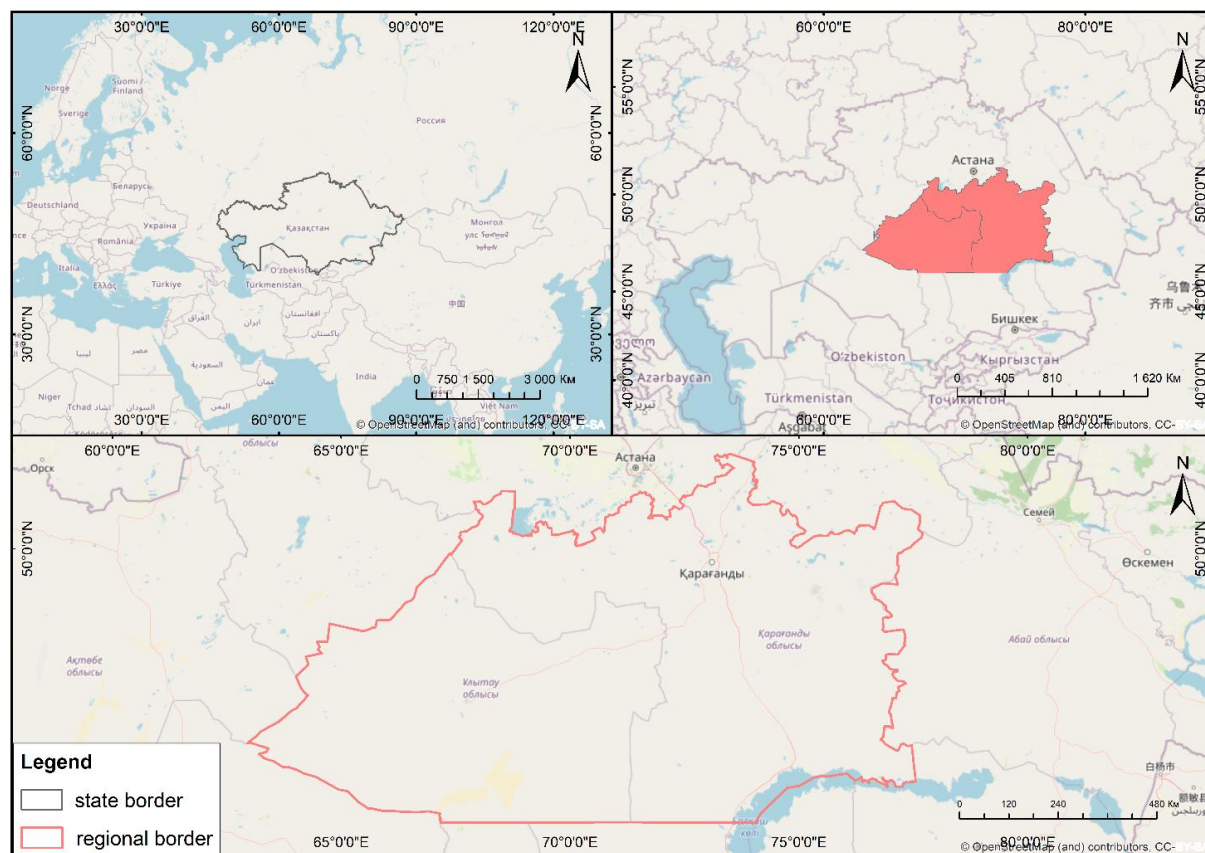


Figure 1. The object of the study (Source: compiled by author)

2. Materials and methods

2.1. Data Sources and Integration

The methodological workflow involved initial preprocessing, georeferencing, vectorization, attribute tagging, and conversion of raster datasets to analysis-ready layers.

The process of forming the digital GIS framework for Central Kazakhstan was based on a comprehensive approach that involved the integration of heterogeneous spatial data, including traditional cartographic materials, remote sensing (RS) data, and digital elevation models (Table 1), their structural unification, and subsequent analytical processing. This integration ensured spatial consistency across all thematic layers and provided a unified basis for further spatial analysis. Special attention was given to maintaining geodetic accuracy and semantic integrity when merging datasets from different sources and scales.

To implement the data integration and analysis procedures, several GIS tools were employed. ArcGIS Pro was utilized for georeferencing, digitization of cartographic sources, and raster-vector data management using tools such as Spatial Analyst and Raster Calculator (Esri, 2020). Google Earth Engine (GEE) was applied for cloud-based processing of satellite imagery, spectral indices calculation, and classification (Gorelick et al., 2017). These platforms ensured efficient handling of large datasets, spatial harmonization, and extraction of key landscape features essential for the regional GIS framework.

In the development of the digital GIS framework, an integrative geoinformation modeling method was applied, based on the combination of cartographic data, satellite imagery, and digital elevation models. This approach is recognized as effective for regional mapping of areas with diverse natural and geographical structures (Goodchild, 2007; Longley et al., 2015).

The key stages included correction of geometric and spectral characteristics, standardization of spatial resolution, and alignment of all data to a unified coordinate system (Burrough et al., 2015).

Scientific studies have shown that preliminary vectorization, mosaicking, and normalization of raster data significantly improve the quality of geoinformation frameworks for spatial analysis (Foody, 2002; Lillesand et al., 2015).

Table 1. Source data used for building the GIS framework of Central Kazakhstan

№	Data Source	Data Type	Spatial Resolution / Scale	Temporal Coverage	Source
1	Topographic Maps	Raster Maps	1:500 000 1:1 000 000	1987	https://maps.vlasenko.net
2	SRTM	Digital Elevation Model (DEM)	30 m	2000	NASA, USGS
3	Landsat 9	Satellite Imagery (Optical)	30 m (individual bands)	2024 (May - September)	USGS, EarthExplorer
4	OpenStreetMap (OSM)	Vector Data (roads, rivers, boundaries)	Vector layers	2025	https://www.openstreetmap.org

The methodological scheme applied in this study ensured the comprehensive preparation of data for subsequent modeling of natural and anthropogenic processes and is based on modern principles of geoinformation modeling, digital cartography, and remote sensing of the territory (Figure 2).

The applied methodological workflow was directly connected to regional challenges: Landsat imagery supported the detection of land cover transformations and land degradation processes; OSM data provided up-to-date information on settlement distribution and transportation accessibility, essential for estimating pasture load; and DEM derivatives such as slope and aspect facilitated the identification of erosion-prone areas.

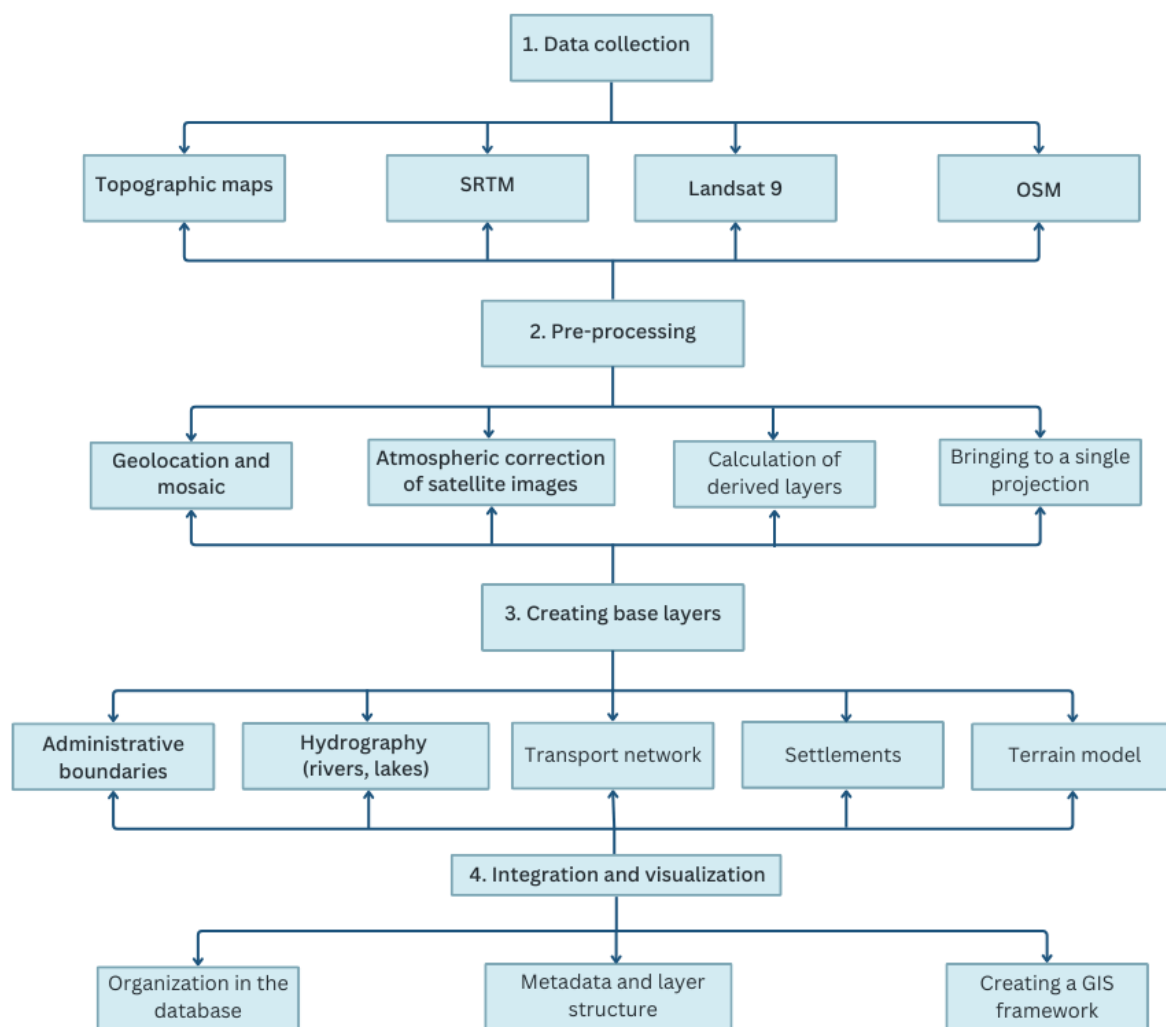


Figure 2. Methodological workflow of the GIS framework development (Source: compiled by author)

2.2. Data Preprocessing Workflow

Primary sources of spatial information included topographic maps at scales of 1:500,000 and 1:1,000,000, covering the main natural and geographical zones of Central Kazakhstan, including steppe, semi-desert, and desert areas of the Karaganda and Ulytau regions (Figure 3). These scales are optimal for regional mapping, providing a balance between detail and territorial coverage, as confirmed by several studies in the field of geoinformation modeling (Höhle, 2017).

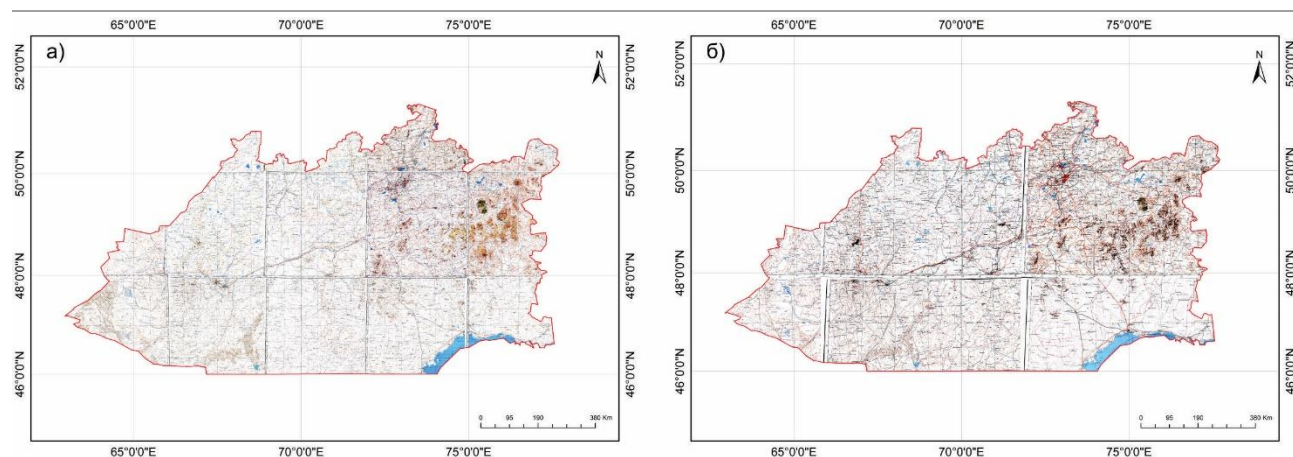


Figure 3. Topographic maps of Central Kazakhstan: a) 1:500 000; b) 1:1 000 000 (Source: compiled by author)

Topographic maps of this accuracy level maintain a high degree of reliability in the spatial positioning of natural and anthropogenic objects, especially in areas with low population density, where large-scale geospatial data are limited (Bocco et al., 2001). After geographic referencing, the maps were aligned to a unified coordinate system (WGS 84), ensuring compatibility with other spatial data sources. Based on these maps, vectorization of key components of the territorial structure was carried out, including the hydrological network, water body boundaries, settlements, and linear transport infrastructure objects. The resulting vector layers were structured and systematized for further use in GIS analytics and spatial modeling of the region's natural resource potential.

To improve the accuracy and completeness of the vectorized features, additional cross-validation with recent satellite imagery and ancillary datasets was performed. This step allowed the elimination of outdated objects and correction of positional inaccuracies, particularly in dynamic landscape zones. As a result, the final digital representation of the territory reflects both historical continuity and current geospatial realities.

To update and verify the spatial data used in creating the digital cartographic foundation of Central Kazakhstan, open geospatial data sources were utilized, meeting modern accuracy, accessibility, and spatial coverage requirements. Landsat-9 OLI/TIRS multispectral imagery was used as the primary remote sensing tool, providing an optimal combination of spatial and spectral resolution for analyzing land cover conditions and transformations (Roy et al., 2014; Wulder et al., 2019). These data enabled retrospective assessment of landscape changes over a defined observation period. An additional source of vector information was OpenStreetMap (OSM) cartographic data, widely used in applied and scientific research due to its high level of detail, regular updates, and open access (Haklay & Weber, 2008; Minghini et al., 2017). The use of OSM data allowed for refinement of the configuration of transport and settlement infrastructure, as well as individual land use objects (Figure 4).

The basis for constructing the Digital Elevation Model (DEM) of Central Kazakhstan was the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) model with a spatial resolution of 30 meters (Figure 5). The choice of this model is due to its global coverage, open access, stable accuracy, and wide application in scientific research. According to several studies, SRTM 30 m provides an optimal balance between spatial resolution and the volume of data processed when modeling terrain at the regional level (Jarvis et al., 2008; Reuter et al., 2007). For the Central Kazakhstan area, characterized by predominantly flat-hilly and weakly dissected terrain, the 30 m resolution is sufficient for generating key derivative layers such as slope, aspect, contours, and shaded relief images (Grohmann, 2015)

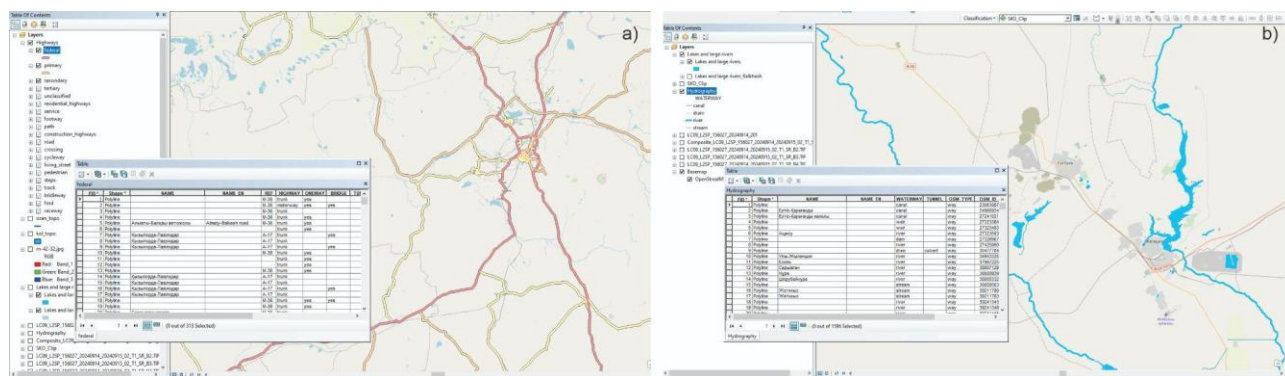


Figure 4. Vectorization of Spatial Objects from OpenStreetMap: a) road network; b) hydrological objects (Source: compiled by author)

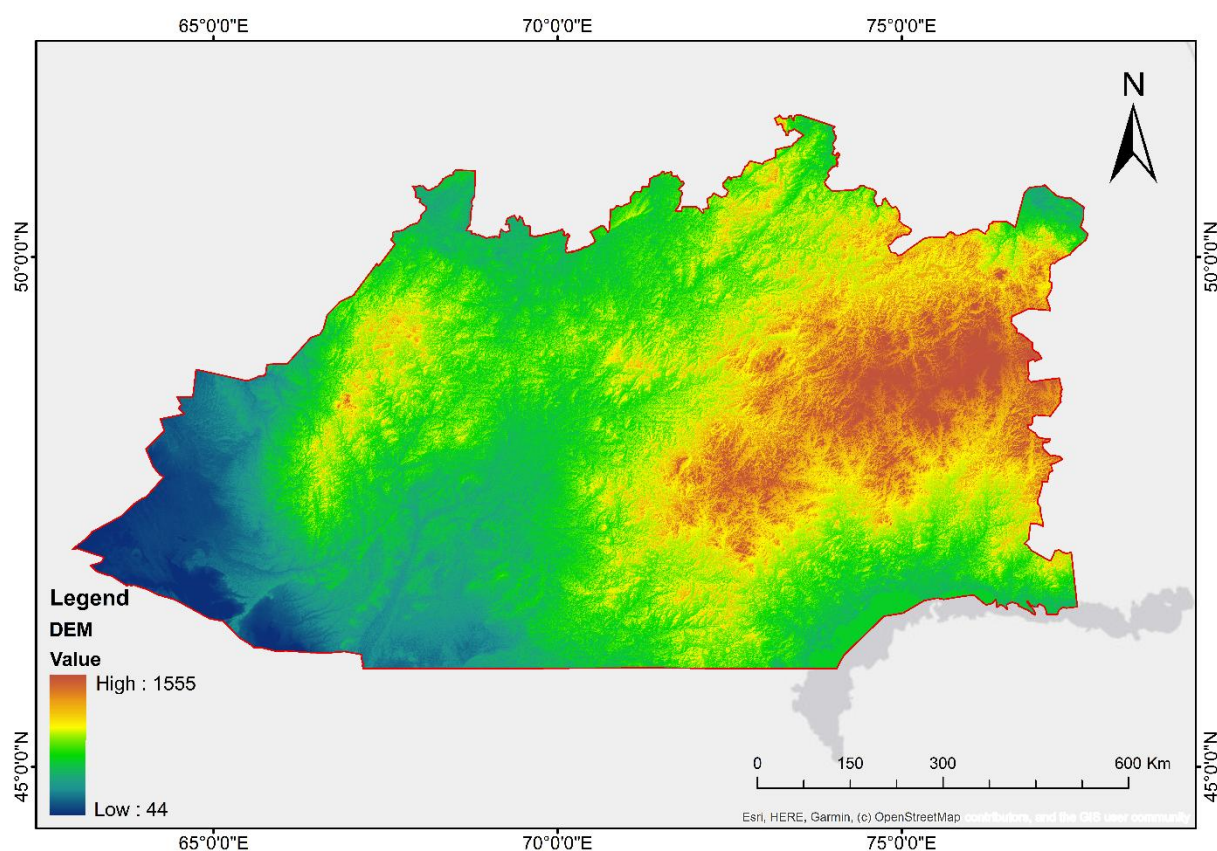


Figure 5. Digital Elevation Model of Central Kazakhstan Based on SRTM (Source: compiled by author)

Before conducting spatial analysis, all raster data were aligned to a unified geographic reference system (WGS 84) and clipped to the administrative boundaries of Central Kazakhstan, including the Karaganda and Ulytau regions.

Preprocessing of multispectral satellite imagery from Landsat 9 OLI/TIRS was carried out in the Google Earth Engine (GEE) environment, which enabled scalable, cloud-based processing of large geospatial datasets. This approach ensured not only time efficiency but also consistency in handling multi-temporal imagery, particularly for areas with frequent atmospheric interference. Next, the images underwent mosaicking based on median values for the growing season and normalization of reflectance (TOA Reflectance) to enhance comparability between dates and scenes (Figure 6).

To standardize the spatial resolution of all raster layers, the SRTM Digital Elevation Model was resampled to 30 meters using the bilinear interpolation method. This helped avoid abrupt transitions between pixels and ensured consistency with other raster data. After preprocessing, all raster data were exported in GeoTIFF format and imported into ArcMap, where unified raster layers were created. In ArcGIS, additional steps were carried out: renaming classes, calculating derivative parameters (such as slope, aspect, etc.), as well as visualizing and exporting thematic maps. The Raster Calculator, Extract by Mask, and Project Raster tools were used to prepare the data for subsequent spatial analysis and modeling.

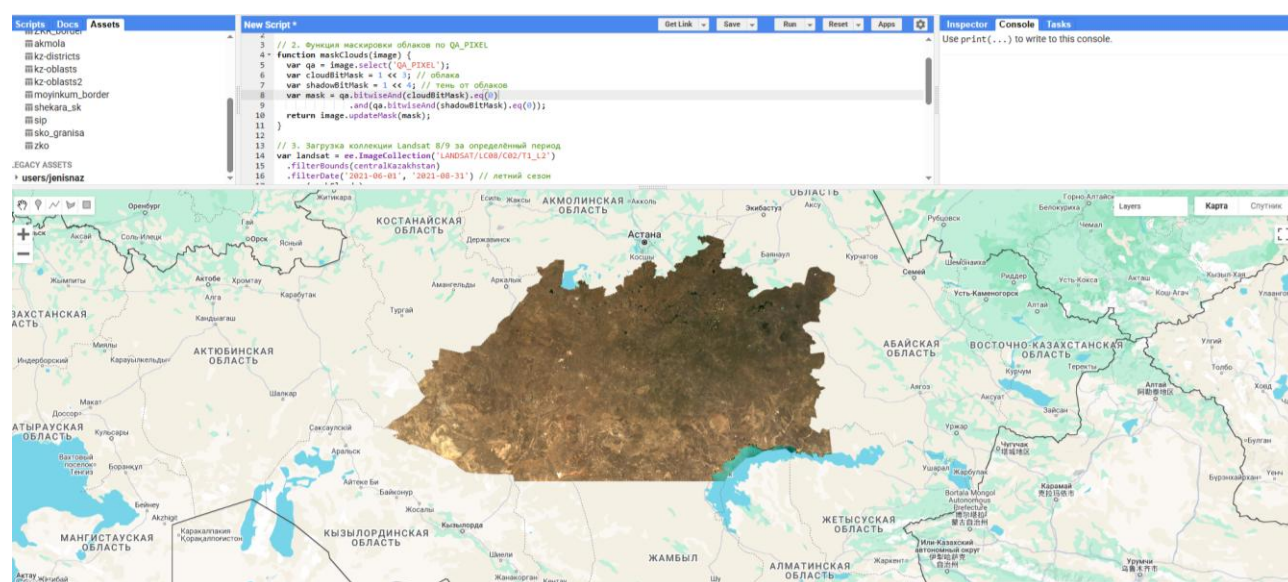


Figure 6. Preprocessing workflow of Landsat-9 OLI/TIRS imagery (Source: compiled by author)

Vectorization of topographic maps at scales of 1:500,000 and 1:1,000,000, covering the territory of Central Kazakhstan, involved extracting key elements of the spatial structure – riverbeds, lakes, seasonal watercourses, roads, railways, settlements, and more. The vectorization process was carried out in the ArcGIS environment using both manual and automated methods. The resulting vector layers underwent topological verification, categorization, and attribute structuring, ensuring their consistency and comparability with other spatial sources (Figure 7). The reliability of the spatial database was further evaluated through accuracy assessment procedures, with the corresponding results reported in the outcome section of the study.

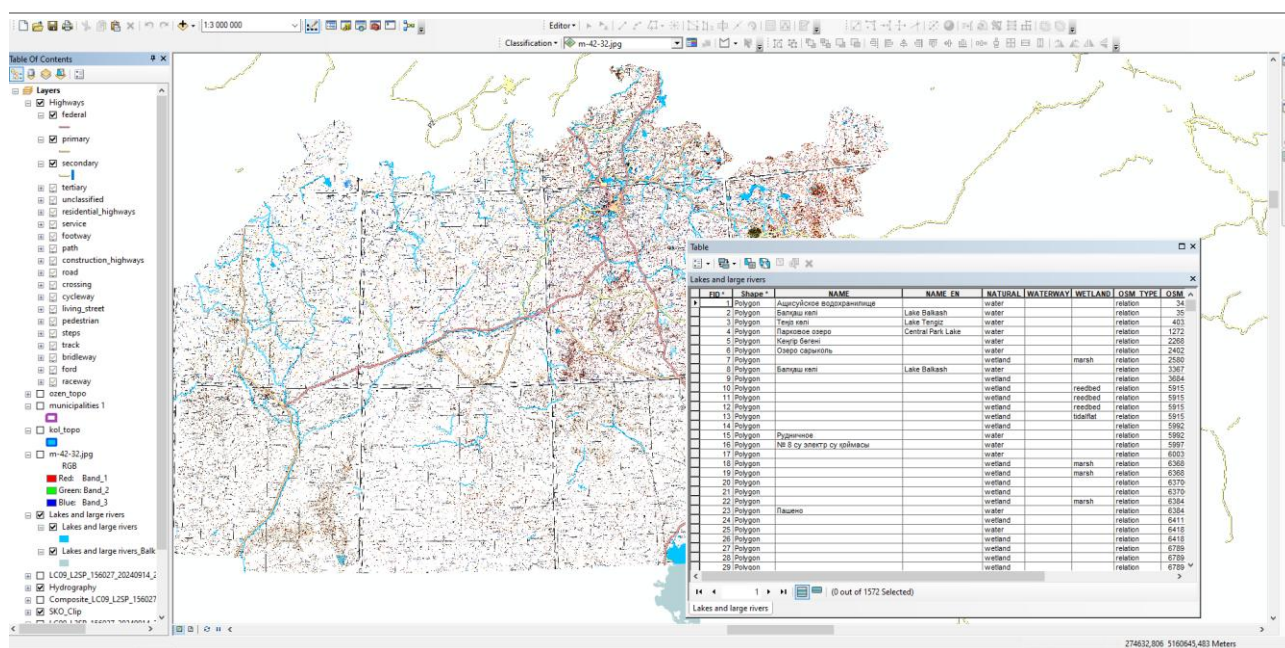


Figure 7. Vectorization and Attribute Structuring of Topographic Maps (Source: compiled by author)

3. Results

3.1. Data sources and integration

As a result of integrating heterogeneous spatial sources, a unified GIS foundation was formed for Central Kazakhstan, including raster, vector, and analytical layers suitable for subsequent thematic mapping and spatial modeling.

A structured spatial database was created based on the digitization of topographic maps at scales of 1:500,000 and 1:1,000,000. As a result of manual and semi-automated vectorization, layers for the hydrographic network, road infrastructure, mineral deposits, and settlements were obtained. The categorization conducted ensured consistency with contemporary sources (Figure 8). To enhance the reliability and spatial resolution of the database, vector layers were cross-validated with high-resolution satellite imagery and OpenStreetMap data. Attribute enrichment was carried out using both field survey records and statistical yearbooks, enabling thematic segmentation of infrastructure and land use. This integrated approach ensured high interpretability and scalability of the GIS database for regional-level analysis and decision support.

3.2. Comparative analysis of cartographic and open data

By overlaying vector layers created from topographic maps with modern open data sources (OSM, satellite imagery), spatial discrepancies were identified (Figure 9). The most significant differences were observed in the structure of temporary watercourses and small rivers; the configuration of lakes (including drying ones); the development of road infrastructure; and the growth or changes in the configuration of settlements. These differences reflect both natural landscape transformations over the past decades and anthropogenic pressures related to land use intensification and urbanization. In particular, the road network extracted from topographic sources significantly underrepresents recent expansions, especially around rural settlements and mining clusters. Comparative analysis enabled refinement of spatial boundaries and provided a basis for generating updated layers aligned with present-day land cover conditions.

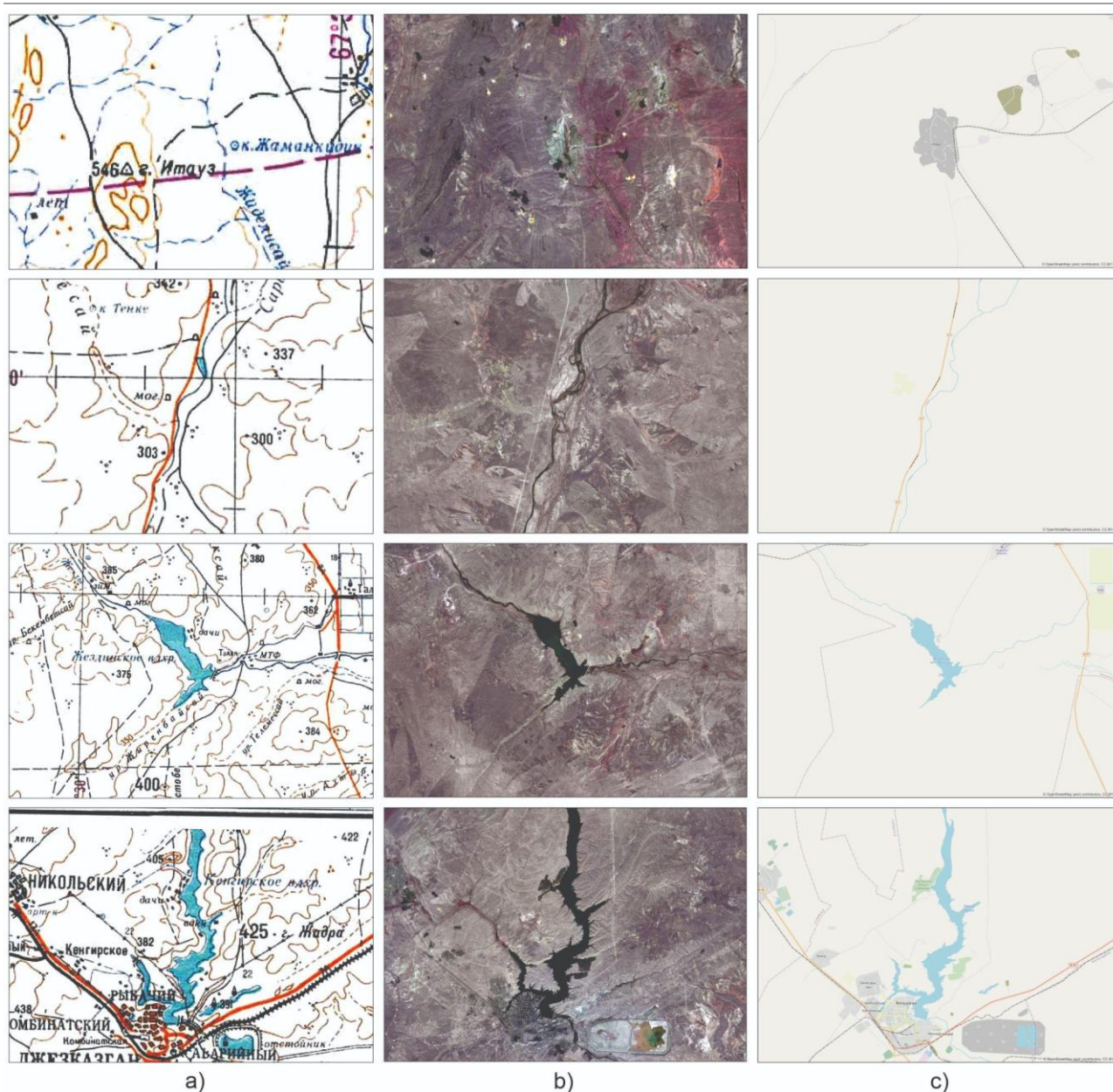


Figure 8. Comparative Vectorization Map from Different Sources: a) Topographic Map 1:500,000 (1987); b) Landsat 9 Image (14.09.2024); c) OpenStreetMap (2025) (Source: compiled by author)

3.3. Morphometric and relief analysis

Based on the SRTM 30 m Digital Elevation Model, derived layers were generated: slope, aspect, contour lines, and shaded relief (Figure 10). These layers were used to verify and refine the delineation of watersheds, assess the morphometric characteristics of the area, and construct the basic geomorphological framework of the region. The analysis of morphometric parameters allowed for the identification of key terrain features influencing hydrological processes and soil erosion risk. Slope and aspect data provided insights into solar radiation exposure and microclimatic variability affecting vegetation patterns. Additionally, shaded relief visualization enhanced the understanding of landform structures and facilitated the interpretation of geomorphological processes shaping the landscape.

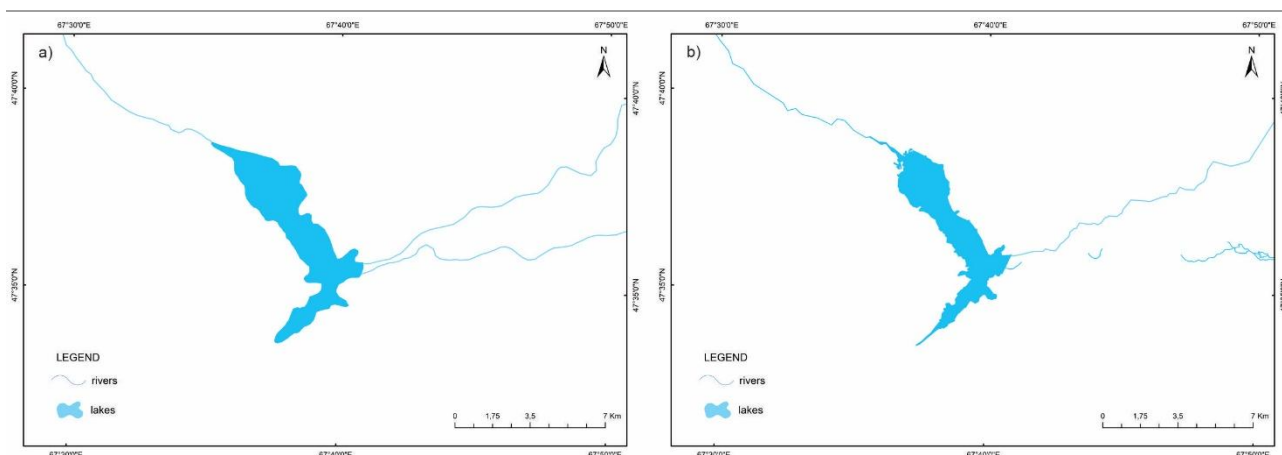


Figure 9. Comparison of hydrological features: a) topographic map; b) OSM data (Source: compiled by author)

Analysis of the slope map derived from the SRTM 30 m Digital Elevation Model revealed that slope values across Central Kazakhstan range from 0° to 70.91° . The majority of the area is characterized by slopes of up to 5° , indicating predominantly flat terrain. Areas with slopes greater than 15° are limited in extent and primarily associated with the Ulytau and Karkaraly mountain ranges. The resulting slope distribution enabled a preliminary morphometric zoning of the region and the identification of areas with increased erosion risk. For instance, zones with slopes exceeding 12° were marked as potential areas of accelerated water erosion, which can be considered in environmental planning and agricultural land use.

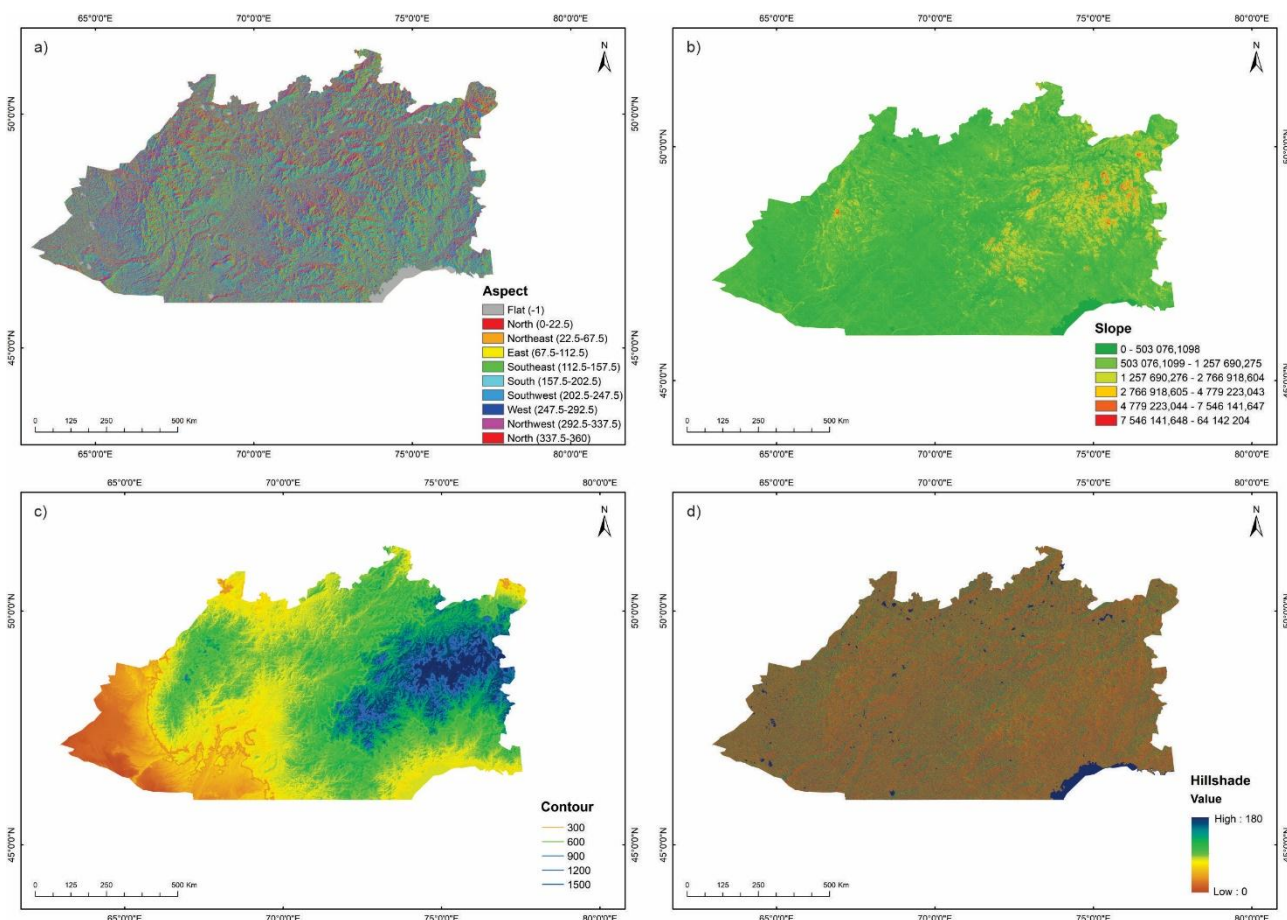


Figure 10. Composite map of relief-derived layers: a) slope; b) aspect; c) contours; d) hillshade (Source: compiled by author)

3.4. Mapping of settlements and infrastructure

As a result of processing and analyzing OpenStreetMap vector data (as of 2025), a current spatial model of the key territorial structure elements of Central Kazakhstan was constructed. The use of open geodata made it possible to obtain up-to-date quantitative and qualitative characteristics of features such as the hydrographic network, transportation infrastructure, and settlements (Figure 11).

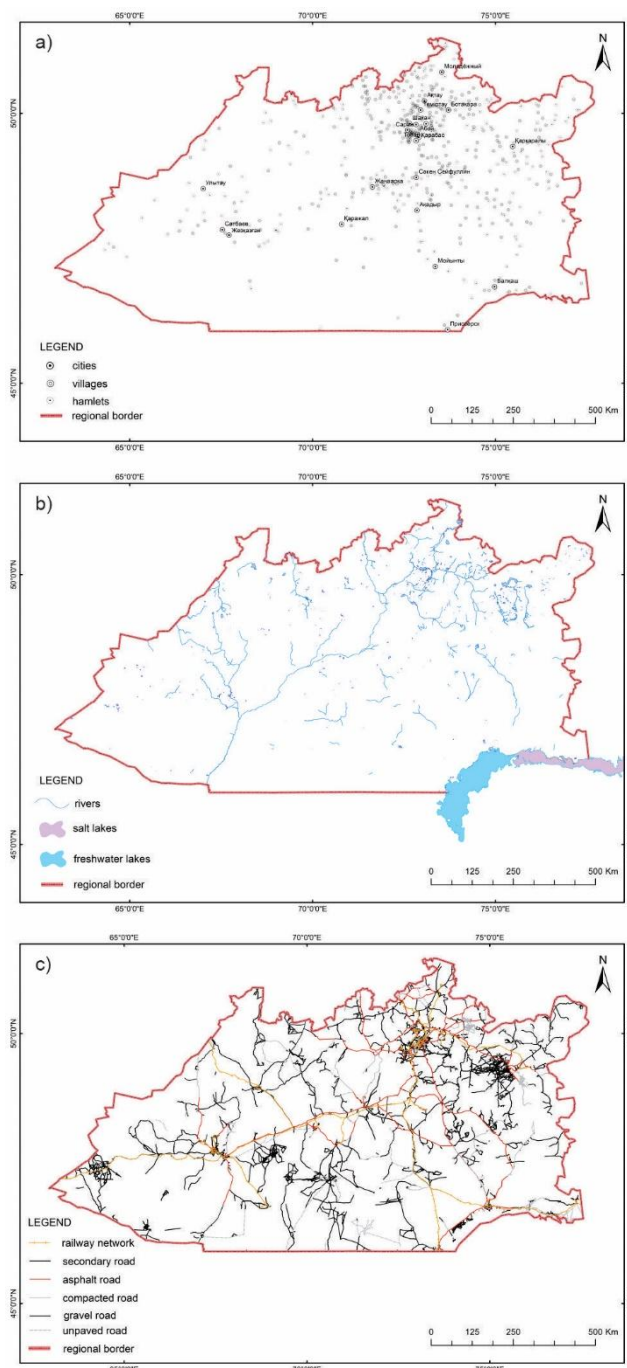


Figure 11. Results of feature digitization: a) settlements; b) hydrographic network; c) transportation network (Source: compiled by author)

Settlement distribution. Settlement density is highest along major transport corridors such as “Center-South” and “Astana-Almaty,” and decreases significantly in peripheral semi-desert and desert zones. Remote settlements were identified, some located more than 50 km from the nearest paved road, indicating challenges for emergency and utility service access.

Transport connectivity. Comparative analysis of the road network revealed an increase in the length of tertiary and quaternary category roads by approximately 17% compared to 1987. The least connected areas are located southwest of Lake Balkhash and east of Zhezkazgan, with network gaps exceeding 100 km.

Remote areas. Combined analysis of relief and infrastructure layers made it possible to delineate zones with complex transport inaccessibility – areas that combine steep slopes ($> 8^\circ$), absence of roads, and low settlement density.

The developed GIS foundation has demonstrated a wide range of applications in spatial planning and regional development:

1. Transportation planning. Slope and accessibility maps allow for the optimization of proposed transportation corridors, minimizing earthworks and avoiding ecologically sensitive areas.
2. Water resource management. The updated hydrographic network and DEM-derived layers (watersheds, slopes) provide a basis for runoff modeling and the planning of water control structures (e.g., check dams, small reservoirs).
3. Agro project design. The integrated GIS framework supports the zoning of land by erosion risk and pasture productivity, facilitating the rational allocation of agricultural lands and the implementation of soil conservation practices.

In addition, spatial analysis revealed that the most vulnerable areas to land degradation are concentrated in the southern and southeastern parts of Central Kazakhstan, particularly in semi-desert and desert zones with low vegetation cover and high grazing pressure. Infrastructure growth was most pronounced along major transport corridors and in mining regions, where settlement expansion and new road construction have intensified since the late 1980s. Conversely, peripheral areas located far from transport networks exhibit stagnation or decline, facing challenges in service provision and accessibility. These patterns highlight the uneven spatial development of the region and the need for differentiated management strategies.

3.5. Accuracy assessment of vectorized lake boundaries

To quantitatively evaluate the consistency of the digitized boundaries of Zhezdinskoye Lake derived from different sources (topographic map of 1987, Landsat-9 imagery of 2024, and OpenStreetMap of 2025), a comparative spatial analysis was conducted. The assessment included area calculations, intersection and union operations, and similarity indices (Intersection over Union – IoU, Dice coefficient, and relative area difference). These indicators are widely used in remote sensing and GIS studies to measure the geometric accuracy of vectorized features and ensure reproducibility of results (Guindon & Zhang, 2017).

Table 2 summarizes the results of the comparison. The highest agreement was observed between Landsat-9 and OSM boundaries (IoU = 0.86; Dice = 0.92), with only a 13.2% difference in area, indicating a strong consistency of these modern data sources. In contrast, the topographic map contour shows a significant overestimation of lake size (17.57 km² compared to 13.48 km² in OSM), resulting in a 30.3% area difference and a moderate similarity (IoU = 0.61; Dice = 0.76). A similar pattern is observed when comparing the topographic map and Landsat-9 (IoU = 0.62; Dice = 0.77; Δ Area = 15.1%).

Table 2. Accuracy assessment of Zhezdinskoye Lake boundaries from different sources

Comparison	Area_A (km ²)	Area_B (km ²)	Intersection (km ²)	Union (km ²)	IoU	Dice	Δ Area (%)
Topo vs OSM	17.57	13.48	11.77	19.36	0.61	0.76	30.3
Landsat vs OSM	15.26	13.48	13.25	15.49	0.86	0.92	13.2
Topo vs Landsat	17.57	15.26	12.58	20.25	0.62	0.77	15.1

These results confirm that historical topographic maps, while valuable for retrospective analyses, are less reliable for present-day assessments of hydrological systems. Modern datasets such as Landsat-9 and OSM provide more accurate delineations, reflecting both current hydrological conditions and ongoing anthropogenic influences. The proposed approach can be extended to other lakes and reservoirs of Central Kazakhstan, contributing to more accurate water resource assessments and supporting regional environmental monitoring.

3.6. Integrated map of Central Kazakhstan

As a final step, an integrated GIS map of Central Kazakhstan was developed (Figure 12), combining relief (hillshade), hydrology (rivers, lakes), infrastructure (roads, railways), and settlement layers. This synthesis map provides a holistic view of the region's territorial structure and serves as a cartographic basis for applied spatial planning, infrastructure design, and environmental monitoring.

In addition, the integrated map highlights spatial contrasts within the region, such as mountainous versus lowland zones, densely populated versus remote settlements, and saline versus freshwater lake systems. It allows for the identification of areas most vulnerable to land degradation and infrastructural isolation, thereby providing decision-makers with a visual tool for prioritizing development and conservation measures.

This final product not only reflects the current geospatial configuration of Central Kazakhstan but also serves as a reference model for comparative studies in other arid and semi-arid regions of Central Asia.

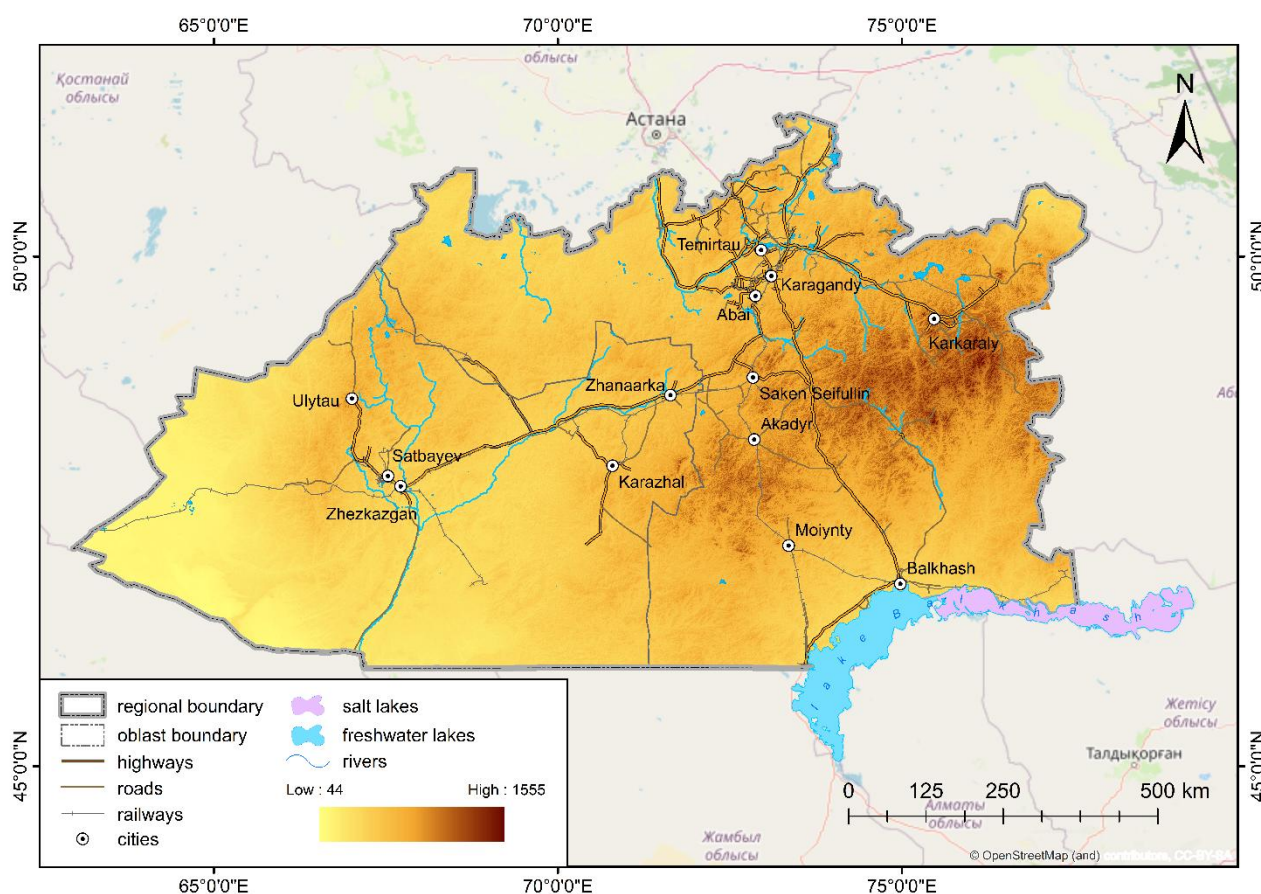


Figure 12. Integrated GIS map of Central Kazakhstan (Source: compiled by author)

4. Discussion

Based on the linear and polygonal hydrological features represented in OSM, a classification and quantitative assessment of water resources was carried out. The total length of rivers and watercourses amounted to 12,681 km. The total number of lakes, including unnamed ones, was 1,572,

of which 107 have official names. The combined area of the lakes reached 11,354 km², indicating the significant impact of lake systems on regional water balances.

Analysis of transportation networks based on OSM vector data revealed that the total length of roads in Central Kazakhstan is 63,028 km, while the railway network extends for 8,288 km. The road network was classified by surface type: paved, compacted, gravel, and dirt roads. In addition, a functional classification was carried out, including railways, main roads, secondary roads, and rural roads.

According to point data of settlements from OSM, Central Kazakhstan contains 289 villages, 219 aul settlements, and 22 cities. These settlements were distributed by administrative-territorial units, considering their classification. The data obtained formed the basis for mapping population density and infrastructural accessibility across the region.

The resulting digital GIS framework of Central Kazakhstan can be effectively used for generating thematic maps in various fields (landscapes, infrastructure, ecology); producing visual and analytical reports and diagrams; developing web maps and 3D models for digital platforms, as well as for the creation of interactive web-based maps and 3D visualizations.

The integrated geospatial framework for Central Kazakhstan is designed as a modern, flexible platform ready to meet future challenges. It brings together harmonized and co-registered spatial layers, which serve as a direct input for advanced analytical tools. For instance, the updated hydrographic network (12,681 km) and lake systems (11,354 km²) provide a foundation for simulating water balance under drought scenarios, while infrastructure layers enable AI-driven accessibility analysis for rural settlements. These include AI-based applications such as land cover mapping, erosion risk assessment, drought forecasting, and crop yield modelling – using methods like Random Forest, convolutional neural networks (CNN), and long short-term memory (LSTM) architectures.

By connecting to near-real-time satellite data streams – such as Sentinel-1/2, MODIS, and VIIRS – the system can support the creation of a dynamic regional digital twin. This digital twin continuously updates key indicators, including vegetation stress, water reservoir levels, and wildfire activity. Unlike the earlier conceptual discussion, here the digital twin is directly linked to the newly obtained spatial layers, ensuring practical relevance for monitoring land degradation, pasture load, and hydrological dynamics in Central Kazakhstan.

The database design is cloud-native: fully compatible with ArcGIS Online, GeoServer, Cesium ION, and similar WebGIS platforms, enabling rapid publication of interactive 2D and 3D services for government agencies, researchers, and the public. In this respect, the framework parallels recent initiatives in the Mongolian Steppe (Munkhdulam et al., 2022), the Australian Rangelands (CSIRO, 2025), and the U.S. Great Plains (Miu et al., 2017). In the Kazakhstan context, the system complements national findings on climate-induced droughts and pasture degradation, but provides a novel digital foundation that integrates both retrospective maps and modern open data (Issanova et al., 2020).

Despite the results achieved, certain limitations remain, such as the heterogeneity and fragmentation of source data; challenges in automating the processing of unstructured sources; and the need to adapt to modern IT trends – including the use of cloud-based GIS services, artificial intelligence, and neural networks for image analysis.

5. Conclusion

This study introduces a novel geospatial framework for Central Kazakhstan through the integration of historical topographic sources, contemporary satellite imagery, and open-source geospatial data. For the first time, a comprehensive and unified digital GIS model of Central Kazakhstan has been developed, combining heterogeneous spatial layers into a standardized, interoperable environment.

The methodological workflow encompassed the full geospatial data cycle – collection, preprocessing, classification, vectorization, and verification – resulting in a spatial model that reflects the region's natural and human-made landscape. Core outputs include:

- Generation of morphometric derivatives (slope, aspect, contours, hillshade) that enabled zoning of erosion-prone territories;

- Mapping of hydrological networks (12,681 km of rivers and streams; 1,572 lakes with a combined area of 11,354 km²), transportation infrastructure (71,316 km of roads, classified by surface type), and populated areas (530 settlements by administrative units);

- Development of thematic layers on population density and infrastructural accessibility, which were not previously available for Central Kazakhstan in a unified digital format.

The novelty of this research lies in the development of an integrated, bilingual (Kazakh/English) digital environment tailored for arid and semi-arid regions with scarce geospatial infrastructure. It represents the first digital GIS foundation of its kind for Central Kazakhstan, ensuring both historical continuity and modern accuracy.

The system is designed to evolve into a dynamic digital twin of the region. It can integrate real-time data from satellites – such as Sentinel-1, Sentinel-2, and MODIS – as well as unmanned aerial vehicles (UAVs), to monitor vegetation conditions, water dynamics, and human-induced changes. Practical applications include support for the Ministry of Agriculture of Kazakhstan in assessing pasture degradation and optimizing land use, for Kazhydromet in hydrological and climate monitoring, and for regional administrations in transportation planning and rural development.

Future development of this GIS framework may include integration with AI-based classification tools, real-time sensor data, and web-GIS interfaces for public access and stakeholder engagement. Further work should focus on automating feature extraction, expanding temporal analysis, and developing user-oriented GIS applications for planning and management.

6. Supplementary Materials: No supplementary material.

7. Author Contributions

Conceptualization - Sh.K., N.Zh.; methodology - O.T.; software - Zh.T.; validation - Sh.K., N.Zh., K.Z.; formal analysis - K.Z.; investigation - O.T.; resources - A.A.; data curation - D.T.; writing-original draft preparation - N.Zh.; writing-review and editing - O.T.; visualization - Zh.T.; supervision - Sh.K.; project administration - O.T.; funding acquisition - O.T. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information

Kairova, Shnar – PhD, Toraighyrov University, Lomov st., 64, Pavlodar, Kazakhstan, 140000; email: shynar_kairova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4735-8240>

Zhengissova, Nazym – PhD student, Space Technologies, and Remote Sensing Center, Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan, 050000; email: nazym.zhengissova@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0618-1204>

Toktarov, Zhalgas – master's student, Space Technologies, and Remote Sensing Center, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan, 050000; email: zhake0215@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7526-6861>

Zulpykharov, Kanat – PhD candidate, Space Technologies, and Remote Sensing Center, Department of Geography, Land Management and Cadastre, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan, 050000; email: kanat.zulpykharov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0275-2463>

Tokkozhayev, Dias – PhD student, Department of Geography, Land Management and Cadastre, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, 050000; email: tokkozhayev11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0846-6871>

Assanbayeva, Aisara – master, Department of Geography, Land Management and Cadastre, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty,

Kazakhstan, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan, 050000; email: asanbayeva01@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5355-7326>

Taukebayev, Omirzhan - PhD candidate, Space Technologies, and Remote Sensing Center, Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan, 050000; email: omirzhan.taukebayev@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7959-1434>

9. Funding: This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP19579270).

10. Acknowledgements: The authors have no additional acknowledgments to report.

11. Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

12. References

1. Ananda, F., Kuria, D.N., Ngigi, M.M. (2016). Towards a new methodology for web GIS development. *International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA)* 7(4), 47-66. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5121/ijsea.2016.7405>
2. Bissenbayeva, S., Shokparova, D., Abuduwaili, J., Samat, A., Ma, L., Ge, Y. (2025). Spatiotemporal Dynamics of the Aridity Index in Central Kazakhstan. *Sustainability* 17(15), 7089. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su17157089>
3. Bocco, G., Mendoza, M., Velázquez, A. (2001). Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping - a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology* 39(3-4), 211-219. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00027-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00027-7)
4. Burrough, P.A., McDonnell, R.A., Lloyd, C.D. (2015). *Principles of geographical information systems*. Oxford university press.
5. CSIRO. (2025). *Rangeland and Pasture Productivity (RaPP) Map*. Retrieved June 4 from <https://www.csiro.au/en/research/animals/livestock/RAPP-Map-GEOGLA>
6. Esri. (2020). *ArcGIS Pro documentation*. Environmental Systems Research Institute. Retrieved June 4 from <https://pro.arcgis.com>
7. Foody, G.M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote sensing of environment* 80(1), 185-201. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
8. Goodchild, M.F. (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal* 69, 211-221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y>
9. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of environment* 202, 18-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
10. Grohmann, C.H. (2015). Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. *Computers & Geosciences* 77, 111-117. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.31223/osf.io/6xc29>
11. Guindon, B., Zhang, Y. (2017). Application of the Dice Coefficient to Accuracy Assessment of Object-Based Image Classification. *Canadian Journal of Remote Sensing* 43(1), 48-61. <https://doi.org/10.1080/07038992.2017.1259557>
12. Haklay, M., Weber, P. (2008). Openstreetmap: User-generated street maps. *IEEE Pervasive computing* 7(4), 12-18. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1109/MPRV.2008.80>
13. Höhle, J. (2017). Generating topographic map data from classification results. *Remote Sensing* 9(3), 224. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs9030224>
14. Issanova, G., Saduakhas, A., Abuduwaili, J., Tynybayeva, K., Tanirbergenov, S. (2020). Desertification and land degradation in Kazakhstan. *Scientific Journal of Pedagogy and Economics* 5, 95-102. <https://journals.nauka-nanrk.kz/bulletin-science/article/view/829>

15. Jarvis, A., Lane, A., Hijmans, R.J. (2008). The effect of climate change on crop wild relatives. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 126(1-2), 13-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.013>
16. Kariyeva, J., Van Leeuwen, W.J. (2011). Environmental drivers of NDVI-based vegetation phenology in Central Asia. *Remote Sensing* 3(2), 203-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs3020203>
17. Kazhydromet. (2020). *Annual Bulletin of Monitoring the State and Climate Change in Kazakhstan*. https://www.kazhydromet.kz/uploads/files/403/file/619e16aeb6ec1ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-sostoyaniya-i-izmeneniya-klimata-kazahstana-za-2020.pdf?utm_source=chatgpt.com
18. Kurowska, K., Marks-Bielska, R., Bielski, S., Aleknavičius, A., Kowalczyk, C. (2020). Geographic information systems and the sustainable development of rural areas. *Land* 10(1), 6. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/land10010006>
19. Lillesand, T., Kiefer, R.W., Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
20. Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. (2015). *Geographic information science and systems*. John Wiley & Sons.
21. Makanga, P.T., Schuurman, N., Saco, C., Boone, H., Von Dadelszen, P., Firoz, T. (2016). Guidelines for creating framework data for GIS analysis in low-and middle-income countries. *The Canadian Geographer/Le Géographe canadien* 60(3), 320-332. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1111/cag.12295>
22. Minghini, M., Lupia, F., Napolitano, M., Palmas, A., Delucchi, L. (2017). Collaborative mapping response to disasters through OpenStreetMap: the case of the 2016 Italian earthquake. *Geom. geoingegneria ambientale e mineraria* 151(2), 21-26.
23. Miu, M., Zhang, X., Dewan, M., Wang, J. (2017). Aggregation and visualization of spatial data with application to classification of land use and land cover. *arXiv preprint arXiv:1704.05860*. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.05860>
24. Munkhdulam, O., Clement, A., Amarsaikhan, D., Yokoyama, S., Erdenesukh, S., Sainbayar, D. (2022). Detection of Anthropogenic and Environmental Degradation in Mongolia Using Multi-Sources Remotely Sensed Time Series Data and Machine Learning Techniques. In *Environmental Degradation in Asia: Land Degradation, Environmental Contamination, and Human Activities* (17-47 p.). Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-12112-8_2
25. Pachikin, K., Erokhina, O., Funakawa, S. (2014). Soils of Kazakhstan, Their Distribution and Mapping. In L. Mueller, A. Saparov, & G. Lischeid (Eds.), *Novel Measurement and Assessment Tools for Monitoring and Management of Land and Water Resources in Agricultural Landscapes of Central Asia* (519-533 p.). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01017-5_32
26. Reuter, H.I., Nelson, A., Jarvis, A. (2007). An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science* 21(9), 983-1008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/13658810601169899>
27. Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of environment* 145, 154-172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
28. Tatem, A.J., Noor, A.M., Von Hagen, C., Di Gregorio, A., Hay, S.I. (2007). High resolution population maps for low income nations: combining land cover and census in East Africa. *PloS One* 2(12), e1298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001298>
29. WorldBank. (2021). *Kazakhstan: Sustainable Livestock Development Program for Results*. <https://www.worldbank.org/en/country/kazakhstan/brief/sustainable-livestock-development-program-for-results>

30. Wulder, M.A., Loveland, T.R., Roy, D.P., Crawford, C.J., Masek, J.G., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Belward, A.S., Cohen, W.B. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote sensing of environment* 225, 127-147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>
31. Zhao, Y., Abdelkareem, M., Abdalla, F. (2024). Remote sensing and GIS techniques in Monitoring and mapping Land System Change in semi-arid environments. *Environmental Earth Sciences* 83(13), 420. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12665-024-11706-y>

Орталық Қазақстан өңірі үшін картографиялық материалдар мен қашықтықтан зондтау деректері негізінде сандық ГАЖ-негізін әзірлеу

Шнар Каирова, Назым Жеңісова, Жалғас Токтаров, Канат Зулпыхаров, Диас Токкожаев, Айсара Асанбаева, Омиржан Таукебаев

Аңдатпа. Мақала Орталық Қазақстан үшін әртүрлі кеңістіктік дереккөздерді біріктіру негізінде цифрлық геоақпараттық негіз құруға арналған. Зерттеудің мақсаты – талдау, экологиялық мониторинг және кеңістіктік модельдеуді қолдай алатын құрылымданған ГАЖ негізін әзірлеу. Әдістерге картографиялық материалдарды, қашықтықтан зондтау деректерін және сандық биіктік модельдерін интеграциялау, кейін оларды геожүйелеу, векторлау, топологияны бағалау және кеңістіктік деректерді талдау кіреді. Сандық нәтижелерге сәйкес, Орталық Қазақстанның гидрографиялық желісі 12 681 км өзендер мен салалары, жалпы ауданы 11 354 км² болатын 1 572 көлді, сондай-ақ ұзындығы 63 028 км автомобиль жолдары мен 8 288 км темір жолдарын қамтиды. Көлдердің векторланған шекараларының дәлдігін бағалау Landsat-9 пен OSM деректерінің жоғары сәйкестігін көрсетті (IoU = 0.86; Dice = 0.92). Бедердің еңістік, экспозиция және рельеф көлеңкелеуі сияқты морфометриялық туындылары эрозияға бейім аумақтарды айқындау және жердің тозу қаупін бағалау үшін пайдаланылды. Зерттеудің практикалық маңыздылығы аумақтық жоспарлау, қоршаған ортаны бақылау, инфрақұрылымды басқару және ғылыми мақсаттар үшін пайдалануға болатын жаңартылған цифрлық ГАЖ жүйесін құру болып табылады. Әзірленген жүйе WebGIS платформаларын қолдайды және нақты уақыт режимінде деректерді пайдаланатын аймақтық цифрлық аналогқа айналуы мүмкін.

Түйін сөздер: ГАЖ негізі; сандық карта; картографиялық материалдар; қашықтықтан зондтау деректері; Орталық Қазақстан; кеңістіктік жоспарлау; цифрлық негіз; Орталық Қазақстан ГАЖ негізі.

Разработка цифровой ГИС-основы для региона Центрального Казахстана на основе картографических материалов и данных дистанционного зондирования

Шнар Каирова, Назым Женисова, Жалғас Токтаров, Канат Зулпыхаров, Диас Токкожаев, Айсара Асанбаева, Омиржан Таукебаев

Аннотация: Статья посвящена созданию цифровой геоинформационной основы для Центрального Казахстана на базе интеграции различных источников пространственных данных. Цель исследования – разработать структурированную ГИС-основу, способную поддерживать анализ, экологический мониторинг и пространственное моделирование в регионе с высоким природно-ресурсным потенциалом. Методы включали интеграцию

картографических материалов, данных дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа, с последующей геопривязкой, векторизацией, оценкой топологии и анализом пространственных данных. Количественные результаты показали, что гидрографическая сеть Центрального Казахстана включает 12 681 км рек и ручьёв, 1 572 озера общей площадью 11 354 км², а также 63 028 км автомобильных дорог и 8 288 км железных дорог. Оценка точности векторизованных границ озёр продемонстрировала высокую согласованность данных Landsat-9 и OSM (IoU = 0.86; Dice = 0.92). Для определения зон, подверженных эрозии, и оценки рисков деградации земель были созданы морфометрические показатели, такие, как наклон, вид и оттенок холмов. Практическая значимость исследования заключается в создании обновленной цифровой ГИС-системы, которая может быть использована для территориального планирования, мониторинга окружающей среды, управления инфраструктурой и научных целей. Разработанная система поддерживает платформы WebGIS и может стать региональным цифровым аналогом, использующим данные в режиме реального времени.

Ключевые слова: ГИС-основа; цифровая карта; картографические материалы; данные дистанционного зондирования; Центральный Казахстан; пространственное планирование; цифровая основа; ГИС-основа Центрального Казахстана.

Geographical Features in the Landscape Planning of Recreational Areas in the Alakol Basin

Bayan Kerimbay, Kuat Baymyrzayev, Nurzhan Kerimbay*, Erkin Tokpanov, Anuar Issabayev

I. Zhansugurov Zhetisu University, Taldykorgan, Kazakhstan;
kbs.zhetysu@gmail.com; k.baymyrzayev@zu.edu.kz;
tokpanov1960@mail.ru; a.issabayev1089@gmail.com
*Correspondence: n.kerimbay1964@gmail.com

Abstract: In the article, the problems of landscape planning in environmental protection measures were considered. Landscape planning (LP) is a scientific direction in landscape science that studies the spatio-temporal organization of community life in certain geographical areas. Aiming to achieve the maximum adaptation of the functional areas of the farm to the landscape structure and create new optimal anthropogenic and cultural landscapes. The theory and practice of economic development, as well as the placement of environmental prerequisites and constraints that are characteristic of regional landscape features.

The relevance of the work is the development of a landscape management system adapted to the natural environment of the local area, the preservation of large areas of special protection, the reproduction and protection of unique plants that are declining, the modeling of an aesthetic artistic and cultural landscape in the territory of tourist recreation zones and private residential buildings, the greening of cities and villages - in other words, the ecological organization of nature. The relationship between man and nature is a coordination problem with art and beauty.

This study presents a landscape design plan for the "Merry Resort" tourist recreation zone near Lake Alakol in Kazakhstan. The plan prioritizes ecological sustainability, aesthetic appeal, and the integration of local flora and fauna. Utilizing the Realtime Landscaping PRO application, the study models a diverse range of zones, including recreation areas, accommodation zones, and ecologically sensitive areas. Particular emphasis is placed on the cultivation of declining plant species, such as the Sievers apple tree, and the creation of an alpine-style landscape. The research incorporates theoretical frameworks of landscape planning, considering the region's unique geographical and climatic conditions, including the impact of strong winds and water characteristics. The findings contribute to sustainable tourism development in the Alakol region, enhancing both the aesthetic and ecological value of the area.

Citation: Kerimbay, B., Baymyrzayev, K., Kerimbay, N., Tokpanov, E., Issabayev, A. (2025). Geographical Features in the Landscape Planning of Recreational Areas in the Alakol Basin. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, 152(3), 142-156.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-142-156>

Academic Editor:
N.Ye. Ramazanova

Received: 08.08.2025
Revised: 06.09.2025
Accepted: 15.09.2025
Published: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Keywords: Landscape planning, landscape design, recreation area, ecological sustainability, Alakol Lake, Realtime Landscaping PRO, Sievers apple tree, alpine slope, sustainable tourism.

1. Introduction

The integration of increasingly available remotely sensed data and crowdsourced big data provides opportunities to quantify the continuum of urbanity in a spatially explicit way. Remotely sensed data have long been used to map urbanized areas (Lian Zhu et al., 2021) and to quantify urbanization-related indicators such as population density and socio-economic profile of urbanized areas (Li et al., 2020; Zhang, H. et al., 2018; Zheng et al., 2023).

Merrey is located in the village of Akshi, which is part of Yrgayty rural district, Alakol district, Zhetysu region, Republic of Kazakhstan. Resort: the territory of the tourist recreation zone. Based on the plan/ning of this area, develop a model of landscape design. Since the village is situated on the shore of Lake Alakol, it offers numerous tourist and recreational areas. Our experimenter, "Merry Resort" tourist recreation zone, is located 100 m east of Lake Alakol.

The purpose of the work is the aesthetic and cultural landscape design of a comfortable and picturesque natural living area in the recreation area, beautifying the landscaping area, correctly planning recreation and green areas, and rational placement of objects in the recreation area. The object of research is "Merry The task was set to effectively plan therapeutic and recreational resources in the territory of the "Resort" tourist recreation zone and to create a model of landscape design by collecting flora species adapted to this area, beautifully in the shape of the alpine slope of the relief (Anvar et al., 2020).

The increasing availability of remotely sensed data and crowdsourced information provides valuable insights for urban planning and landscape design. This study leverages these data sources to inform the creation of a comprehensive landscape plan for the "Merry Resort" recreation zone, situated on the shores of Lake Alakol. The unique characteristics of the area, including its location within the Balkhash-Alakol basin and the presence of Lake Alakol's unique geochemistry and microclimate, are crucial factors in designing a sustainable and aesthetically pleasing environment. This research aims to create a model that balances recreational opportunities with environmental conservation.

Research methods: Realtime Landscaping PRO is a modeling method in a landscape design planner application. Plan the area by dividing it into zones using the program's visualization options and 3D features.

The study employs a multi-faceted approach. First, existing data on the geographical and ecological characteristics of the Alakol region, including topographical maps, soil analysis, and plant species inventories, are gathered. Secondly, the Realtime Landscaping PRO application is used to model the landscape design, simulating different zones (e.g., recreation, accommodation, ecological zones). The plan is designed to effectively manage therapeutic and recreational resources while considering the aesthetic integration of various landscape elements, such as alpine slopes, and incorporating local plant species.

Another component of the destination image is the affective component, which refers to the emotional and attitudinal responses that an individual has toward a destination. (Fuchs & Reichel, 2006) maintained that emotional attachment to a destination positively influenced tourists' loyalty to that destination, and argued that emotional responses such as enjoyment and satisfaction were significant predictors of tourists' intention to revisit. Similarly, researchers have found that tourists' emotional experiences, such as nostalgia and awe, play a crucial role in shaping their overall experience of a heritage destination (Reyes & Dael, 2023).

2. Materials and methods

A field of activity based on the integration of geography, landscape science, territorial planning, and land management. The geographical landscape is a relatively homogeneous part of the geographical shell, which includes natural constituents (topography, climate, water, soil, plant communities, and animals) and morphological parts (facies, settlements, and local areas) and has its own structure. The term "Landschaft" (German: Land, schaft, a suffix denoting interconnection) was coined by the Russian scientist L. S. Berg. The main indicators characteristic of the geographical

landscape includes the homogeneous nature of the territories, the complex nature and unity of the constituents, stability, and homogeneity of matter and energy exchange (Ian Smalley et. al., 2010).

The term geographic landscape has a definition of "a natural complex that is constantly developing while preserving its historical formation and integrity" or "a natural geosystem." Landscapes are classified into types, subtypes, and species. The classification of landscapes takes into account the conditions of emergence, moisture supply, and geobotanical signs. The set of all landscapes on the globe is called a sphere. As a result of landscape clusters and landscape maps of various scales, mathematical models of geographical landscapes are now created, and information about them is processed by computers. A landscape changed by human activity is called an anthropogenic landscape.

Cultural landscape. It is a man-made work of art made from natural space. UNESCO defines it as "the joint image of nature and human creativity." In the 2000 landscape convention of the Council of Europe, it is defined as "the result of the action and interaction of natural and/or human factors".

Planting trees in the cultural landscape creates a microclimate, affects the quality of the soil, determines the hydrological processes in this area, and plays an important ecological role. Territories protected by such plantings are better for use in economic activities than open areas. Forest plantations around water bodies protect them from shoreline erosion with fine particles of sand and soil. The weakening of the wind and the cultural and artistic design of the landscape, especially in the recreation areas, directly affect the mood of tourists.

The goal of the LP theory is to ensure sustainable (balanced) use of nature, preserving the main functions of natural landscapes and their components as a separate system of the biosphere. Within the framework of the regional policy of the state, LP is a component of territorial planning and serves as a means of environmental protection. The design levels of LP are implemented in different hierarchies of territory organization.

The LP is to create a project based on the applied programs in accordance with the landscape program of the territory development, to create a landscape plan (on a scale of 1:200,000 to 1:100,000) and a large-scale landscape plan (1:25,000 and above). includes the development of regulatory documents for the implementation of landscape plans and monitoring their implementation.

The algorithm for performing scientifically interrelated procedures in modern LP, based on the concept of landscape planning, consists of five stages (Getting Started with Realtime Landscaping Pro, 2024).

1. The context of preliminary inventory and analysis of landscape and ecological problems of the territory aimed at collecting and summarizing all available information about the natural environment of the territory, its social and economic conditions, the structure and peculiarities of land use, as well as getting ideas about the main contradictions of land use.

2. Assessment of the importance and sensitivity of the current natural conditions of the planning territory, as well as assessment of the nature of land use.

3. Creating targeted concepts of natural resource use for individual natural environments.

4. Development of a comprehensive target concept of land use (land use concept).

5. Formulation of the concept of the main directions of action and modeling.

Modern landscape design is a set of activities, the goal of which is to create a landscape plan that is adapted to specific environmental conditions and meets all customer requirements.

Lawns and flower beds, natural fences and water ponds, stone paths, large trees and shrubs, planting flowers - all the attributes of living nature familiar to such eyes should perfectly adapt to local conditions and please the owners with their vitality for a long time.

Landscaping gives future owners confidence that they are the owners of a truly unique space. Any landscape projects are carried out in close dialogue with the customer, whose opinion determines the individual intonation of the outdoor environment, which should be reflected in a specific decorative form.

Based on professional landscape design, first of all, it is necessary to carefully consider all available factors: topography (plains, mountains, slopes, etc.), soil quality and structure, and climatic

conditions. After the customer and the landscape designer come to a joint, clearly formulated decision, specialists begin to create plans and models of the future landscape.

Landscape design is a unique art based on the artistic decoration and improvement of residential gardens, recreation areas, landscape gardening, and architectural objects.

It is urbanized, observing the rules of landscape design. With macroforms, you can beautify almost any part of the land, creating the landscape harmony of nature. Programs offered on the Internet for both professional and amateur design of summer cottages by the owners help to solve this problem.

The dominant objects in the spatial structure of the landscape composition are residential buildings, recreation areas, communal buildings, and other buildings. Around them are all the other pieces. Programs for creating landscape compositions usually include advice on the location of the following elements in the designed area:

- lawns that create a general background for the landscape of the plot on the slope.
- green spaces: trees, flowers, bushes, grass.
- decorative sculptures, lighting lamps, and fences.
- architectural forms: benches, stairs, gazebos on the square, bridges.
- alpine slopes, fountains, streams, and cascades (Figure 1).
- water ponds, artificial small lakes, or ditches (Figure 2).



Figure 1. Landscape design, example of an alpine slope with cascading water

In cases where the water bodies do not exceed the permissible value, forest strips protecting the main (longitudinal) field are located horizontally in the direction of more dangerous winds (causing dry winds, blizzards, and dust storms).

Forms of research. Alakol is a bitter-salty lake located in the south-east of Kazakhstan, on the border of the Abai and Zhetysu regions, in the Balkhash-Alakol pothole. Known as "healing lake." Balkhash-Alakol crater is a large tectonic structure. It is bounded in the north by Saryarka, in the east by the Tarbagatai ridge, in the south by the Zhetysu and Ile Alatau mountains, and in the west by the Zheltau and Aitau mountains.

Kazanshunkyr is divided into Balkhash and Alakol depressions. The total length is 800 km. Its width is 300 km near Lake Balkhash and 100 km near Sasykkol. The bottom of Kazanshunkyr is formed from folded Paleozoic sediments, igneous rocks, and intrusive rocks. They are covered by continental loose rocks from the Cretaceous, Paleogene, Neogene, and Quaternary periods. The majority of the territory is occupied by quaternary sand fields such as Sary-esik-atyrau, (Lekkum), and Taukum, with an absolute height of 342–600 m.

Alakol Lake can be considered truly unique; there are mountains and steppes around the lake, and between the mountains. In the south-east of the lake is the "Dzungar Gate" pass, which stretches for about 10 kilometers (Figure 2).



Figure 2. Dzungar Gate

Due to its unique nature, strong winds often blow in Alakol. That's why there are real sea storms in Alakol. The storm starts suddenly and develops very quickly.

There is a reason why the lake is called "Ala Kol" in Kazakh. The color of Lake Alakol changes from light blue to dark brown during storms, depending on the weather, time of day, and season. The resort villages of Akshi and Koktuma are located on the western shore of the lake, about 60 kilometers from the Kazakh Chinese border.

Hydrography. It is located in the semi-desert region in the east of the Balkhash-Alakol basin, near the coal deposit, at an altitude of 343 meters. It stretches from west to east; the area (with islands) is 2696 km²; the length is 104 km; the maximum width is 52 km; the depth is up to 54 m; and the water volume is 58.56 km³. The annual fluctuation of the level is 1.2 m. Freezing continues until January or April. The diving season lasts about 3.5 months (June to mid-September). Water contains sodium chloride.

Urzhar, Katynsu, Emelkuysa, Zhamanotkel, and Jamaty rivers flow into it. Alakol and shallow Koshkarkol, Sasykkol, and Jalanashkol lakes make up a system of lakes with an area of up to 55,000 km². The amount of fluorine and bromine in Alakol water has increased. According to one of the scientific assumptions, in the early geological ages, there was a single wide lake in place of a number of lakes. The hypothesis is based on geological drilling data that found lacustrine sediments in the now dry areas surrounding the lakes.

The composition of the water in Alakol. The composition of the water in Alakol is as salty as that of the sea. In terms of composition, sodium chloride and sodium chloride-sulfate water can be compared with the water of the Black Sea. By the water area of water mineralization from 1.2 to 11.6 g/l until it swings. Alakol Valley's moisture is not enough for the region, which is an excellent climatic resort. In Alakol, the bathing season of season in the middle opens. Amazing, the coast is healing; see Malta stones. of the lake, the bottom Malta stoned of the coast, some points muddy, coastal day from heat received in May, gravel stones closed. Holy from the water, other here hydrogen sulfide clay, and of the field mineral with saturated clean, dry air.

Groundwater is mostly concentrated in Neogene and Quaternary formations. In terms of ionic composition, groundwater is divided into sulfate-chloride, sodium-calcium, and sulfate-chloride sodium-magnesium. They are different in terms of productivity, degree of mineralization, and chemical composition (Asmelash & Kumar, 2019).

Climate. The climate in the Alakol region is sharply continental: dry summers and relatively cold, snowless, windy winters. The average annual air temperature varies between +6.2 and 7.2°C. In July, the average air temperature at the Zhetysu gate is +25.3°C, +24.1°C in the Usharal district, and the absolute maximum is +42°C. Most of the precipitation falls in April–May and November–December.

Soil and vegetation. Most of the land in Alakol district is made up of gray soil from the desert belt and dark brown and pale brown soil from the mountain slopes and valleys. In the sandy valleys, there are some and saline soil types.

In the vegetation cover of the steppes, sagebrush, sorghum, willow, blackberry, bramble, and sedge, reed, wheatgrass, and grain plants grow along the river valleys. High mountain slopes and valleys are covered with spruce-pine forest. River valleys and sand hills are used as winter cattle pastures, and plains on mountain slopes are used as irrigated fields.

The flora of this place comes in the following types:

- Siberian fir is a coniferous tree belonging to the pine family.
- The Sievers apple tree is the ancestor of the domestic apple tree.
- The Niedzwieki apple tree is a tree that looks like a Japanese cherry blossom with its pink flowers.
- Ostrovsky tulips: a bright red flower with sharp leaves.
- Kolpakovsky iridodicii: pale purple gray iris;
- Altai holosemyannigi is a medicinal plant.
- Adonis is a unique plant whose leaves resemble pine needles.

Fauna. As for the fauna, in the central part of the lake, there is an archipelago consisting of three islands, where the Alakol State Nature Reserve was established in 1998. Alakol is considered to be a very important road junction for birds flying from Central Asia to spend the winter in India and Africa. Hundreds of thousands of birds find shelter and rest here; most of them are listed in the Red Book. Among them are pink and curled terns, whooper swans, white-ailed ducks, white-tailed eagles, white-tailed cranes, duadaks, relict gulls, flamingos, etc.

The coastal area is inhabited by many birds: blackbirds, swans, eagles, herons, etc. The main attractions for tourists are: relict seagull, black-necked seagull, Birds belonging to the order of Tatra, the family of seagulls

Alakol is rich in fish; there are up to 80 species of zooplankton. White perch, Ottoman (Odnatsvetny gubach), lake and river bream, carp, pike, and mullet. Fishermen are interested in catching marinka, gubach, perch, pike, and carp.

"Alakol-Arasan" mud treatment center is working in the village of Aktubek for the development of health and wellness tourism in the region. If we believe in modern medicine, clay and salt water

give healing properties to Alakol water. Clay treatment for joint and skin diseases, radiculitis, and injury. The clay contains a lot of silicon and is able to strengthen immunity. The water on the north-eastern side of the lake is salty. It contains a lot of chlorine and sodium salts, chlorine, sodium sulfate, fluorine, and bromine. This property of water is good for calming the nervous system and treating skin diseases. The water in Alaköl is warm in the summer, +27–28°C. In 2018, scientists from D. Serikbaev State Technical University and the Tomsk Research Institute of Spa Resorts and Physiotherapy studied the water of Alaköl and found out that it contains a lot of radons. Such a composition of radon water is a treatment for dermatology, gynecology, diseases of the endocrine system, the gastrointestinal tract, and back and lower back diseases to prevent joint, lumbar, and back diseases.

- Osteochondrosis.
- cardiosclerosis.
- chronic thrombophlebitis.
- Skin diseases (eczema, neurodermatitis);
- diseases of the central nervous system (radiculitis, vegetative neurosis, thinning of the nervous system, neurosis).

There are more than 20 recreation centers in Alakol district on the shores of Lake Alakol, which receive from 10 to 130 people per day. A significant number of tourists stay in private hotels. In 2004, 11,000 people rested on the southern shore of Lake Alakol, and in 2005, the number of tourists reached 12,000. In 2012, the total number of tourists is expected to be about 25 thousand, and many people prefer to reach the resort area by their own car and stay in the camps. At present, Lake Alakol is the most rapidly developing summer and seasonal tourist center in Kazakhstan.

1. Background and Literature Review

Summarize relevant literature on landscape planning, ecological principles, and the specific characteristics of the Alakol region. Focus on the theory of cultural landscapes, anthropogenic impacts, and sustainable approaches to landscape design. Incorporate citations.

2. Case Study: The "Merry Resort" Recreation Zone.

Provide a detailed description of the "Merry Resort" zone, including its location, size, existing infrastructure, and environmental constraints. Highlight the unique aspects of the region's flora (Sievers apple tree, other endemic or threatened species) and fauna.

3. Landscape Design Zones.

Describe the planned zones of the recreation area. Include details on specific design elements, such as the proposed alpine slope zones, tree planting strategies for wind protection, and the location of accommodation and recreation facilities. This section should be more concise and focused on the key features of the design.

4. Plant Selection and Integration.

Focus on justification for selecting specific plant species, considering their adaptation to the local climate and soil conditions, their aesthetic value, and their potential ecological benefits (e.g., windbreaks, biodiversity). Specific examples of trees, shrubs, and ground cover should be included.

5. Water Management and Hydrological Considerations.

Address the unique hydrology of the area, specifically Lake Alakol and its impacts on the design. This includes water resource management, potential water features (e.g., ponds, waterfalls), and considerations related to the area's moisture levels. (Bramwell, B. and Lane, B., 2015).

3. Results

Real-time planning in the Landscaping PRO application. Realtime Landscaping Pro is a professional landscape design planning program. Offers good visualization options for modeling a yard or garden. Since the program uses 3D capabilities, the design looks very realistic. The database contains many different types of garden decor elements. As a result, the garden can be planned down to the smallest detail. The application can be used by both novice designers and professional masters of their work. Realtime Landscaping Pro works in English and can save a project (Getting Started with Realtime Landscaping Pro).

Powerful and professional design, all in real time. Landscaping is an application program that includes many powerful visual tools to help you develop landscape design ideas professionally.

To simplify the process of creating a landscape design model, you can upload a photo of the exterior and work with it in a full 3D environment. The program includes more than 11,000 elements, as well as 5,500 different plants and shrubs, which allows you to accurately represent ideas on the screen. With online tutorials available, the entire design process is suitable for both beginners and professionals and therefore does not require much experience.

Landscape design of a garden plot means the arrangement of natural landscape elements in different areas. Landscape design for beginners: starting with the size of the site, regardless of the parameters of the summer cottage, when it comes to its improvement, every millimeter can be used as rationally as possible. Therefore, it is necessary to approach the placement of various elements as responsibly as possible, observing various principles.

Let's take a closer look at the planning features of the area near the recreation area based on its parameters. The landscaping of a 10-hectare garden plot can turn into a well-equipped area that will bring pleasure and joy to its owners. During planning, four main areas should be considered: residential, communal, landscaping, and recreation areas.

The most optimal option for space design is to place objects according to the rectangular principle. Central and side areas are usually used for landscaping. Landscaping may include additional buildings. A popular solution for landscaping a summer residence is to build a gazebo (gazebo) on the territory. It serves as a perfect vacation spot. The landscape design of a summer cottage or a private house plays a major role in the surrounding landscape.

Beautiful flowers, decorative trees, and interesting sculptures provide an aesthetic impression to the vacationers as opposed to the boring and dull concrete walls. But trends in landscape design do not stand still. Shrubs and classic flower beds are replaced by a new type of decorative decoration: a rock garden. Often, a competent, aesthetic combination of dome-shaped stone and small plants is called an alpine slope.

Features of the placement of the alpine slope. Placing an alpine slope in a recreation area does not cause any problems. It is a specific feature of the terrain that corresponds to the composition of possible species; the surface stones represent the top of the alpine meadows and vegetation. Landscaping should give the impression of natural rock outcrops.

For the flower garden, you should choose a high place so that the whole alpine composition gets good sunlight. Landscape elements should not be placed near or under trees; this will have a bad effect on plants. On cold, rainy days, moisture in the leaves overwaters open areas of the mountain. This can cause plant stress. Fallen leaves in autumn not only spoil the appearance but also turn delicate flowers into a pile of leaves.

4. Discussion

Owners of summer recreation areas, before placing an Alpine slope in the garden, dig a foundation pit, fill it with drainage, and only then start designing. In fact, the arrangement of the alpine slope does not require such complicated work because the rain that falls on the top of the hill flows immediately to the feet, and the plants do not feel an excess of moisture. Some installation tips are provided (Coelho et. al., 2018).

1. Mountain slope (stone): open rocks with a minimum amount of vegetation. It can be built only on a steep slope.
2. Alpine meadow: stony soil, low vegetation.
3. The mountain valley is a rocky garden. Large rocks partially sticking out of the ground are surrounded by decorative alpine.
4. Waterfall (mountain spring).
5. The mountain gorge is the most impressive composition. It can be placed in a natural pit, covered with stones, and planted with alpine flora.

Mountain landscape, in such a small copy of a natural relief, stones are combined with several small plants and dwarf trees.

What plants are suitable for a rock garden on alpine slopes?

The wonderful landscape is emphasized by various mountain plants, but the climatic conditions of the region should be taken into account when arranging the landscape composition of the summer recreation area. Plants for the rock garden are selected to adapt to the conditions of the climatic zone.

Alpine slopes are famous for the harmony of the delicacy of flowers with the inaccessibility of stone elements, so to achieve the maximum natural similarity, it is necessary to use only low-growing grassy plants.

Garden waterfall.

A garden waterfall can not only transform the garden but also make it functional. In such a place, you can relax by watching the flowing water and listening to its sound. This significantly improves the moral and psychological condition of a person. Doctors in many European countries say so.

In addition, water structures can repeatedly improve the visual characteristics of any landscape and give it a natural look. A waterfall plays one of the first roles in landscape design. This simple element is incredibly popular in many cultures and styles, especially in Chinese and Japanese design. It was the inhabitants of these countries who were great lovers of all aspects of nature. So over time, they have come up with a way to create artificial waterfalls that can easily be placed in their homes.

Types of garden waterfalls.

A fountain made of stones. Natural stone is considered the best material for these installations. Stylists say it's a great choice. The stone is practically indestructible, so it can serve you for decades. The stone version with cascades is one of the most popular types of waterfalls in our time.

It is better not to have trees above the waterfall; many leaves fall from them in autumn. You should choose a place where you can see the waterfall from a window, porch, terrace, or usually from a sitting area in the garden. The waterfall pump should be near the power source (Coelho, M.S. et al., 2018).

"Merry, the territory of the landscape design of the resort "recreation zone:

- 11 natural landscapes (1–10, 15);
- 4 large tourist accommodation and economic zones (11–14);
- We divided the flint footpath (16) into zones (Figure 3).

"Merry Zones of Landscape Design of the Resort » recreation zone:

- Siberian fir-growing zone.
- Stone rose Alpine slope zones.
- Various floral planting zones.
- Samaljal zone.
- Ornithofaunal wastewater zone.
- A fountain made of stones.
- The zone where the healing mud barrels are located.
- Coniferous and diverse vegetation zone.
- Coniferous, shrubby plant zone.
- Japanese maple garden zone.
- "Merry "Resort" recreation zone residence.
- Car parking.
- Barbecue zone.
- Warehouse.
- Sievers apple orchard zone.
- Flint footpath.



Figure 3. "Merry Resort is an example of the landscape design of a recreation area.

In the south of the territory, between the parking lot and the storage block, 2 rows of (1) Siberian fir will be planted. In addition to this place, Siberian fir is also planted in large numbers in zones (3, 4, 6, 8, 9, and 15). This is because the Siberian fir does not tolerate water stagnation, soil salinity, or dryness and prefers well-drained, sandy, and clay soils. It is very resistant to frost and cold; it lives for 300–500 years. Plants are grown as single specimens or in rows.

Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb): up to 30 m in height, very pointed head, straight trunk, thick bunch of branches, grows smoothly. A slow-growing coniferous tree belonging to the pine family. As they grow, they spread out, so they should be at least 6 meters away from each other or other trees. For this reason, it is better to plant it in recreation areas with a wide yard than in narrow yards.

Spruce bark contains 8–15% fatty substances; its bark contains vitamin C, ascorbic acid, and essential oil; and its fruit contains 25–29% liquid oil. Due to its special air-purifying properties, this "Merry Resort plans to sow a lot in the recreation area. Because, in addition to its healing properties, it beautifies the recreation areas very well.

In zone (15), which occupies a large part of the territory due to the favorable natural and climatic conditions and soil of the region, many Sievers apple trees (*Málus sievérsii*) are planted. The Sievers apple is a declining species in the Rosaceae family, a valuable edible tree, a supporter of mountain slopes, and a wild relative of many cultivated varieties. A wild fruit of apple trees in the foothills of Central Asia and Kazakhstan. It blooms in April–May, and apples ripen in August–September.

In the zones (2, 3, 4, 5, 6, 8, 9) of the territory, on the Alpine slopes, it is planned to grow a large number of stone roses along with miniature rose plants. Stone rose, *Echeveria*—this plant is an indispensable solution for flower growers and landscape designers. This is because, despite all its decorative qualities, growing a rock rose is easy and simple. Stone rose is a low-growing herb with fleshy rosette leaves and belongs to the perennial Tolstyankov family. Rock rose grows in rocky soil

and sandstone where other plants cannot survive. Value: decorative effect and ease of cultivation. This explains the wide use of stone roses in landscape design, such as for decorating alpine slopes and flower beds.

Our recreational specialty in the recreation area is the healing mud located in Zhalanashkol, 30 km from the village of Akshi. If we believe in modern medicine, clay and salt water give healing properties to Alakol water. Clay treatment for joint and skin diseases, radiculitis, and injury. Clay contains a lot of silicon and can strengthen immunity. Healing mud is very popular among tourists and is in great demand. At the moment, healing mud is spontaneously sold to vacationers on the coast for 500 tenge per kg in cellophane bags.

And we suggest planning to make wooden barrels in the western part of the Alpine slope in the territory of landscape design, dig a pool, and fill the wooden barrels with healing mud. It is recommended to install 2 pools with a length of 2 meters, a width of 1 meter, and a height of 1.5 meters, transport them every 15 days with a special vehicle, and renew the mud. In this zone, sanitary showers will be installed for those who receive healing mud. And in zone (16), instead of concrete pavements, natural flints will be brought in, and a pink flint pavement will be made. These stones can be brought from Shybindy Mountain, 30 km from Akshi village, which is financially beneficial.

Researchers and local governments have constructed urban redevelopment models by combining the SSI and GI theories, incorporating both residents' activities and physical changes in communities. Undoubtedly, GIS has become ubiquitous for scientists to comprehend urban redevelopment by linking data to demographic and socioeconomic characteristics. However, current research on urban redevelopment identification sometimes faces challenges in delivering timely and precise information for various reasons.

Present the output of the Realtime Landscaping PRO model and its key features. Evaluate the suitability of the proposed plan in terms of its ecological impact, aesthetic appeal, and potential for sustainable tourism.

5. Conclusion

The purpose of the research work was to design a cultural landscape design of a comfortable and beautiful natural living area in the recreation area that matches the taste of tourists, to beautify the landscaping area, to properly plan recreation and green areas, to divide them into zones, and to place objects rationally.

For this, the concept of landscape planning, as well as its development trends and general importance in the system of environmental protection measures and the physical-geographical situation of the Alakol lake basin, were considered. After determining its biogeography, it was found that it is rich in flora and fauna. It is possible to grow Sievers apple trees, conifers, and all the birds that fly to the warmer regions.

Research object: "Merry In the territory of the "Resort" tourist recreation zone, we have effectively placed medical and recreational resources and created a landscape design model by collecting flora adapted to the Akshi rural district in the form of an alpine slope. According to this model, we have divided the recreation area into 16 zones. Merry, the area where the landscape design of the resort zone will be created is mainly natural landscape zones, tourist accommodation, and business zones. We divided the flint into footpath zones. It is planned to place a zone of wooden barrels in our recreation area, preserving the composition of healing mud, which is characteristic of Alakol Lake.

In general, in the course of this work, we planned to study the "Merry Resort" recreation area, create favorable conditions for tourists, and heal with therapeutic water and mud. The aesthetic effect of the beautiful natural landscape and the high emotional mood were guided. In addition, the ecological importance of growing, multiplying, and protecting the dwindling Sievers apple orchards in Zhetysu Alatau was also considered.

The study demonstrates that ecologically based landscape planning promotes biodiversity, enhances water and soil sustainability, and facilitates climate regulation, while also creating aesthetically diverse and restorative environments. The proposed design illustrates how sustainable

resource management can strike a balance between ecological resilience and cultural and recreational values. For similar contexts, future research should quantify ecosystem services, integrate local participation, and assess adaptive strategies under climate change scenarios.

6. Supplementary Materials: No additional materials.

7. Author Contributions

Conceptualization, methodology development, supervision – N.K.; methodology development, software and project management – B.K.; methodology development, research material provision, supervision – K.B; methodology development, research material provision, supervision – Ye.T.; text preparation and editing – A.I.; analysis – N.K., B.K.

8. Author Information

Kerimbay, Nurzhan – Head of the Laboratory of Ecology, I. Zhansugurov Zhetysu University, Zhansugurov str. 187a, Taldykorgan, Kazakhstan, 040009; email: n.kerimbay1964@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6682-1424>

Kerimbay, Bayan - Senior Researcher, Laboratory of Ecology, I. Zhansugurov Zhetysu University, Zhansugurov str. 187a, Taldykorgan, Kazakhstan, 040009; email: kbs.zhetysu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2382-303X>

Baymyrzayev, Kuat - Director of the Research Institute of Biotechnology and Ecology, I. Zhansugurov Zhetysu University, Zhansugurov str. 187a, Taldykorgan, Kazakhstan, 040009; email: k.baymyrzayev@zu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8311-9685>

Tokpanov, Erkin - Senior Lecturer, Faculty of Natural Sciences and Engineering, I. Zhansugurov Zhetysu University, Zhansugurov St. 187a, Taldykorgan, Kazakhstan, 040009; email: tokpanov1960@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2029-5278>

Issabayev, Anuar - Senior Lecturer, Faculty of Natural Sciences and Engineering, I. Zhansugurov Zhetysu University, Zhansugurov St. 187a, Taldykorgan, Kazakhstan, 040009; email: a.issabayev1089@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8023-8306>

9. Funding: Not Funding

10. Acknowledgments: None.

11. Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

12. References:

1. Anvar, R.K., Khadian, M.S.D., Khadidzha, U.L.S. (2020). Development of tourism based on landscape optimization as a creative economic activity of the community. *Journal of Environmental Management and Tourism* 11(4(44)), 937–942. [https://doi.org/10.14505/jemt.11.4\(44\).18](https://doi.org/10.14505/jemt.11.4(44).18)
2. Arys Publishing House. (2004). Encyclopedia. Almaty: Arys.
3. Asmelash, A.G., Kumar, S. (2019). Assessment of progress in sustainable tourism development: Development and testing of sustainability indicators. *Tourism Management* 71, 67–83. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.09.020>
4. Atsbha, G.A., Satinder, K. (2019). Corrigendum to “Assessing progress of tourism sustainability: Developing and validating sustainability indicators”. *Tourism Management* 71, 67–83. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.09.020>
5. Bondareva, O.B. (2007). Flowerbed and live izgorodi. Donetsk: Stalker.
6. Bramwell, B., Lane, B. (2015). What drives research in sustainable tourism. *Journal of Sustainable Tourism* 23(1), 1–3. <https://doi.org/10.1080/09669582.2014.986488>
7. Coelho, M.S., Carlos, P.P., Pinto, V.D., Meireles, A., Negreiros, D., Morellato, L.P.C., Fernandez, G.V. (2018). The relationship between functional characteristics of trees and environmental

- parameters in an archipelago of mountain forests surrounded by rocky meadows. *Flora* 238, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.04.003>
8. Dawa, Z., Zhou, W., Pickett, S.T.A., Guo, C., Yao, Y. (2024). Urbanity mapping reveals the complexity, diffuseness, diversity, and connectivity of urbanized areas. *Geography and Sustainability*. Elsevier B.V. & Beijing Normal University Press (Group) Co., Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.xxxxxx>
9. Description of Alakol Lake. (n.d.). Retrieved from <https://qazaqstan3d.kz>
10. Dzhanelieva, G.M. (2010). Physical geography of the Republic of Kazakhstan. Astana: Arkas.
11. Fuchs, G., Reichel, A. (2006). Tourist destination risk perception: Israel. *Journal of Hospitality and Leisure Marketing* 14(2), 83–108. https://doi.org/10.1300/J150v14n02_06
12. Getting Started with Realtime Landscaping Pro. (2025). Retrieved from <https://ideaspectrum.com/landscaping-software-tutorials>
13. Kerimbay, B.S., Dunets, A.N., Baryshnikova, O.N. (2021). Natural potential of landscapes of the Sharyn river basin as the basis for the development of health tourism in Kazakhstan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 670(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/670/1/012021>
14. Kerimbay, B.S., Janaleeva, G.M., Kerimbay, N.N. (2020). Tourist and recreational potential of landscapes of the specially protected natural area of Sharyn of the Republic of Kazakhstan // *GeoJournal of Tourism and Geosites* 28(1), 67–79. <https://doi.org/10.30892/gtg.28105-452>
15. Kerimbay, B.S., Sadvakassova, S., Dunets, A. (2022). Influence of the hydrological regime on the state of floodplain geosystems of the Sharyn River. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture* 14(3), 355–376. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-3-355-376>
16. Kolbovsky, E.Yu. (2008). Landscape planning. Moscow: Akademiya.
17. Lin, L., Di L., Zhang Ch., Guo L., Zhao H., Islam D., Li H., Liu Z., Middleton G. (2024). Modeling urban redevelopment: A novel approach using time-series remote sensing data and machine learning. *Geography and Sustainability* 5(2), 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.xxxxxx>
18. Otdykh na Alakole. (n.d.). Retrieved from <https://algritravel.kz/alakol>
19. Quint, I. (2010). I will create landscape design for the computer. St. Petersburg: Peter.
20. Realtime Landscaping Pro. (n.d.). Retrieved from <https://softfamous.com/realtime-landscaping-pro>
21. Reyes, K.T.D. L., Dael, R.J. (2023). Influence of destination image and tourist satisfaction on destination loyalty. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies: Business and Management Sciences* 4(3), 46–61.
22. Sapelin, A. (n.d.). 10-stage design in small. Moscow: AST.
23. Shikanyan, T. (2018). Landscape design: My own with hands—from the project to the embodiment. Moscow: Eksmo.
24. Smalley, I., Markovic, S., O’Hara-Dhand, K., Wynn, P., Loess, G. (2010). A man from Bendery: L. S. Berg as geographer and loess scholar. *Geologos* 16(2), 111–119.
25. Ustelimova, S.V. (2003). Landscape design. Moscow: Veche.
26. Zhang, H., Wu, Y., Buhalis, D. (2018). A model of perceived image, memorable tourist experiences, and revisit intention. *Journal of Destination Marketing & Management* 8, 326–336. <https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2017.06.001>
27. Zhu, L., Zhan L., Li Sh.K. (2021). Is sustainable development feasible for tourist destinations? An empirical study of the relationship between ecological competitiveness and tourism growth. *Sustainable Development* 29(1):66-78. <https://doi.org/10.1002/sd.2131>

Алакөл ойпатындағы рекреациялық аймақтарды ландшафттық жоспарлаудағы географиялық ерекшеліктер

Баян Керімбай, Қуат Баймырзаев, Нұржан Керімбай, Еркін Тоқпанов, Ануар Исабаев

Аңдатпа. Мақалада қоршаған ортаны қорғау шараларындағы ландшафтты жоспарлау мәселелері қарастырылды. Ландшафттық жоспарлау (LP) – белгілі бір географиялық аймақтардағы қауымдастық өмірінің кеңістіктік-уақыттық ұйымдастырылуын зерттейтін ландшафттанудағы ғылыми бағыт. Шаруашылықтың функционалдық аймақтарының ландшафттық құрылымға барынша бейімделуіне қол жеткізу және жаңа онтайлы антропогендік және мәдени ландшафттарды құру. Аймақтардың ландшафттық ерекшеліктеріне тән экологиялық алғышарттар мен шектеулерді орналастыру және экономикалық дамуды жүзеге асырудың теориясы мен практикасы.

Жұмыстың өзектілігі жергілікті жердің табиғи ортасына бейімделген ландшафтты басқару жүйесін әзірлеу, ерекше қорғалатын кең аумақтарды сақтау, азайып бара жатқан бірегей өсімдіктерді көбейту және қорғау, туристік демалыс аймақтары мен жеке тұрғын үй құрылыстары аумағында эстетикалық көркем-мәдени ландшафтты модельдеу, қалалар мен ауылдарды көгалдандыру, басқаша айтқанда табиғатты ұйымдастыру және т.б. Адам мен табиғаттың қарым-қатынасы өнер мен сұлулықты үйлестіру мәселесі болып табылады.

Бұл зерттеу Қазақстандағы Алакөл көлінің жанындағы «Көңілді демалыс орны» туристік демалыс аймағының ландшафты дизайн жоспарын ұсынады. Жоспар экологиялық тұрақтылыққа, эстетикалық тартымдылыққа және жергілікті флора мен фаунаның интеграциясына басымдық береді. Realtime Landscaping PRO қолданбасын пайдалана отырып, зерттеу демалыс аймақтарын, тұру аймақтарын және экологиялық сезімтал аймақтарды қоса алғанда, алуан түрлі аймақтарды үлгілейді. Сиверс алма ағашы сияқты азайып бара жатқан өсімдік түрлерін өсіруге және альпілік үлгідегі ландшафт жасауға ерекше мән беріледі. Зерттеу аймақтың бірегей географиялық және климаттық жағдайларын, соның ішінде күшті желдің әсері мен су сипаттамаларын ескере отырып, ландшафтты жоспарлаудың теориялық негіздерін қамтиды. Алынған нәтижелер Алакөл аймағындағы туризмді тұрақты дамытуға, аумақтың эстетикалық және экологиялық құндылығын арттыруға ықпал етеді.

Түйін сөздер: ландшафты жоспарлау, ландшафттық дизайн, демалыс аймағы, экологиялық тұрақтылық, Алакөл көлі, Realtime Landscaping PRO, Сиверс алма ағашы, альпі беткейі, тұрақты туризм.

Географические особенности ландшафтного планирования рекреационных зон в Алакольской котловине

Баян Керимбай, Куат Баймырзаев, Нуржан Керимбай, Еркин Токпанов, Ануар Исабаев

Аннотация: В статье рассматриваются проблемы ландшафтного планирования в природоохранных мероприятиях. Ландшафтное планирование (ЛП) – научное направление в ландшафтоведении, изучающее пространственно-временную организацию жизни сообществ в определенных географических зонах. Целью является достижение максимальной адаптации функциональных зон хозяйства к ландшафтной структуре и создание новых оптимальных антропогенных и культурных ландшафтов. Теория и практика реализации хозяйственного освоения и размещения экологических предпосылок и ограничений, характерных для ландшафтных особенностей регионов.

Актуальность работы заключается в разработке системы ландшафтного управления, адаптированной к природной среде данной местности, сохранении крупных особо охраняемых территорий, воспроизводстве и охране уникальных растений, находящихся под угрозой исчезновения, создании эстетичного художественно-культурного ландшафта на территории туристско-рекреационных зон и частной жилой застройки, озеленении городов и поселков – иными словами, в экологической организации природы. Взаимоотношения человека и природы – это проблема координации искусства и красоты.

В данном исследовании представлен проект ландшафтного дизайна туристско-рекреационной зоны «Веселый курорт» на озере Алаколь в Казахстане. В плане приоритет отдан экологической устойчивости, эстетической привлекательности и интеграции местной флоры и фауны. С помощью приложения Realtime Landscaping PRO в исследовании моделируется широкий спектр зон, включая зоны отдыха, зоны размещения и экологически уязвимые зоны. Особое внимание уделяется выращиванию исчезающих видов растений, таких, как яблоня Сиверса, и созданию ландшафта в альпийском стиле. Исследование включает в себя теоретические основы ландшафтного планирования с учетом уникальных географических и климатических условий региона, включая влияние сильных ветров и характеристики воды. Результаты исследования способствуют развитию устойчивого туризма в Алакольском районе, повышая как эстетическую, так и экологическую ценность территории.

Ключевые слова: ландшафтное планирование, ландшафтный дизайн, зона отдыха, экологическая устойчивость, озеро Алаколь, Realtime Landscaping PRO, яблоня Сиверса, альпийский склон, устойчивый туризм.

Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ жамылғысындағы ауыр металдардың таралуын геоақпараттық үлгілеу (Қазгидромет РМК 2019-2023 жж. мәліметтері негізінде)

Нургуль Сиханова¹, Ерлан Шынберген^{1*}, Нурила Тоғызбаева¹, Айман Карабалаева²

¹Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан; sihanova.nurgul@mail.ru; shynbergenov.erlan@mail.ru; nurila2009@mail.ru

²Астана Халықаралық университеті, Астана, Қазақстан; aiman_jan@mail.ru

*Корреспонденция: shynbergenov.erlan@mail.ru

Дәйексөз: Сиханова, Н., Шынберген, Е., Тоғызбаева, Н., Карабалаева, А. (2025). Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ жамылғысындағы ауыр металдардың таралуын геоақпараттық үлгілеу (Қазгидромет РМК 2019-2023 жж. мәліметтері негізінде). Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы, 152(3), 157-174. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-157-174>

Академиялық редактор:
Н.Е. Рамазанова

Редакцияға түсті: 13.04.2025
Түзетілді: 24.09.2025
Қабылданды: 26.09.2025
Басылымға шықты: 30.09.2025



Copyright: ©2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аңдатпа. Топырақтың ластану үрдісі адам әрекеті салдарынан соңғы екі ғасырда қарқындылығы бірнеше есе артып, көлемі үлкейді. Оның салдарын бақылауда ұстап, экологияны тұрақтандыру мақсатында әлем елдері химиялық қосылыстар мен уытты элементтердің табиғи ортаға шығу мөлшерін белгілі бір нормативтерге сәйкестендіреді. Елімізде топырақтың ластануының негізгі экологиялық нормативі – шекті рұқсат етілген концентрация (ШРК) болып табылатыны белгілі, яғни белгілі бір уақыт аралығында тұрақты байланыс немесе өзара әрекеттесу кезінде жануарларға, өсімдіктерге, микроорганизмдерге және жалпы табиғи қауымдастыққа әсер етпейтін топырақтағы поллютанттың мөлшері. Алпауыт өндіріс орындары орналасқан әкімшілік-аумақтық бірліктердің топырақ қабатының ауыр металдармен ластану деңгейін қадағалау мақсатында «Қазгидромет» РМК тарапынан еліміздің ірі қалаларында үздіксіз мониторинг жүргізеді. Нәтижесі қадағалаушы мекеменің ресми басылымы – бюллетендерде жарияланады. Мақала бюллетендердің бес жылдағы (2019-2023) бақылау нәтижесін сараптау мақсатында ұйымдастырылған. Мониторинг нәтижелерін статистикалық түрлендіру барысында хром, мыс, мырыш, кадмий және қорғасын элементтерінің урбандалған аймақтар топырағында таралу сипаты сарапталып, анықталды. Мұнан кейін деректер геоақпараттық технология көмегімен электронды карта бетіне түсіріліп, қауіптілік дәрежесіне сәйкес топтастырылды. Қалалардың топырағындағы ауыр металдардың кеңістік пен уақыт аралығында таралуына ғылыми тұрғыда сараптама жүргізіліп, әлемдік трендтермен салыстыру және талдау жасалды. Бюллетендермен сараптама жүргізу барысында уақыт өте келе басылымның сапасы артып, ондағы ақпараттың бірізділігі мен жүйелену деңгейі едәуір жақсарғандығы байқалды, дегенмен көп жерлерде мәліметтердің объективтілігіне күмәнді жайттар кездеседі және ауыр металдың мөлшері бірнеше жыл қатарынан көктем және күз мезгілінде өзгеріссіз шаманы көрсету фактілері тіркелді.

Түйін сөздер: топырақтағы ауыр металдар; мемлекеттік мониторинг; урбандалған аймақтар топырағы; ГАЖ.

1. Кіріспе

2005 жылы адамзаттың 49 пайызы, яғни 3,2 миллиард адам, қалаларда өмір сүрді, 2020 жылғы жағдай бойынша жер халқының 56,2 пайызы қалаларда тұрды. БҰҰ болжамының орташа нұсқасы бойынша 2050 жылы қалаларда жер халқының 68,6 пайызы тұратын болса, 2070 жылға қарай әлем халқының шамамен 70 пайызы қалаларда тұрады деп күтілуде (Desa, 2014). Ең дамыған аймақтардың халқының жартысынан көбі 1950 жылы қалаларда тұрды және 2030 жылға қарай бұл көрсеткіш шамамен 80% жетеді деп болжануда. Еуропалық қоршаған ортаны қорғау агенттігінің (Aurambout et al., 2018) соңғы есебі қалалық аумақтарды кеңейтудің қоршаған ортаға әсеріне баса назар аударды.

Табиғи ортаның ластануының жай-күйі мен деңгейін бақылау және қадағалау мәселелеріне әлемнің көптеген елдері 1972 жылғы Стокгольм конференциясынан кейін назар аударып келеді. Жаһандық антропогендік микроэлементтер шығарындыларының негізгі бөлігі Азияның дамушы елдерінен келеді (Fouzia et al., 2024). Бұл елдерге әлемдегі кадмий шығарындыларының 49%, мыс шығарындыларының 50%, қорғасынның 43% және мырыштың 61% тиесілі, ал Азияның төрт елі (Қытай, Жапония, Оңтүстік Корея және Қазақстан) кадмий мен сынаптың өндірістік қалдықтарынан әлемдегі көшбасшы ондыққа кіреді (Расуна et al., 2001; Li et al., 2009; Kismelyeva et al., 2021).

Топырақ адамзаттың жалпы өмір сапасына тікелей немесе жанама түрде үлес қосатын қалалық экожүйенің маңызды құрамдас бөлігі (de Hollander et al., 2003; Van Kamp et al., 2003). Қалалық жағдайда ол табиғи немесе ауылшаруашылық топырақтарына қатысты қосымша функцияларды атқарады. Ландшафт элементі ретінде ол саябақтар мен бақтарда эстетикалық және рекреациялық функцияларды орындайды, биоәртүрлілікті сақтауға ықпал етеді (Berdenov et al., 2024). Қалалық топырақ жиі пайдалану барысында жылдам өзгерістерге ұшырайды, олар көбінесе экожүйенің басқа бөліктерімен, ауамен, сумен және биотамен қарым-қатынасын өзгертетін нығыздалумен аяқталады (Farooq et al., 2021; Bahetnur et al., 2023; Zhalmagambetova et al., 2024; Dyussebayeva et al., 2025). Оның субстратын оның жұмысын өзгерте алатын басқа антропогендік материалдармен араластыруға болады (Morel et al., 2005; Efremov et al., 2021). Өнеркәсіп, жол қозғалысы, жанармай жағу және қоқыстарды шығару сияқты антропогендік әрекеттер көбінесе топырақтың ластануына әкеледі (Akhmetov et al., 2022; Temirbekov et al., 2023). Басқаша айтқанда, Еуропалық комиссия тізімдеген топырақты сақтаудың негізгі қауіптерінің көпшілігі, атап айтқанда: эрозия, тұздану, тығыздау, нығыздау және ластану қалалық аймақтарда тым белсенді жүреді.

Қалалық топырақтың ластануына арналған әдебиеттердің саны өте көп (Zhang et al., 2022). Көлік қозғалысы, жылу, өнеркәсіп және қоқыс шығару сияқты көздер көбінесе топырақтың органикалық және бейорганикалық ластаушы заттармен ластануына әкеледі (Kozhagulov et al., 2025). Басқа нәрселермен қатар, алаңдаушылықтың негізгі себептері полициклді хош иісті көмірсутектер, полихлорланған дифенилдер, диоксиндер, металдар және металлоидтар. Бұл ластанудың типтік диффузиялық сипаты және топырақтың адамдарға жақындығы халық денсаулығы үшін қауіпті арттырады.

Топырақтың жоғары деңгейде ластануының негізгі көздері атмосфераға түсетін ластаушы заттардың, негізінен тау-кен өндірісі кезінде, металлургия зауыттары, химиялық өндірістер орналасқан аудандарда, қазба отындарын жағу және басқа да бірқатар өндірістер, техногендік апаттар, соның ішінде атом өнеркәсібі және энергетика объектілерінде, қаруды сынау кезінде түсуі мүмкін (Yang et al., 2018; Khan et al., 2021).

Қалалық аумақтардың заманауи топырағы қарқынды техногендік жүктемелерге ұшырайды. Табиғи жағдайдағы топырақтан айқын ерекшеленетін жеке топ қалыптастырады. Мегаполис топырақтарына келесі белгілер тән: қоршаған орта реакциясының сілтіленуге қарай ауысуы, тотығу-тотықсыздану әлеуетінің төмендеуі, органикалық заттардың, жалпы

азоттың, калийдің және фосфордың жоғарылауы және ауыр металдарды қоса алғанда, ластаушы заттардың жинақталуы.

Қалалық топырақтар маңызды экологиялық функцияларды орындайды. Олар антропогендік поллютанттардың жинақталу сыйымдылығы жоғары қуатты күрделі геохимиялық тосқауыл болады, дегенмен бұл сыйымдылықтың шегі әлі анықталған жоқ. Қалалық топырақтарда аз зерттелгендерге заттардың сорбциясы, десорбциясы, трансформациясы және көші-қон процестері жатады.

Қазіргі уақытта қалалық топырақты мониторингтік зерттеудің өзектілігі абиотикалық каталитикалық белсенділік сияқты жаңа зерттелмеген қасиеттердің пайда болуы, топырақтың органикалық қосылыстарымен ауыр металдардың және олардың кешендерінің жоғары концентрациясымен байланысты (Sharma et al., 2017). Қалалардағы халықтың тығыздығы жоғары болуы мегаполистердің топырақтарын халықтың денсаулығына қауіп төндіретін табиғи факторлардың бірі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді (Zhang et al., 2020). Сондықтан тәжірибелік зерттеулерді дамыту үшін мониторингтік зерттеулер ыңғайлы қалалық ортаны қалыптастыру және экологиялық апаттардың алдын алу үшін оларды детоксикациялау бойынша ұсыныстар, технологиялар мен модельдер қажет (Zamotaev et al., 2017).

2. Материалдар мен әдістер

«Қазгидромет» РМК 2019-2023 жж. бюллетендерін мониторинг жасау барысында еліміздің ірі 23 қаласының топырақ қабатында ауыр металдардың (Cr, Cu, Zn, Cd және Pb) шоғырлану мөлшері анықталып, статистикалық өңдеу (минималды-максималды шама, орташа±стандартты ауытқу) жүргізілді (кесте 1).

Ауыр металдар мен металлоидтардың геологиялық жіктелуінде Cr – сидерофил, Cu, Zn, Cd және Pb – халькофилді элементтер тобына біріктірілген (Гринвуд, Эрншо, 2008). Кестеде берілген қалаларды таңдауға келесі себептер негіз болды: Бурабай, Щучинск қалалары ірі өнеркәсіп ошақтары жоқ, туристік мақсатта даму траекториясын ұстанған әкімшілік бірліктер. Көкшетау қаласы – жоғарыдағы туристік аймақтың 100 шақырымдық буферлік зонасында орналасқан, өнеркәсіп орындары дамыған қоныстану аймағы. Кестедегі қалған қалалар – облыс орталықтары және/немесе металлургия кешені дамыған урбандалған территориялар.

Кестедегі мәліметтерді визуалды айқындау мақсатында OpenStreetMap (OSM) деректері – сандық векторлы картографиялық материалдарының әлемдік мемлекеттер деректер қорынан ArcGIS пакетінде келтірілген геоақпараттық жүйелер мүмкіндіктерін қолданып, Қазақстан Республикасының шекарасы мен қалаларының орналасу картасы жасақталды. Дайындалған қалыптан электронды тақырыптық карта қабаттары құрастырылды. Ол үшін зерттеу нысаны – әр ауыр металға жеке электронды карта құрастырылып, қалалар бойынша 5 жылдық мониторинг барысында анықталған поллютанттың максималды мөлшері бағаналы диаграмма түрінде карта бетіне түсірілді. Нақты көрсеткіштің ластану деңгейін айқындау мақсатында Қазақстан Республикасында қабылданған ауыр металдардың топырақ жамылғысында таралуының ШРК мөлшері де диаграмма түрінде қоса берілді.

Кесте 1. Қазақстан Республикасы қалаларының топырақ жамылғысында ауыр металдардың шоғырлану мәндері, мг/кг (минималды-максималды шама), орташа±стандартты ауытқу («Қазгидромет» РМК 2019-2023 жж. бюллетендері негізінде)

Қала атауы, сынама алынған жер	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
Балқаш, «Балқаштүстіметалл», Ленин–Әлімжанов көш. қиылысы, саябақ	(0,67- 18,02*) 7,004±5,8	(6,12-526,7) 120,4±125,8	(74,2-1327,8) 417,5±420,47	(0,27- 70,5) 18,3±25	(5,54- 1010) 433,3±326,5
Риддер, №3 мектеп, Қорғасын зауыты шекарасы	(0,07- 108,5) 7±24	(0,14- 27,2) 6,27±8,2	(23,8-1145,3) 310,6±384,4	(1,2-17,6) 5,5±4,8	(77,4-1055,6) 514,4±352
Өскемен, Трактор–Абай көшелері қиылысы	(0,01-5,6) 1,54±1,7	(0,33- 137,9) 29,4±40,7	(3,3- 951,9) 312,5±361,1	(0,28- 36,1) 9,8±11,7	(2,5- 1605,8) 460,5±512,7
Шымкент, «Южполиметалл» ЖАҚ	(0,2-3,41) 1,17±1,001	(0,12- 84,3) 16,81±22,95	(0,5- 221) 61,14±68,006	(0,1- 32,5) 12,1±12,84	(14,7- 1515) 374,07±554,75
Астана	(0,0001- 17,7) 1,9±5,2	(0- 22,6) 4,02±7,25	(0-7,1) 2,6±6,8	(0,001- 2,2) 0,5±0,6	(0-24,3) 4,1±8,0
Бурабай, «Бурабай» кешенді фондық мониторинг станциясы	(0,0001-1,5) 0,17±0,4	(0- 22,1) 2,5±5,4	(0,0019-1,5) 0,4±0,5	(0,0002- 2,1) 0,3±0,6	(0-24,5) 1,87±5,7
Щучинск	(0,0001-1,5) 0,2±0,46	(0- 23,2) 2,9±5,76	(0-1,6) 0,5±0,6	(0- 1,9) 0,36±0,62	(0-10,2) 0,8±2,3
Кокшетау	(0-1,3) 0,18±0,3	(0- 21,1) 3,2±7,3	(0-1,7) 0,4±0,5	(0- 1,1) 0,16±0,3	(0-30,3) 6,6±10,8
Ақтөбе, №16 мектеп, Тургенев көш., авиақалашық, т/ж вокзалы	(0-0,15) 0,06±0,04	(0,04-1,04) 0,3±0,2	(1,3-4,7) 2,37±1,0	(0-0,2) 0,1±0,06	(0-0,25) 0,1±0,07
Алматы, Абай–Сейфуллин даңғылы қиылысы, әуежай, «Меркур» автоорталығы, Сайран көлі	(0,11-2,36) 0,87±0,7	(0,3- 6,89) 1,7±2	(2,13-19,8) 9,5±6,4	(0,04- 0,62) 0,3±0,2	(9,4- 105,6) 37,3±28,2
Талдықорған, Киров, Индустриалды, Тәуелсіздік көш., №18 мектеп, Кардиология ауруханасы	(0,04- 10,3) 2,4±2,8	(0,3- 45,8) 4,6±10,0	(1,12- 83,4) 18,05±20,8	(0,1- 17,5) 2,2±4,05	(10,03- 1183,5) 267,4±303,67
Атырау, №19 мектеп ауласы, Демалыс саябағы, Атырау–Орал а/ж., АМӨЗ	(0,01-2,49) 0,3±0,6	(0,01-3) 0,5±0,8	(1,18-4) 2,1±0,7	(0,025-0,35) 0,1±0,08	(0-3,39) 0,36±0,87
Семей, «Семейцемент»	(0,05-4,5) 1,18±1,3	(0,06- 6,4) 2,5±2,5	(1,6- 29,98) 12,9±11,3	(0,02- 0,62) 0,25±0,2	(5,5- 65,66) 28±17
Тараз, №40 мектеп	(0,16-1,8) 0,6±0,4	(0,3-2,36) 1,0±0,6	(3,02-12,9) 6,8±2,7	(0,1- 0,6) 0,26±0,1	(13,9- 189,53) 57,7±52,6
Орал, №11 мектеп ауласы, «Киров» саябағы, «Зенит» зауыты	(0,01-0,15) 0,06±0,04	(0,06-0,81) 0,3±0,2	(0,81-6,38) 2,4±1,4	(0,01-0,22) 0,1±0,1	(0-0,3) 0,1±0,07
Қарағанды, «Қазақмыс» корпорациясы, ЖЭО–3, №101 мектеп	(0,2-4,25) 1,26±1,3	(0,54- 7,67) 3,5±2,4	(6,2- 150,5) 26,1±30,7	(0,1- 1,54) 0,5±0,5	(1,2- 38,1) 20,6±10,6

Жезқазған, автомагистраль, «Жезқазған мыс балқыту зауыты», №3 мектеп, Кеңгір суқоймасының бөгеті	(0,9-17) 5,4±5,5	(0,1- 511,8) 70,2±114,46	(26,9-448,1) 144,03±122,6	(0,34- 5,34) 2,4±1,8	(3,6- 310,2) 130,2±103
Теміртау, наубайхана, автомагистраль, ЖЭО-2, №11 мектеп	(0,52- 9,3) 3,5±2,9	(0,11- 15,4) 5,1±5,2	(14,6- 311,3) 38,5±64,7	(0,13- 1,8) 0,6±0,5	(0,8- 52,8) 30,01±14,4
Қостанай, Кондитерлік фабрика	(0,02-1,2) 0,565±0,3	(0,1-5) 2,5±2,3	(8,1-19,3) 13,2±3,4	(0,1-0,4) 0,21±0,1	(2,96- 60,46) 25,2±22,1
Қызылорда, Күл-қож үйіндісі, т/ж вокзалы – ескі өткел, Пионер саябағы демалыс орны	(0,07-1,8) 0,675±0,55	(0,3- 5,45) 2,4±1,8	(2,3-22,6) 10,17±7,45	(0,08-0,33) 0,17±0,07	(7,1- 97,06) 28,56±25,9
Ақтау, «Қошқар-Ата» қалдыққоймасы	(0,01-0,067) 0,03±0,01	(0,483-1,8) 0,85±0,35	(0,156-0,51) 0,3±0,1	(0,0061-0,064) 0,03±0,01	(0,001-0,028) 0,004±0,006
Павлодар, Назарбаев-Торайғыров, Естай-Бөкейхан көшелері қиылысы, «Қазақстан алюминийі» АҚ	(0,08-4,7) 1,2±1,47	(0,2- 4,3) 1,084±1,3	(1,4-20,3) 8,27±5	(0,05- 0,69) 0,2±0,17	(7,4- 64,2) 22,6±16,6
Петропавл, №4 мектеп ауласы	(0,08-4,4) 2,03±1,65	(0,1- 20) 9,175±7,6	(0,01-5,6) 1,76±2,09	(0,04- 0,8) 0,31±0,25	(0,1-31,8) 20,18±10,47
Қазақстан*	6	3	23	0,5	32

Ескерту. ***қою қара түспен** ерекшеленген шама – ШРК мөлшерінен жоғары мәндер; *Қазақстан – ауыр металдардың еліміздің топырақ жамылғысында таралуының қабылданған ШРК мөлшері

3. Нәтижелер

3.1. Қазақстандағы ірі қалалардың топырақ қабатының ластануы

2000 жылдардың басында Қазақстан халқының 56% қалалық жерлерді мекендесе (Almaganbetov et al., 2008), соңғы деректер бойынша көрсеткіш 62,9% теңелген. Қазақстанның урбанизацияланған аумақтарының топырақ жамылғысының ластану проблемалары негізінен өнеркәсіптік қалдықтармен байланысты (Saparov, 2014; Askarova, et al., 2018; Krasilnikov et al., 2018), мәселен елімізде жыл сайын шығатын 900 млн.т. қалдықтың 99,4% өнеркәсіптік қалдықтар, бұл ретте қатты қалдықтардың ең көп жиналуы Қостанай, Қарағанды және Павлодар облыстарында байқалады (Dahl et al., 2001; Iztileu et al., 2013; Aiman et al., 2018; Faurat et al., 2025).

Еліміздің қалалық аймақтарының топырақ жамылғысы техногендік ластанудың келесі түрлеріне бейім: тау-кен өндірісі, жылу энергетикалық станциясы және автокөліктердің улы түтіні (Saparov, 2014; Askarova et al., 2018; Krasilnikov et al., 2018).

Жалпы, елімізде қалалық жерлердің топырақ жамылғысының ластануын бағамдайтын нақты стандарт немесе ереже қалыптаспаған. Бұл мәселеге көз жеткізу үшін электронды деректер қорында сақталған еркін қол жетімді ғылыми әдебиеттерге шолу жүргізіп көрдік. Мәселен, бір жағдайда авторлар қалалардағы тазалықтың 5 деңгейі бар шкаланы басшылыққа алады, екінші зерттеуде химиялық ластанудың жиынтық көрсеткішіне (Zc) негізделген рейтинг әдісі қолданылған, ол ауыр металдардың жиынтық ластануы бойынша топырақ жамылғысының ластану деңгейімен іс жүзінде бірдей (Revich et al., 1990). Zc мәндері ШРК немесе Кларк санынан жоғары концентрациясы бар барлық элементтер үшін есептелген (Salim et al., 2023).

Ашық көздерден алынған Қазақстан Республикасында топырақтың ластануын саралауды айқындауға қабылданған тәсілдердің жиынтық кестесін жасау кезінде көрсеткіштердің белгілі бір мәндерін түсіндірудің кейбір дәлсіздіктері анықталды (кесте 2).

Кесте 2. Топырақтың ластануын анықтау тәсілдері

Шкала	Жиынтық тазалық деңгейі ¹⁹	Ластану деңгейі ²²	Ластану деңгейі ²³	Топырақтың ластану дәрежесін бағалау критерийі ²⁴		Санитарлық-химиялық көрсеткіштер бойынша топырақты бағалау ²⁵	
				Мәні	Класы	Химиялық заттардың ШРК асып кету жиілігі	Қауіптілік дәрежесі / ауыр металдар шоғырлануы ²⁶
< 2	өте таза	рұқсат етілген	төмен	I geo < 0	ластанбаған	<1	қауіпсіз / аз ластанған
2...8	таза			0 < I geo < 1	ластанбаған немесе орташа ластанған		
8...16	рұқсат етілген			1 < I geo < 2	орташа ластанған		
16...32	орташа қауіпті	орташа қауіпті	орташа	2 < I geo < 3	орташа және қатты ластанған	1...10	қауіпті / орташа ластанған
32...128	қауіпті	қауіпті	жоғары	3 < I geo < 4	қатты ластанған		
> 128	-	өте қауіпті	өте жоғары	4 < I geo < 5	қатты немесе өте қатты ластанған	10...25	өте қауіпті / қатты ластанған

				I geo > 5	өте қатты ластанған	>25	ЭКОЛОГИЯЛЫҚ апат / өте ластанған
--	--	--	--	-----------	------------------------	-----	--

Ескерту. ¹⁹Iztileu et al., 2013; ²²Salim et al., 2023; ²³Гребенева и др., 2014; ²⁴Woszczyk, Spychalski & Boluspaeva, 2018; ²⁵Тіршілік ету ортасы ..., 2021; ²⁶Baubekova, Akindykova, Mamirova, 2021.

Ұсынылған кестенің соңғы бағанында топырақты санитарлық-химиялық көрсеткіштер бойынша бағалау келтірілген, мұнда асып кету жиілігі мен қауіптілік дәрежесінің мәндері топырақтың ластануының тиісті рейтингтік параметрлеріне сәйкестендірілді (Тіршілік ету ортасы..., 2021). Жалпы, жоғарыдағы 1 кестені әдебиеттерден жинақтап, осы жұмыста пайдалануымыздың басты себебі – Қазақстан Республикасының ірі қалаларындағы топырақ жамылғысының ластану деңгейін зерттеуге байланысты қолжетімді әдебиеттерде шығарылған ғылыми мақалалар мен бюллетендерден материалдарды жинақтап, бір шамаға келтіру.

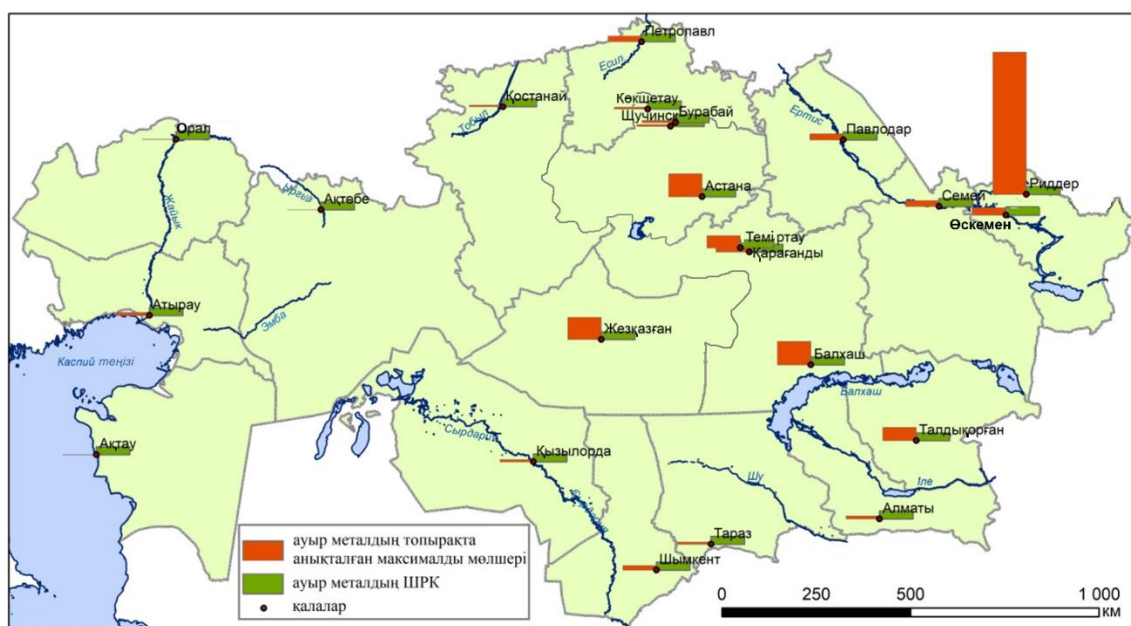
«Қазгидромет» РМК тарапынан еліміздің 23 ірі қаласының топырақ жамылғысында 5 ауыр металдың (Pb, Cd, Cu, Zn және Cr) шоғырлануына үздіксіз бақылау жүргізіледі, мәселен 2011-2018 жж. аралығындағы топырақта тіркелген поллютанттарды сараптау нәтижелері отандық және шетелдік ғалымдардың мақаласында берілген (Ramazanova et al., 2021).

4. Талдау

4.1. Хром

Қалалық жерлерде хром көздері негізінен металлургия және гальваникалық өнеркәсіп болады, өйткені ол коррозияға төзімділік үшін қорытпа компоненті ретінде қолданылады. Бояғыштар мен бояулардың құрамында хром болуы мүмкін. Атмосфераға шығарындылар автомобильдерден шығатын газдардан, қалдықтарды жағудан және мұнай мен көмірді жағудан туындауы мүмкін. Алайда, көбінесе хром литогендік субстраттан түзіледі. Ультрамафикалық жыныстардан, әсіресе серпентиниттерден түзілген топырақтарда көбінесе хром мөлшері жоғары болады (Adriano, 2001 Achmad et al., 2017).

Хромның топырақта жиі байқалатын мәні – 40 мг/кг (Adriano, 2001), ал (Alekseenko et al., 2014) мәліметі бойынша елді мекендердің топырағында кездесетін Cr кларк мөлшері – 80 мг/кг. Негізі, еліміздегі ірілі-ұсақты елді-мекендер мен қалалардың топырағындағы кездесетін хромның кларк мәні 42,2-82,7 мг/кг аралығында (Alekseenko et al., 2014). Ресми бұйрыққа сәйкес хромның ШРК мөлшері 6 мг/кг деңгейінде қабылданған (Тіршілік ету ортасы..., 2021). Төмендегі суретте Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ қабатында тіркелген Cr максималды мөлшері ШРК мәнімен салыстырмалы түрде берілген (сурет 1).

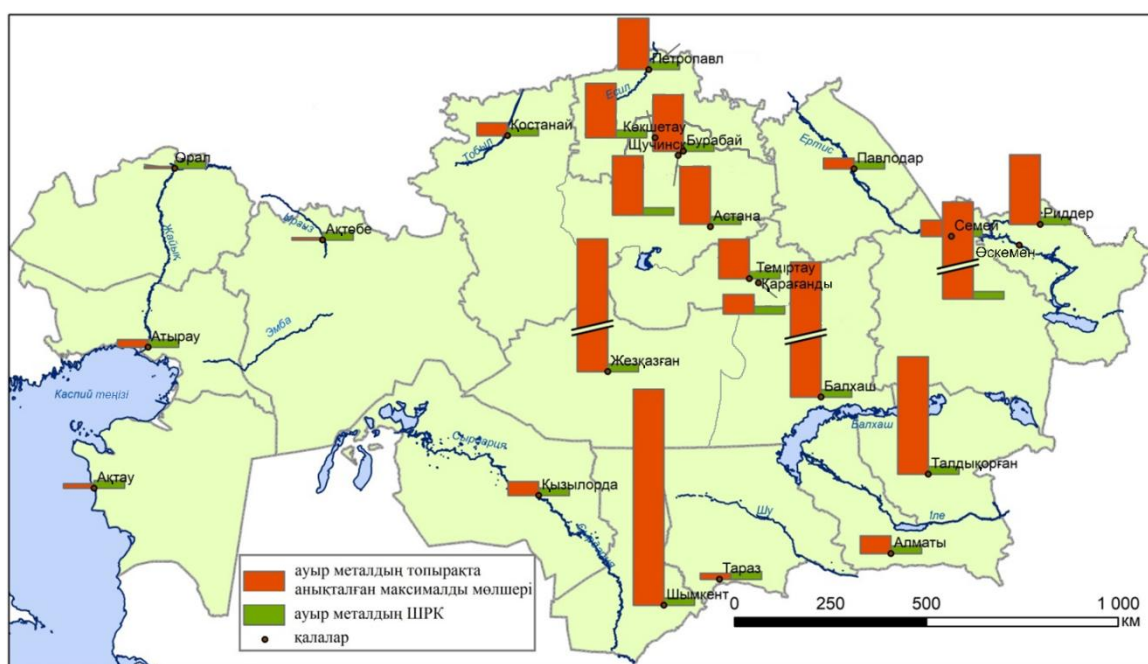


Сурет 1. Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ қабатында тіркелген Cr максималды мөлшері («Қазгидромет» РМК 2019-2023 жж. бюллетендері негізінде) (авторлар құрастырған)

Еліміздегі урбандалған аймақтардың топырағын зерделеу барысында 2019-2023 жж. аралығында хромның ең жоғарғы мөлшері Риддер қаласында тіркелген – 108,5 мг/кг, бұл 18,1*ШРК-ға тең, яғни Санитарлық-химиялық көрсеткіштер бойынша топырақты бағалаудың «өте қауіпті» дәрежесіне сәйкес келеді. Балқаш (18,02 мг/кг), Астана (17,7 мг/кг), Жезқазған (17 мг/кг), Талдықорған (10,3 мг/кг) және Теміртаудан (9,3 мг/кг) басқа қалалардың топырағы хроммен «қауіпті» деңгейде ластанбағандығы анықталып отыр.

4.2. Мыс

Бұл элемент электр сымдарын жасау үшін кеңінен қолданылады. Электрондық жабдық сонымен қатар мыс көзіне айналады (Lincoln et al., 2007; Wong et al., 2007). Сондықтан мыс қалалық жерлерде жиналуға бейім (Chen et al., 2022). Шын мәнінде, АҚШ-тың Нью-Хейвен қаласында жан басына шаққанда 144 кг мыс қорын есептеді (Drakonakis et al., 2007). Мыстың топырақтағы кларк саны 20 мг/кг, орташа әлемдік мөлшері ғалымдардың пайымдауынша 30 мг/кг құрайды (Adriano, 2001), ресейлік геохимиктер елді мекендер топырағындағы кларк саны 80 мг/кг шамасында деп мәлімдейді (Alekseenko et al., 2014). Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ қабатында тіркелген Cu максималды мөлшері ШРК мәнімен салыстырмалы түрде берілген (сурет 2).



Сурет 2. Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ қабатында тіркелген Cu максималды мөлшері («Қазгидромет» РМК 2019-2023 жж. бюллетендері негізінде) (авторлар құрастырған)

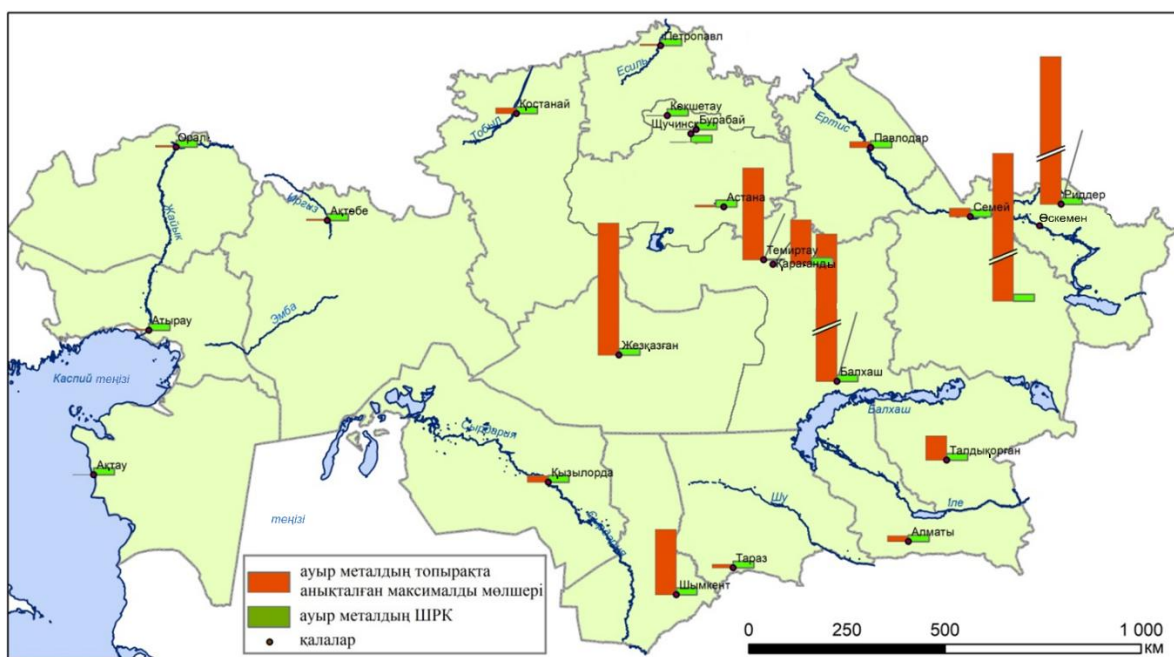
«Қазгидромет» РМК 2019-2023 жж. бюллетендерін мониторинг жасау барысында мыспен топырақтың ластануы бойынша максималды шама Балқаш қаласында тіркелген – 526,7 мг/кг, немесе 175,6*ШРК (ШРК – 3 мг/кг), яғни санитарлық-химиялық көрсеткіштер бойынша топырақты бағалаудың «экологиялық апат» дәрежесіне сәйкес келеді. Келесі сатыда Жезқазған, Өскемен және Шымкент қалаларының топырақ мониторинг нәтижесі – сәйкесінше 511,8 мг/кг (170,6 ШРК), 137,9 мг/кг (46 ШРК) және 84,3 мг/кг (28,1 ШРК). Жалпы,

урбандалған аймақтардың топырағының мыспен ластану дәрежесі – «таза» шамасына сәйкес келетін 4 қала анықталған, олар – Тараз (2,36 мг/кг), Ақтау (1,8 мг/кг), Ақтөбе (1,04 мг/кг) және Орал (0,81 мг/кг) қалалары. Атап өту керек, бұл аталған қалаларда тіркелген мыстың ең жоғарғы шамасы. Еліміздің басқа қалаларының барлығында 2019-2023 жж. аралығында жүргізілген мониторинг нәтижелеріне сәйкес топырақтың мыспен ластануы анықталып отыр.

4.3. Мырыш

Қалалық жерлерде мырыштың әртүрлі көздері шоғырланған. Металлургия және гальваникалық өнеркәсіптен және қалдықтарды өңдеу және жанармай жағу сияқты металдармен ластанудың қарапайым көздерінен басқа, мырыш шиналарда, батареяларда, электронды жабдықтарда (Lincoln et al., 2007) және қорытпалардан жасалған көптеген заттарда бар. Сиднейдің орталық бөлігіндегі мырыш қоры жан басына шаққанда 420 кг деп бағаланды.

Мырыштың елімізде бекітілген топырақтағы ШРК мәні – 23 мг/кг (Тіршілік ету ортасы..., 2021), топырақтағы әлемдік орташа концентрациясы 50 мг/кг құрайды (Alloway, 2012), дегенмен елді мекендер топырағындағы кларк саны – 158 мг/кг тең (Alekseenko et al., 2014). Еліміздің ірі қалаларының топырақ қабатында тіркелген Zn максималды мөлшері ШРК мәнімен салыстырмалы түрде берілген (сурет 3).



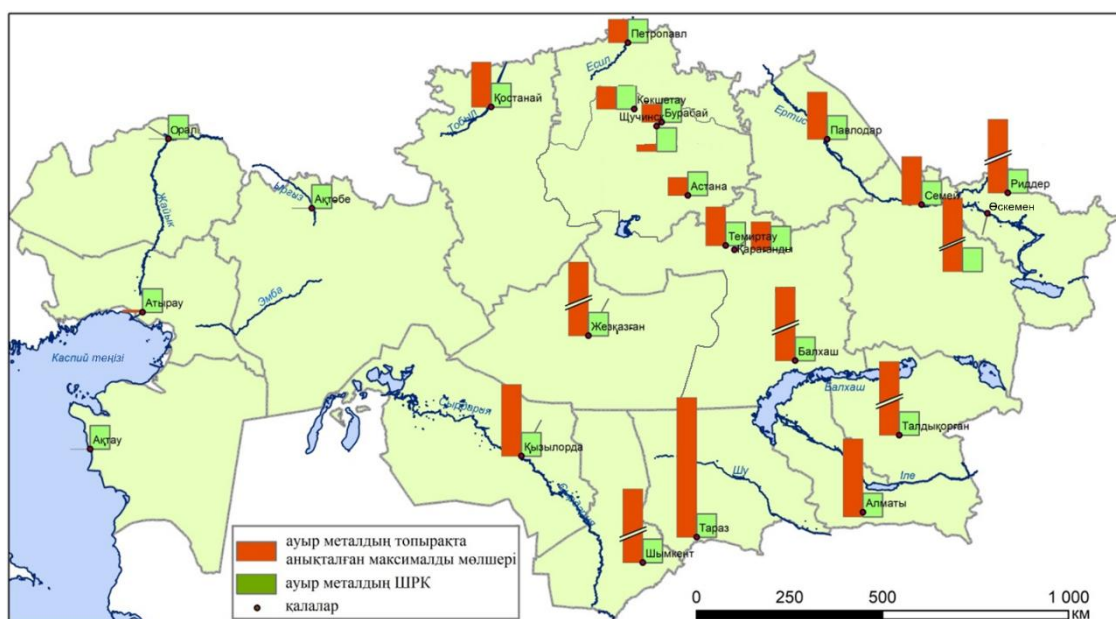
Сурет 3. Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ қабатында тіркелген Zn максималды мөлшері («Қазгидромет» РМК 2019-2023 жж. бюллетендері негізінде) (авторлар құрастырған)

Мониторинг нәтижесіне сәйкес мырыштың шоғырлануы ең жоғары шама 1327.8 мг/кг – Балқаш қаласында тіркелген, мырыштың ШРК – 23 мг/кг екендігін ескерсек, 57,7*ШРК – санитарлық-химиялық көрсеткіштер бойынша топырақты бағалаудың «экологиялық апат» дәрежесіне сәйкес келеді, мұнан бөлек Риддер (1145,3 мг/кг) және Өскемен (951,9 мг/кг) қалаларының топырағының да орасан зор мөлшерде мырышпен ластанғаны анықталып отыр. Жалпы, 2019-2023 жж. аралығында еліміздің 13 қаласының топырағы мырышпен ластанбағандығы тіркелген.

4.4. Кадмий

Қалалық ортада Cd жинақтаудың бірнеше көздері бар. Шын мәнінде, әлемде өндірілетін кадмийдің көп бөлігі никель-кадмий батареяларын өндіруде қолданылады, қалғаны гальваникалық жабындар үшін, пигменттер мен пластмассаларда қолданылады. Кадмий сонымен қатар автомобиль радиаторларын өндіруде, электронды компоненттер өндірісінде және фотографияда қолданылады. Шиналар, бензин, дизель және қозғалтқыштар майларының құрамына кіреді.

ҚР топырақтағы кадмий ШРК мөлшері – 0,5 мг/кг деңгейінде бекітілген (Тіршілік ету ортасы..., 2021), топырақтағы әлемдік орташа мөлшері 0,3 мг/ кг құрайды (Adriano, 2001; Vodjanickij, 2008), еліміздегі урбандалған аймақтар топырағындағы Cd кларк саны 0,2-2,9 мг/кг аралығында, ал елді мекендерде тіркелген орташа кларк саны 0,9 мг/кг (Alekseenko et al., 2014). Еліміздің ірі қалаларының топырақ қабатында тіркелген Cd максималды мөлшері ШРК мәнімен салыстырмалы түрде берілген (сурет 4).



Сурет 4. Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ қабатында тіркелген Cd максималды мөлшері («Қазгидромет» РМК 2019-2023 жж. бюллетендері негізінде) (авторлар құрастырған)

ЮНЕП-тің топтауы бойынша «ерекше қауіпті» ауыр металл болып есептелетін кадмийдің еліміздегі қалалық аймақтар топырағынан табылуы бойынша мониторинг нәтижесі төмендегідей:

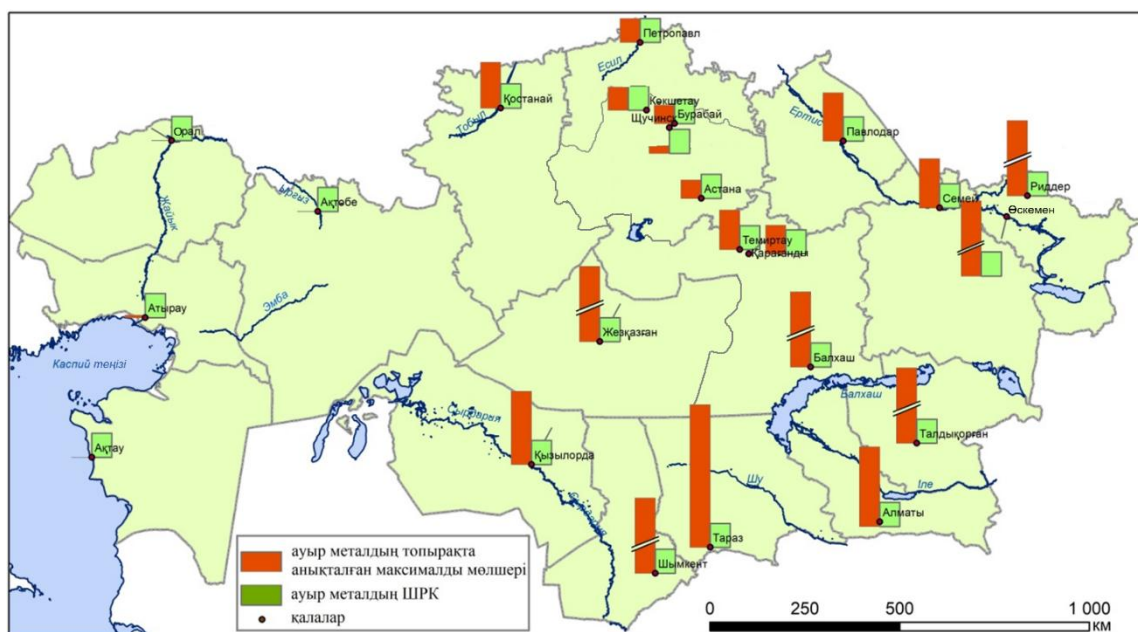
Балқаш қаласы – 70,5 мг/кг (ШРК – 0,5 мг/кг) немесе 141*ШРК – «экологиялық апат», Өскемен қаласы – 36,1 мг/кг – 72,2*ШРК – «экологиялық апат», Шымкент қаласы – 32,5 мг/кг – 65*ШРК – «экологиялық апат», Риддер (17,6 мг/кг) және Талдықорған (17,5 мг/кг) – «экологиялық апат».

4.5. Қорғасын

Қорғасын 1920 жылдан бастап бензинде дүмбібасқы ретінде қолданылып келеді және бояуларда қолданылатын қорғасынмен бірге қалалардағы ластанудың негізгі көздерінің бірі. Pb-нің басқа көздері – автокөлік батареялары, әйнектер, радиациядан қорғау және дәнекерлеу. Соңғы жылдары электронды өнімдер, электронды қалдықтар Pb-нің маңызды көзіне айналды (Lincoln et al., 2007; Terazono et al., 2006). Оның айқын уытты әсерлері оны қолданудың барынша төмендеуіне әкелді. Қазіргі уақытта құрамында қорғасын қосылмаған бензин көптеген елдерде қолданылады және 1978 жылдан бастап бояуларда Pb қолдануға тыйым

салынған. Дегенмен, оның ұзақ мерзімді қолданылуы мен қоршаған ортаға төзімділігі қалаларда Pb шоғырлануына әкелді, ықтимал токсикологиялық әсерлерді зерттеу немесе жай ғана топырақ құрамын бақылау үшін көптеген зерттеулер жүргізілді.

Қорғасын – негізгі халькофил, әдебиеттердің көпшілігінде кадмиймен бірге уыттылығы жоғары ауыр элементтер қатарында (Савич и др., 2002), дегенмен топыраққа түскен Pb белсенділігін төмендетіп, уыттылығын жоғалтады (Елькина, 2007). Қазақстандық нормативтерге сәйкес оның ШРК мөлшері 32 мг/кг, топырақтағы әлемдік орташа кларк саны 10 мг/кг, елді мекендер топырағындағы кларк 54,5 мг/кг тең (Aleksenko et al., 2014). Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ қабатында тіркелген Pb максималды мөлшері ШРК мәнімен салыстырмалы түрде берілген (сурет 5).



Сурет 5. Қазақстан Республикасы ірі қалаларының топырақ қабатында тіркелген Pb максималды мөлшері («Қазгидромет» РМК 2019-2023 жж. бюллетендері негізінде) (авторлар құрастырған)

«Қазгидромет» бюллетендері 2019-2023 жж. аралығындағы мәліметтеріне сәйкес қорғасынмен топырағы едәуір ластанған – Өскемен (1605,8 мг/кг), Шымкент (1515 мг/кг), Талдықорған (1183,5 мг/кг), Риддер (1055,6 мг/кг) және Балқаш қалалары (1010 мг/кг), «Тіршілік ету ортасының қауіпсіздігіне арналған гигиеналық нормативтерге» (2021) сәйкес «экологиялық апат» аймағы болып есептеледі (Тіршілік ету ортасы..., 2021). Мониторингпен қамтылған 23 қаланың тоғызы қорғасынмен топырақтың ластануы санатында – «таза» дәрежесінде.

«Қазгидромет» РМК 2019-2023 жж. арналған бюллетендерін сараптау барысында еліміздің ауыр металдармен топырақ жамылғысы ластанбаған, яғни Cr, Cu, Zn, Cd, Pb концентрациясы бойынша «таза» дәрежесіндегі әкімшілік бірліктердің тізімі жасақталды (Тіршілік ету ортасы ..., 2021). Олар: Ақтөбе, Орал, Ақтау қалалары.

Ауыр металдардың өте жоғары концентрациясы тіркелген қалалардың барлығында металлургия өнеркәсібі дамыған, әсіресе полиметалл кенін өндіру және өңдеу ошақтары орналасқан. Мәселен, Балқаш қаласында «Балқаштүстіметалл» өндірістік бірлестігі («Қазақмыс» корпорациясы), Риддер қаласында «Риддер металлургия кешені» («Қазмырыш» ЖШС), Өскемен қаласында «Өскемен Қорғасын-Мырыш Комбинаты» («Қазмырыш» ЖШС), Шымкент қаласында бұрынғы «Шымкент қорғасын зауыты» («Оңтүстікполиметалл» өнеркәсіптік корпорациясы), Талдықорған қаласында «Қайнар» аккумулятор зауыты,

Жезқазған қаласында «Қ.И. Сәтпаев атындағы Жезқазған кен-металлургия комбинаты» («Қазақмыс» корпорациясы) және т.б. Әрине, поллютанттардың аталған қалалардың топырағында бір мезетте жиналмағаны айдан анық. Зерттеу барысында еліміздің үлкен қалаларында бұған дейін жүргізілген ғылыми зерттеулер мен олардың нәтижесіне сараптау жұмыстары жүргізілді, сонда байқалғаны – ауыр металдар жоғарыда көрсетілген өндіріс орындары бар қалалардың топырақ жамылғысында бұрыннан жоғары концентрацияда екендігі анықталды. Яғни, кумулятивтік әсердің салдарынан ластаушы элементтер топырақтың беткі 0-30 см қабатында жинақтала береді, рас, топырақ бойымен төменгі қабатқа қарай жылыстап жылжуы мүмкін, дегенмен, ауыр металдардың негізгі бөлігі сол беткі қабатта қала береді. Және бір назар аударатын жайт, үлкен өндіріс орындары немесе өнеркәсіп орталықтары өз жұмысын тоқтатқанның өзінде ауыр металдардың топырақтағы шоғырлану мөлшері жоғары деңгейде қала береді. Мәселен, Кентау қаласында орналасқан кен-байыту комбинатының жабылғанына 30 жылға жуық уақыт өтсе де, мониторинг барысында қауіпті деңгейде ластану деректері анықталған. Геохимик, экохимик ғалымдарды алаңдататыны ауыр металдардың топырақ → жерасты суы → өсімдік → жануар → адам ағзасы трофикалық тізбегі арқылы патологиялық ауруға шалдықтыруында.

5. Қорытынды

Топырақ – жер бетіндегі кез-келген тіршілік иесінің өмір сүруіне қажетті қалпына келетін сарқыллатын 3 ресурстың (ауа, су, топырақ) бірі және ыждағаттылықпен күтім жасалған жағдайда әлі мыңдаған жылдар бойы пайдалануға жарамды. Дегенмен, топырақтың жай-күйіне жете мән бермей, оны ластау соңғы 200 жылда белең алып келеді. Негізі, топырақтың ластануы 2 топқа бөлінеді: табиғи және антропогендік, соның ішінде адам әрекеті салдарынан топырақтың техногендік ластануы қоршаған ортаға әкелетін орасан зор залалы бойынша көш бастап тұр. Топырақтың өнімділігіне антропогендік қысымның шағын аумақта бірнеше есе артуының айқын көрінісі урбандалған аймақтарда байқалады. Қалалардағы топырақтың ластануына әкелетін факторлар – ауыр металдар, жылу электр орталықтары, автомобиль жанармайының түтіндері және т.б. Қазақстандағы өндіріс ошақтары орналасқан ірі қалалар мен облыс орталықтарының экологиялық жай-күйін күнделікті мониторинг жасап, сараптама жасайтын басты ұйым – «Қазгидромет» РМК. Мекеменің шығарған көпжылдық бюллетендерін сараптап, талдау барысында урбандалған аймақтардың топырақ қабатында Сг, Сu, Zn, Cd, Pb өте жоғары концентрациясы анықталды. Бұл жерде жете назар аударатын жайт – топырағы ауыр металдармен өте жоғары деңгейде ластанып отырған қалалар – еліміздің полиметалл кен өндіру орталықтары. «Қазгидромет» ұйымының бюллетендерін жан-жақты талдап, мониторинг нәтижесін электронды карта бетіне түсіру – отандық геохимия, экохимия саласын цифрландыру элементтерінің бірі. Ауыр металдардың топырақтағы концентрациясының жоғары болуы – өнеркәсіптік кешендерден шыққан поллютанттардың ауа, су арқылы табиғи сүзгі – топыраққа сіңіп, субстрат бойында ұзақ уақыт аралығында жиналуында. Сонымен қатар, елімізде қабылданған нормативтік-құқықтық актілерге сәйкес топырақтағы ауыр металдардың шоғырлануын реттеу бойынша ШРК мәндері алыс-жақын шет мемлекеттердің, тіпті аталған элементтердің топырақтағы әлемдік орташа кларк санынан едәуір төмендігі анықталды. Бұл отандық ғалымдардың топшылауы бойынша Қазақстан Республикасының экологиялық ыждағаттылық, «жасыл экономика» ұстанымдарына сәйкес даму траекториясының көрінісі.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ

7. Авторлық үлестер

Концептуализация - Н.С., Е.Ш.; әдістемесі - Н.С., А.Қ.; бағдарламалық қамтамасыз ету - Е.Ш.; валидация - Н.С., А.Қ.; формалды талдау - Е.Ш., Н.Т.; зерттеу - Е.Ш., Н.Т.; ресурстар - Е.Ш.; деректерді өңдеу - А.Қ.; жазу-түпнұсқа жобасын дайындау - Е.Ш., Н.Т.; жазу-шолу және

өңдеу - Н.С., А.Қ.; визуализация - Е.Ш., Н.Т.; жетекшілік - Н.С.; жоба жетекшілігі - Н.С. Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасымен танысып, келісті.

8. Авторлар туралы ақпарат

Сиханова, Нургуль – қауымдастырылған профессор м.а., Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі 29А, Қызылорда, Қазақстан, 120014; e-mail: sihanova.nurgul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1605-4794>

Шынбергенов, Ерлан – аға оқытушы, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі 29А, Қызылорда, Қазақстан, 120014; e-mail: shynbergenov.erlan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8412-434X>

Тоғызбаева, Нұрила – аға оқытушы, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі 29А, Қызылорда, Қазақстан, 120014; e-mail: nurila2009@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4310-0661>

Қарабалаева, Айман – аға оқытушы, Астана Халықаралық университеті, Қабанбай батыр даңғылы 8, Астана, Қазақстан, 020000; e-mail: aiman_jan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6539-2541>

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (грант №BR21882415)».

10. Алғыстар: Авторлар ғылыми жұмыстың концепциясын жоспарлауда өлшеусіз үлес қосқан М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті Н.И. Маккавеев атындағы "Топырақ эрозиясы және арналық үдерістер" ҒЗЗ бас ғылыми қызметкері, г.ғ.д. В.Н. Голосовка, "В.В. Докучаев атындағы Топырақ институты" ФЗО "Топырақ эрозиясы" зертханасының меңгерушісі, жетекші ғылыми қызметкер, г.ғ.к. А.П. Жидкинге шексіз алғыс білдіреді. Бұл жобаны жүзеге асыруда олардың тәжірибесі мен адалдығы маңызды рөл атқарды.

11. Мүдделер қақтығыстары: Мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейміз.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Achmad, R.T., Auerkari, E.I. (2017). Effects of chromium on human body. *Annual Research and Review in Biology* 13(2), ARRB-33462. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2017/33462>
2. Adriano, D.C. (2001). Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals, Vol. 860. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>
3. Aiman, N., Gulnaz, S., Alena, M. (2018). The characteristics of pollution in the big industrial cities of Kazakhstan by the example of Almaty. *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 16, 81-88. <https://doi.org/10.1007/s40201-018-0299-1>
4. Akhmetov, L.I., Puntus, I.F., Narmanova, R.A., Appazov, N.O., Funtikova, T.V., Regepova, A.A., & Filonov, A.E. (2022). Recent Advances in Creating Biopreparations to Fight Oil Spills in Soil Ecosystems in Sharply Continental Climate of Republic of Kazakhstan. *Processes* 10(3), 549. <https://doi.org/10.3390/pr10030549>
5. Alekseenko, V., Alekseenko, A. (2014). The abundances of chemical elements in urban soils. *Journal of Geochemical Exploration* 147, 245-249. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.08.003>
6. Alloway, B.J. (Ed.). (2012). Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability, Vol. 22. Springer Science & Business Media.
7. Almagambetov, N., Grigoruk, V. (2008). Degradation of soil in Kazakhstan: Problems and Challenges. In *Soil chemical pollution, risk assessment, remediation and security*, 309-320. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8257-3_27

8. Askarova, D.A., Glebov, V.V. (2018). Level of industrial pollution by heavy metals of soils of the Republic of Kazakhstan and the Caspian region. *Sovremennye podkhody i metody v zashchite rastenii: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern approaches and methods in plant protection: *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*] 178–179.
9. Aurambout, J.P., Barranco, R., Laval, C. (2018). Towards a simpler characterization of urban sprawl across urban areas in Europe. *Land* 7(1), 33. <https://doi.org/10.3390/land7010033>.
10. Bahetnur, Y., Lee, W. (2023). Trace heavy metal contamination of urban water bodies in Central Asia: Its distribution, source detection, and probabilistic health risk assessment for recreational and household use of water. *ACS ES&T Water* 3(8), 2765-2775. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00268>
11. Baubekova, A., Akindykova, A., Mamirova, A., Dumat, C., Jurjanz, S. (2021). Evaluation of environmental contamination by toxic trace elements in Kazakhstan based on reviews of available scientific data. *Environmental Science and Pollution Research* 28(32), 43315-43328. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14979-z>
12. Berdenov, Z.G., Yeginbayeva, A., Zinabdin, N., Beketova, A., Mendybayeva, G., Assylbekova, A., & Önal, H. (2024). Recreational and functional zoning of territories with technogenic impact for the purpose of sustainable development of the region. *GeoJournal of Tourism and Geosites* 55(3), 1354-1363. <https://doi.org/10.30892/gtg.55336-1308>
13. Chen, L., Zhou, M., Wang, J., Zhang, Z., Duan, C., Wang, X., Fang, L. (2022). A global meta-analysis of heavy metal (loid) s pollution in soils near copper mines: evaluation of pollution level and probabilistic health risks, *Sci. Total Environ.* 835, 155441 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155441>
14. Dahl, C., Kuralbayeva, K. (2001). Energy and the environment in Kazakhstan. *Energy Policy* 29(6), 429-440. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00137-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00137-3)
15. de Hollander, A.E., Staatsen, B.A. (2003). Health, environment and quality of life: an epidemiological perspective on urban development. *Landscape and urban planning* 65(1-2), 53-62. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00237-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00237-2)
16. Degnan, J.R., Lindsey, B.D., Levitt, J.P., Szabo, Z. (2020). The Relation of Geogenic Contaminants to Groundwater Age, Aquifer Hydrologic Position, Water Type, and Redox Conditions in Atlantic and Gulf Coastal Plain Aquifers, Eastern and South-Central USA. *Sci. Total Environ.* 723, 137835. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137835>
17. Desa, U.N. (2014). World urbanization prospects, the 2011 revision. Population Division, department of economic and social affairs, United Nations Secretariat.
18. Dyussebayeva, M., Tashekeva, A., Shakenov, Y., Kolbin, V., Nurgaisinova, N., Mamyrbayeva, A., Abisheva, M. (2025). Distribution characteristics and assessment of the content of heavy metals in small rivers of the Ulba riv. basin in the mining regions of East Kazakhstan. *RSC advances* 15(14), 11034-11044. <https://doi.org/10.1039/D5RA00801H>
19. Efremov, S., Nechipurenko, S., Tokmurzin, D., Kaiaidarova, A., Kalugin, S., Tassibekov, Kh. (2021). Remediation of soil contaminated by toxic rocket fuel components using modified carbon–mineral adsorbing material produced from shungite rock modified with Mn⁴⁺ and Fe³⁺, *Environ. Technol. Innovation* 24, 101962. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101962>
20. El'kina, G.Ja. (2007). Podhody k normirovaniyu soderzhaniya tjazhelyh metallov v podzolistyh pochvah [Approaches to the standardization of heavy metal content in podzolic soils]. *Sovremennye problemy zagriznenija pochv*, 55-59.
21. Farooq, I., Shah, A. R., Salik, K. M., Ismail, M. (2021). Annual, seasonal and monthly trend analysis of temperature in Kazakhstan during 1970–2017 using non-parametric statistical methods and GIS technologies. *Earth Systems and Environment* 5, 575-595. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00244-3>
22. Faurat, A., Yessimova, D., Satybaldiyeva, G., Kuatbayev, A., Utarbayeva, A., Kaliyeva, A. Rakhmanov, S. (2025). Assessing the spatial distribution and sources of heavy metal pollution

- in the snow cover: A case study from Pavlodar, Northeastern Kazakhstan. *PloS One* 20(5), e0322300. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322300>
23. Fouzia, M., Siddique, M., Waheed, T. (2024). Energy Consumption, Economic Growth and the Environmental Degradation in Asian Countries. *Journal of Education and Social Studies* 5(1), 140-145. <https://doi.org/10.52223/jess.2024.5113>
24. Grebeneva, O.V., Sakiev, K.Z., Otarbaeva, M.B., Zhanbasinova, N.M. (2014). Problemy zagryazneniya pochvy tverdyimi othodami promyshlennyyh predpriyatij v Kazahstane [Problems of soil contamination with solid waste from industrial enterprises in Kazakhstan]. *Medicina truda i promyshlennaya jekologiya* 8, 9-13.
25. Grinvud, N., Jernsho, A. (2008). Himiya jelementov [The chemistry of elements].
26. Iztileu, A., Grebeneva, O., Otarbayaeva, M., Zhanbasinova, N., Ivashina, E., Duisenbekov, B. (2013). Intensity of soil contamination in industrial centers of Kazakhstan. In *CBU International Conference Proceedings*, Vol. 1, pp. 374-380. <https://doi.org/10.12955/cbup.v1.60>
27. Khan, S., Naushad, M., Lima, E. C., Zhang, S., Shaheen, S. M., & Rinklebe, J. (2021). Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies - A review. *Journal of Hazardous Materials* 417, 126039. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126039>
28. Kismelyeva, S., Khalikhan, R., Torezhan, A., Kumisbek, A., Akimzhanova, Z., Karaca, F., Guney, M. (2021). Potential human exposure to mercury (Hg) in a chlor-alkali plant impacted zone: Risk characterization using updated site assessment data. *Sustainability* 13(24), 13816. <https://doi.org/10.3390/su132413816>
29. Kozhagulov, S., Adambekova, A.A., Quadrado, J.C., Salnikov, V., Rysmagambetova, A., Tanybayeva, A. (2025). Trends in Atmospheric Emissions in Central Asian Countries Since 1990 in the Context of Regional Development. [DOI:10.20944/preprints202503.0228.v2](https://doi.org/10.20944/preprints202503.0228.v2)
30. Krasilnikov, P., Khasankhanova, G., Abdullaev, U., Baibagyshov, E., Baliuk, S., Chervan, A., Saparov, A. (2018). Regional status of soil pollution: Eurasia. *TION* 17.
31. Li, P., Feng, X.B., Qiu, G.L., Shang, L.H., Li, Z.G. (2009). Mercury pollution in Asia: a review of the contaminated sites. *Journal of hazardous materials* 168(2-3), 591-601. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.031>.
32. Morel, J.L., Schwartz, C., Florentin, L., De Kimpe, C. (2005). Urban soils. In encyclopedia of soils in the environment. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00305-2>
33. Pacyna, J.M., Pacyna, E.G. (2001). An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environmental reviews* 9(4), 269-298. <https://doi.org/10.1139/er-9-4-269>.
34. Ramazanov, E., Lee, S.H., Lee, W. (2021). Stochastic risk assessment of urban soils contaminated by heavy metals in Kazakhstan. *Science of the Total Environment* 750, 141535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141535>
35. Revich, B.A., Saet, Ju.E., Smirnova, R.S., Sorokina, E.P. (1990). Metodicheskie rekomendacii po ocenke stepeni zagryazneniya atmosfernogo vozduha naselennykh punktov metallami po ih soderzhaniju v snezhnom pokrove i pochve (utv. glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom SSSR ot 15.05.1990 № 5174-90) [Methodological recommendations for assessing the degree of air pollution in populated areas by metals based on their content in snow cover and soil (approved by the Chief State Sanitary Doctor of the USSR on 15.05.1990 No. 5174-90)]. M.: IMGRJe, 1990.
36. Salim, Y., Yerimbetova, A., Baiduisenova, T., Uspabayeva, A., Abildayeva, R., Balgabekova, A., Tleukeyeva, A. (2023). Soil Pollution with Heavy Metals in the Turkestan Region. *Journal of Ecological Engineering* 24(2). <https://doi.org/10.12911/22998993/156801>
37. Saparov, A. (2013). Soil resources of the Republic of Kazakhstan: Current status, problems and solutions. In *Novel measurement and assessment tools for monitoring and management of land*

- and water resources in agricultural landscapes of Central Asia, 61-73 p. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01017-5_2
38. Savich, V.I., Parahin, N.V., Sychev, V.G., Stepanova, L.P., Lobkov, V.T., Amerguzhin, H.A., Romanchik, E.A. (2002). Pochvennaja jekologija [Soil ecology]. Orel: Izd-vo OrelGAU.
39. Sharma, N., Singhvi, R. (2017). Effects of chemical fertilizers and pesticides on human health and environment: a review. *International journal of agriculture, environment and biotechnology* 10(6), 675-680. <https://doi.org/10.5958/2230-732X.2017.00083.3>
40. Temirbekov, N., Malgazhdarov, Y., Tamabay, D., Temirbekov, A. (2023). Mathematical and computer modeling of atmospheric air pollutants transformation with input data refinement. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 32(3), 1405-1416. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v32.i3.pp1405-1416>
41. Tirshilik etu ortasynyng qauipsizdigine arналған gigenalyq normativterdi bekіtu turaly [Establishment of hygiene standards aimed at the safety of living space]. QR DSM 32 bujrygy (21.04.2021).
42. Van Kamp, I., Leidelmeijer, K., Marsman, G., De Hollander, A. (2003). Urban environmental quality and human well-being: Towards a conceptual framework and demarcation of concepts; a literature study. *Landscape and urban planning* 65(1-2), 5-18. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00232-3](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00232-3)
43. Vestnik Qazgidrometa. Jekologicheskij informacionnyj bjulleten' RK za 2019-2023 gg. RGP «Qazgidromet» [Bulletin of Kazgidromet. Environmental Information Bulletin of the Republic of Kazakhstan for 2019-2023. State Enterprise "Kazgidromet"]. MJeRK.
44. Vodjanickij, Ju.N. (2008). Tjazhelye metally i metalloidy v pochvah [Heavy metals and metalloids in soils]. M.: GNU Pochvennyj institut im. VV Dokuchaeva rashn, 86.
45. Woszczyk, M., Spychalski, W., Boluspaeva, L. (2018). Trace metal (Cd, Cu, Pb, Zn) fractionation in urban-industrial soils of Ust-Kamenogorsk (Oskemen), Kazakhstan - implications for the assessment of environmental quality. *Environmental Monitoring and Assessment* 190, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6733-0>
46. Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L., Bi, J. (2018). A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. *Science of the total environment* 642, 690-700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.068>
47. Zamotaev, I.V., Ivanov, I.V., Mikheev, P.V., Belobrov, V.P. (2017). Transformation and contamination of soils in iron ore mining areas (a review). *Eurasian Soil Science* 50, 359-372. <https://doi.org/10.1134/S1064229317030127>
48. Zhalmagambetova, U., Assanov, D., Neftissov, A., Biloshchytskyi, A., Radelyuk, I. (2024). Implications of water quality index and multivariate statistics for improved environmental regulation in the Irtys River Basin (Kazakhstan). *Water* 16(15), 2203. <https://doi.org/10.3390/w16152203>
49. Zhang, Q., Wang, C. (2020). Natural and human factors affect the distribution of soil heavy metal pollution: a review. *Water, air, & soil pollution* 231, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04728-2>
50. Zhang, Y., Cai, Q. (2022). Impact mechanism of new urbanization on environmental pollution: Empirical analysis based on spatial panel model. *Frontiers in Public Health* 10, 928100. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.928100>

Geoinformation Modeling of the Distribution of Heavy Metals in the Soil Cover of Large Cities of the Republic of Kazakhstan (based on the data of RSE "Kazhydromet" for 2019-2023)

Nurgul Sihanova, Yerlan Shynbergenov, Nurila Togyzbaeva, Aiman Karabalayeva

Abstract: The trend towards soil pollution due to human activity has increased several times in intensity over the past two centuries, and the volume has increased. To control the consequences and stabilize the environment, countries around the world regulate the amount of chemical compounds and toxic elements released into the natural environment. It is known that the main environmental standard for soil pollution in the country is the MPC, that is, the amount of pollutant in the soil that does not affect animals, plants, microorganisms, and the natural community as a whole with constant contact or interaction over a certain period of time. In order to control the level of contamination of the soil cover with heavy metals in administrative units where giant production facilities are located, Kazhydromet conducts continuous monitoring in large cities of the country. The result is published in bulletins, the supervisory institution's own publication. The article is organized in order to analyze the results of the control of the ballots for the last five years (2019-2023). During the statistical transformation of the monitoring results, the nature of the distribution of chromium, copper, zinc, cadmium, and lead elements in the soils of urbanized zones was revealed. Then the data was applied to the surface of the electronic map using geoinformation technology and grouped according to the degree of danger. A scientific analysis of the spatial and temporal distribution of heavy metals in urban soils was conducted, as well as a comparison and analysis with global trends. During the analysis of the bulletins, it was noted that over time, the quality of the publications had improved, and the consistency and systematization of the information presented in them had significantly improved. However, in many places, doubts arose about the objectivity of the data, and there were cases where the amount of heavy metals showed unchanged values in spring and autumn for several years in a row.

Keywords: heavy metals in soil; state monitoring; soils of urbanized regions; GIS.

Геоинформационное моделирование распределения тяжелых металлов в почвенном покрове крупных городов Республики Казахстан (на основе данных РГП «Казгидромет» за 2019-2023 гг.)

Нургуль Сиханова, Ерлан Шынбергенов, Нурила Тогизбаева, Айман Карабалаева

Аннотация: Интенсивность загрязнения почв из-за деятельности человека за последние два столетия возросла в несколько раз. В целях контролирования последствий и стабилизации окружающей среды страны мира нормируют количество химических соединений и токсичных элементов, выбрасываемых в природную среду, до определенных величин. Известно, что основной экологической нормой загрязнения почв в стране является предельно допустимая концентрация (ПДК), т.е. количество загрязняющих веществ в почве, не оказывающее воздействие на животных, растения, микроорганизмы и природное сообщество в целом в течение определенного периода времени, в период постоянного контакта или взаимодействия. В целях контроля уровня загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова административно-территориальных единиц, где расположены крупные производственные объекты, РГП «Казгидромет» осуществляет постоянный мониторинг крупнейших городов страны. Результаты публикуются в официальном издании учреждения – бюллетенях. Статья организована с целью анализа опубликованных материалов в бюллетенях за последние пять лет (2019-2023 гг.). В процессе статистической обработки результатов мониторинга проанализирован и определен характер распределения таких тяжелых металлов, как хром, медь, цинк, кадмий и свинец в почве городских территорий. Была создана электронная база данных и цифровая карта в векторном формате распространения ТМ с использованием геоинформационных технологий. Проведен научный анализ пространственно-временного

распределения тяжелых металлов в городских почвах, а также сравнение и анализ с мировыми тенденциями. В ходе анализа бюллетеней отмечено, что с течением времени качество публикации возросло, существенно улучшились согласованность и систематизация представленной в них информации, однако во многих местах возникают сомнения в объективности данных, а также отмечены случаи, когда количество тяжелых металлов показывало неизменные значения весной и осенью в течение нескольких лет подряд.

Ключевые слова: тяжелые металлы в почве; государственный мониторинг; почвы урбанизированных регионов; ГИС.

Оңтүстік Орал таулы аймағының (Қазақстан бөлігіндегі) өсімдік жамылғысына техногендік ықпалды бағалау

Айдана Бекетова*, Ерболат Мендыбаев, Гульзира Гатаулина

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; atbeketova@mail.ru; mendybayev_yekh@enu.kz; gulziragataulina@gmail.com

*Корреспонденция: atbeketova@mail.ru

Аңдатпа: Берілген жұмыста Оңтүстік Орал таулы аймағының (Қазақстан бөлігіндегі) өсімдіктер жамылғысы сипатталып, өңірдің негізгі өсімдік қауымдастықтары қарастырылды. Арнайы назар эндемиялық түрлерге, реликтік және дәрілік өсімдіктерге, сонымен қатар Қызыл кітапқа енген түрлерге аударылып, аумақтың өсімдіктер картасы құрастырылды. Сонымен қатар мақалада зерттеу аймағында орналасқан Дон тау-кен байыту комбинаты қызметінің іргелес аумақтардың өсімдік жамылғысының экологиялық жай-күйіне әсері қарастырылады. Зерттеу жұмыстары «Мирный» карьері мен «Поисковый» және «Южный» карьерлерінің үйінділері аумағында жүргізілді. Флора құрамына талдау жүргізу мақсатында сынақ алаңдары белгіленді. Қазіргі биоалуантүрлілікті сипаттайтын басым өсімдік түрлері анықталды. Ластану көздерінен белгіленген 500, 3000 және 5000 м қашықтықтарда өсімдік жамылғысының құрылымына салыстырмалы талдау жасалынды. Техногендік ықпалдың өсімдік жамылғысының түрлік құрамына емес, негізінен оның жалпы эколого-физиологиялық жағдайына әсер ететіні зерттеу нәтижелерінің талдауы көрсетті. Фитоценоздардың әлсіреуін және өсу жағдайларының стресстік сипаттарын айғақтайтын, деградацияның негізгі белгілері ретінде жапырақтардың табиғи түсінің өзгеруі, өсімдіктердің жекелеген бөліктерінің қурауы, жалпы биомассаның азаюы, сондай – ақ фитоценоздар құрылымының бұзылуы анықталды. Жоғарыда айтылған деградациялық белгілер ластаушы көздерден 500 м қашықтықтан байқалса, ал ренатурализацияның бастапқы белгілері 1000-1200 м, бүлінген аумақтардың қайта өсуі 2000 м, проекциялық жамылғының артуы 2500 м қашықтықтан көрініс тапты. Зерттеу нәтижелері геодеректер базасына енгізіліп, зерттелетін аумақтағы бұзылу деңгейінің үш градациясы бойынша өсімдік жамылғысының картасы жасалды. Жасалынған өсімдік жамылғысының бұзылу деңгейінің картасы зерттелетін аумақтағы фитоценоздардың антропогендік трансформациясын деңгейін айқындайды.

Түйін сөздер: техногендік әсер; өсімдік жамылғысы; Дон тау-кен байыту комбинаты; экологиялық жағдай; Оңтүстік Орал таулы аймағы.

Дәйексөз: Бекетова, А., Мендыбаев, Е., Гатаулина, Г. (2025). Оңтүстік Орал жоталарының өсімдік қауымдастықтарына техногендік ықпалды бағалау. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы, 152(3), 175-190. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-175-190>

Академиялық редактор:
Ж.Ғ. Берденов

Редакцияға түсті: 31.08.2025
Түзетілді: 22.09.2025
Қабылданды: 23.09.2025
Басылымға шықты: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Кіріспе

Соңғы онжылдықтарда тау-кен өндіру өнеркәсібі Қазақстан Республикасы экономикасының дамуын айқындайтын стратегиялық маңызды салалардың бірі болып қала беруде. Көмірге, қара және түсті металл кендеріне, сондай-ақ құрылыс шикізатына сұраныстың артуы олардың өндіру көлемін үнемі ұлғайту қажеттілігін туындатады (Sazanbayeva et al., 2024).

Минералдық-шикізат базасын игеру Оңтүстік Оралдың таулы аймағының өнеркәсіптік меңгерілуінің маңызды факторына айналып, Хромтау қаласы (Arystan et al., 2020) сияқты ірі индустриялық орталықтардың қалыптасуына ықпал етті. Оның өзегін тау-кен өнеркәсіптік кешенінің кәсіпорындары, атап айтқанда Дон тау-кен байыту комбинаты (Дон ТКБК) құрайды (Neudakhin, 1988). Алайда пайдалы қазбаларды өндірудің интенсификациясы қоршаған ортаға, әсіресе биосфера құрамдастарына, соның ішінде өсімдік жамылғысына айтарлықтай ықпал етеді. Топырақ жамылғысының бұзылуы, атмосфера мен гидросфераның ластануы, табиғи кешендердің механикалық бүлінуі және техногендік ландшафтардың қалыптасуы өсімдік жамылғысының деграациясына, биологиялық алуан түрліліктің азаюына және экологиялық тепе-теңдіктің бұзылуына әкеліп соғады (Berdenov et al., 2025).

Зерттеудің мақсаты – Оңтүстік Орал тауларының (Қазақстан бөлігіндегі) аумағында орналасқан Дон тау-кен байыту комбинаты қызметінің оған іргелес жатқан аумақтағы өсімдік жамылғысына әсерін зерттеу, сонымен қатар Оңтүстік Орал тауларының (Қазақстан бөлігіндегі) өсімдік жамылғысының бұзылу деңгейін бағалау болып табылады.

Зерттеу аумағы мен нысаны. Зерттеу және талдау Оңтүстік Орал тауларының аумағында жүргізілді. Зерттеу нысаны ретінде Оңтүстік Орал тауларының өсімдіктер жамылғысы табылады.

Дон тау-кен байыту комбинаты (ТКБК) – «Қазхром» ТҰК» АҚ филиалы, ол Қазақстан Республикасының шикізат нарығындағы металлургия, химия және отқа төзімді материалдар өнеркәсібі үшін жоғары сапалы хром кендері мен хром концентраттарының ең ірі жұмыс істеп тұрған жеткізушісі болып табылады. Кәсіпорын 1937 жылы ашылған Оңтүстік Кемпірсай кен орнын игеруде (Kozachok, 2008). Комбинат құрамына жылдық есепте хром шикізатын өндіру және өңдеу көлемі бойынша әлемдегі ең ірі саналатын 2 шахта мен 2 байыту фабрикасы кіреді (Kakimzhanov et al., 2025).

Комбинат Хромтау қаласының қала құраушы кәсіпорны болып табылады. ТКБК - ның өнеркәсіптік алаңы мен Хромтау қаласы «Дон» теміржол станциясымен байланысқан автожол және ішкі комбинаттық теміржол желісі арқылы қосылған. Аудан өнеркәсібі іс жүзінде бір ғана кәсіпорын - тау-кен байыту комбинатымен көрсетілген. Хромтау қаласының халқы 24 мыңнан аса адамды құрайды (Safarov et al., 2023).

Дон ТКБК кәсіпорны хромит кен орындарын, кең таралған пайдалы қазбалар (саз, құм) кен орындарын игеруді жүзеге асырады, сондай-ақ екі су алу пунктінде шаруашылық және ауыз су қамтамасыз ету үшін жерасты суларын өндіреді (Program of industrial environmental monitoring of Donskoy MPP..., 2023).

Дон ТКБК құрамына ашық тау-кен жұмыстары жүргізілетін «Донской» - бір кеніші мен «Молодежный» және «10-летия независимости Казахстан» - жерасты тау-кен жұмыстары жүргізілетін екі шахта кіреді. Сонымен қатар, Дон ТКБК құрамында екі байыту фабрикасы – ҰБФ-1 және КБКФ жұмыс істейді. Комбинат құрамында бірқатар қосалқы бөлімшелер бар. Комбинат құрамына барлығы 28 бөлімше кіреді (Koshim et al., 2015).

Геоморфологиялық тұрғыдан алғанда, аумақ Орал таулы жүйесінің оңтүстік шетінің қазақстандық бөлігіне жатады (Ozgeldinova et al., 2025). Қазақ Оралы екі тармаққа бөлінеді: батысы – Ор-Елек қыраты және шығысы – Мұғалжар таулары. Ор-Елек қыраты Елек пен Ор өзендерінің аралығында орналасқан, биіктігі 509 м-ге дейін жететін, төбелі және таулы аймақтармен алмасып отыратын тілімденген жер бедеріне ие аймақ. Шығыс бөлігін негізінен Мұғалжар таулары мен біртіндеп Ырғыз өзенінің аңғарына қарай еңкейетін Шығыс Мұғалжар жазығы құрайды (Abdulin, 1994). Өңірдің жер бедері әртүрлі: тегістелген учаскелерден бастап, Орал мен Ырғыз өзендерінің салалары қалыптастырған шатқал тәрізді аңғарларға дейін созылады (Vilesov et al., 2009).

Аумақтың климаты – күрт континенттік, жазы ыстық әрі құрғақ (+38°C-қа дейін), қысы қатан (–40°C-қа дейін). Жылдық жауын-шашын мөлшері 150–300 мм, негізінен қыс пен көктем айларында түседі. Желдер оңтүстік-шығыстан соғады, жылдамдығы 20–30 м/с, кейде шанды дауыл түрінде 50 м/с-қа дейін жетеді (Agroklimaticheskie resursy Aktjubinskoj oblasti (1974). Беткі сулары аз; Жем, Ор және Ырғыз өзендері тармақтарымен бірге жазда тайызданып қалады, алайда таулы жоталарда жерасты суларының едәуір қоры (700 млрд м³-қа дейін) шоғырланған (Gataulina et al., 2025).

Бассейндік аумақтар геожүйелерінің жіктелуіне сәйкес (Dzhanaleeva, 1998), қарастырылып отырған аумақ Ор - Елек микрогеожүйесіне кіреді, ол өз кезегінде Елек макрогеожүйесіне жатады (Berdenov, 2018). Ор - Елек суайырығынан Ор және Елек өзендерінің салалары бастау алады. Ауданның батыс бөлігіндегі Көкпекті және Қуағаш өзендері Елекке құяды. Шығыс және оңтүстік бөлігіндегі Тассай, Жарлы-Бұтақ, Қызылқайың, Мамыт, Қайрақты өзендері Орға құяды (Berdenov, 2014). Сонымен қатар, аудан аумағында Ырғыз және Жем өзендерінің бастаулары қалыптасып, олар беткі ағынның негізгі бөлігін құрайды. Сондай-ақ су теңгерімінде жергілікті маңызға ие шағын көлдер де кездеседі (Sotnikov et al., 1972).

Аумақта негізінен аналық жыныстардың элювийі мен қиыршықтасты шөгінділерде қалыптасқан жетілмеген ұсақтасты топырақтар басым. Бұл топырақтардың қуаты аз, құрамы сазды немесе саздақты болып келеді және жартасты жыныстардың жақын орналасуымен сипатталады. Мұғалжардың белдік бөлігінде мұндай топырақтар жасылтас және тақтатас жыныстарында дамиды (Dmitriyev et al., 2024).

Қазақстан аумағындағы Оңтүстік Орал тауларының өсімдік жамылғысы алуан түрлі. Далалық белдем Оңтүстік Орал таулары аумағының дерлік басым бөлігін алып жатыр. Солтүстіктен оңтүстікке қарай үлкен созылымдығына байланысты дала аймағы төрт белдем тармағына бөлінеді:

- оңтүстік қара топырақтардағы құрғақшылыққа бейім түрлі шөпті-бозды далалар;
- қою-қоңыр топырақтардағы орташа құрғақ дәнді-дақылды астық тұқымдас далалар;
- қоңыр топырақтардағы құрғақ ксерофитті-түрлі шөпті-дәнді-дақылды астық тұқымдас далалар;
- ашық қоңыр топырақтардағы шөлденген жусанды-дәнді-дақылды астық тұқымдас далалар.

Құрғақ дала өсімдік жамылғысы қызыл бозды - әртүрлі шөпті, дәнді-дақылды астық тұқымдас - түрлі шөпті қауымдастықтардан тұрады. Олардың құрамында боздың түрлері – қылқанбоз (*Stipa capillata*), қызыл боз (*Stipa pulcherrima*), бетеге (*Stipa lessingiana*) басым келеді. Шөптердің арасында қызылбояу (*Galium*), қазтабан (*Potentilla*), түйнекті фломис (*Phbomis tuberosa*), кербез мыңжапырақ (*Achillea nobilis*) және т.б. секілді ксерофиттер басым. Тұзға төзімді бірқатар түрлері де бар: ашы (*Artemisia absinthium*) және Лерха жусан (*Artemisia lercheana*), татар кермегі (*Limonium tataricum*), мыңжапырақты түймешетен (*Tanacetum millefolium*), абалақ төскей (*Linosyris villosa*), дала зығыры (*Galatella*).

Өсімдіктер жамылғысына қызыл боз (*Stipa pulcherrima*), құмды бетеге (*Stipa pennata*), қылқанбоз (*Stipa capillata*), сонымен қатар бетеге (*Festuca valesiaca*), шөл сұлыбасы (*Helictotrichon desertorum*), келлерия (*Koeleria*) және түрлі шөптер енетін ұсақ шоқының қиыршықтасты топырақтарындағы бетегелі-сұлыбас-түрлішөпті даласы кең таралған.

Құмды топырақтар мен құмдардағы өсімдік жамылғысында құм бозды-түптізді астық тұқымдас қауымдастықтар басым келеді. Олардың құрамына құм бозы, типчак, тырса, еркекшөп, қияқ және әртүрлі шөптер кіреді.

Құмды бетеге (*Stipa pennata*), бетеге (*Festuca valesiaca*), қылқанбоз (*Stipa capillata*) келлерия (*Koeleria*) және т.б. түрлі шөптер құрамдас болатын құм бозды – дәнді дақылды астық тұқымдас қауымдастықтар басым келеді.

Ойпаңдар мен жайылмалы жерлерде шалғындық типтегі өсімдіктер кең таралған: жатаған бидайық (*Elytrigia répens*), айрауық (*Calamagrostis*), қоңырбас (*Poa*), суоты (*Agrostis*) және әртүрлі шөптесін өсімдіктер.

Орташа құрғақ дала өсімдік жамылғысы бозды - бетегелі, қылқанбоз - жусанды, бетегелі - бозды қауымдастықтардан тұрады. Астық тұқымдастардың ішінде қылқанбоз (*Stipa capillata*) немесе бетеге (*Stipa lessingiana*) басым келеді. Әртүрлі шөптер құрамына негізінен қуаңшылыққа бейім дала түрлері жатады.

Шалғындық қатар топырақтарындағы шөп жамылғысы қылтанақсыз арпабас (*Bromus inermis*), шалғындық түлкікұйрық (*Alopecurus pratensis*), жатаған бидайық (*Elytrigia repens*), құрғақ айрауық (*Calamagrostis epigejos*) түрлерімен сипатталады. Әртүрлі шөптердің арасында бұршақ тұқымдастар көп кездеседі: жоңышқа *Medicago*, ноқатшөп (*Lathyrus*), орал миясы (*Glycyrrhiza uralensis*), сондай-ақ арамшөптер де бар - талшық сүттіген (*Euphorbia pseudoglobosa*), британ андызы (*Inula britannica* L), авран (*Gratiola*) (кесте 1).

Құрғақ дала өсімдік жамылғысы бетегелі - бозды - жусанды, бетегелі - жусанды қауымдастықтардан тұрады, мұнда негізінен бетеге (*Festuca valesiaca*) басым таралған. Боздардың ішінде қылтықбоз (*Stipa capillata*), майда боз (*Stipellula*), бетеге (*Stipa lessingiana*) жиі кездеседі, олар қараматау және жусанды қауымдастықтармен араласа өседі.

Жусандардың ішінде Лерхов жусаны (*Artemisia lercheana*), кебір жусан (*Artemisia nitrosa*) және ұсақгүлді жусан (*Artemisia pauciflora*) басым. Ксерофитті әртүрлі шөптер аз таралған, олардың қатарында төскей (*Galatella linostris*), түймешетен (*Tanacetum vulgare*), қазтамақ (*Gálum*), сары жоңышқа (*Medicago falcata* L.) бар. Ал бұзылған жерлерде қалталы ебелек (*Ceratocarpus utriculosus*), австриялық (*Artemisia austriaca*) және ақ жусан (*Artemisia alba*) кездеседі.

Құмдар мен құмды топырақтарда псаммофитті далалар таралған, олардың құрамында құмды бетеге (*Stipa pennata*), бұйра тайран (*Cleistogenes squarrosa*), Беккер бозоты (*Festuca beckeri*) және үлкен суот (*Agrostis gigantea*) кездеседі. Бұзылған құмдарда өсімдіктер сирек кездеседі, мұнда қияқ (*Leymus*) және бұталы өсімдіктер – жүзгін (*Calligonum*), қоянсүйек (*Ammodendron*) өседі. Шалғындық жерлерде астық тұқымдас шөп қауымдастықтары басым: жатаған бидайық, жаушалғын, арпабас, қамысқұлақ; ал сортаң шалғындарда - ақмамық, қысқа қылтықты және Богдан арпалары, сондай-ақ қияқ түрлері өседі.

Шөлденген даланың өсімдік жамылғысы шөлді жартылай бұталардан және далалық дәнді-дақылды, борпылдақ дәнді-дақылды әрі тамырсабақты өсімдіктерден құралған кешендермен сипатталады. Далалық қауымдастықтардың доминанттары ретінде бетеге (*Festuca valesiaca*), майда боз (*Stipa sareptana*), қылтық боз (*Stipa capillata* L.), шөл (*Agropyron desertorum*) және тарақты еркекшөп (*Agropyron cristatum*) кездеседі.

Шөл қауымдастықтарында Лерх жусаны (*Artemisia lerchiana*), ұсақгүлді жусан (*Artemisia pauciflora*), селитралы жусан (*Artemisia nitrosa*), сортаң жусан (*Artemisia santonica*), қотыр көкпек (*Atriplex verrucifera*), сортаң бұйырғын (*Aeluropus litoralis*), көкпек (*Haloxylon aphyllum*) және басқа түрлер басым таралған.

Ұсақ шоқылы аймақтарда өсімдік жамылғысының негізін сирек орналасқан дәнді-дақылды астық тұқымдас далалар құрайды. Ылғалды ойпандарда шалғындық өсімдіктер таралған: айрауық (*Calamagrostis epigejos*), жатаған бидайық (*Elytrigia repens*), атқонак (*Phleum pratense*), шалғындық түлкікұйрық (*Alopecurus pratensis*.) және әртүрлі шөптесіндер.

Кесте 1. Оңтүстік Орал таулы аймағындағы (Қазақстан бөлігіндегі) реликті, сирек кездесетін және кең таралған өсімдіктер

№	Өсімдіктер түрлері
1	Жабысқақ қандыағаш - <i>Alnus glutinosa</i>
2	Еркек усасыр - <i>Dryopteris filix-mas</i>
3	Батпақты қырыққұлақ - <i>Thelypteris palustris</i>
4	Кәдімгі шытырлақ - <i>Impatiens noli-tangere</i>
5	Үлкен сүйелшөп - <i>Chelidonium majus</i>
6	Баршынгүл - <i>Gladiolus imbricatus</i>

7	Қырықбуын – <i>Equisetum</i>
8	Жасыл бүлдірген - <i>Fragaria viridis</i>
9	Лалажапырақты қоңырауша - <i>Adenofora liliifolia</i>
10	Арам сүмелек - <i>Delphinium consolida</i>
11	Көкжалбыз – <i>Nepeta</i>
12	Тегеурінгүл – <i>Delphinium</i>
13	Зығырот – <i>Linaria</i>
14	Қалампыр – <i>Dianthus</i>
15	Қала гравилаты - <i>Geum urbanum</i>
16	Күйдіргі сарғалдақ - <i>Ranunculus acris</i>
17	Кестежусан – <i>Pulsatilla</i>
18	Ашық кестежусан - <i>Pulsatilla patens</i>
19	Сібір ымыртгүлі - <i>Hesperis sibirica</i>
20	Кәдімгі жұпаргүл - <i>Origanum vulgare</i>
21	Боз - <i>Stipa Lessingiana</i>
22	Таракбоз тырсық - <i>Stipa saeptana</i>
23	Бөденешөп – <i>Veronica</i>
24	Орыс гүлшекіре - <i>Centaurea ruthenica</i>
25	Бетеге - <i>Festuca valesiaca</i>
26	Түйнекті фломис - <i>Phbomis tuberosa</i>
27	Қазтабан – <i>Potentilla</i>
28	Қылтаңақсыз арпабас - <i>Bromus inermis</i>
29	Нағыз қызылбояу - <i>Galium verum</i>
30	Мыңжапырақты түймешетен - <i>Tanacetum millefolium</i>
31	Лерха жусаны - <i>Artemisia lerceana</i>
32	Ащы жусан - <i>Artemisia absinthium</i>
33	Сарыбас жоңышқа - <i>Medicago falcata</i>
34	Жоңышқа – <i>Medicago</i>
35	Тобылғы – <i>Filipedula</i>
36	Кербез мыңжапырақ - <i>Achillea nobilis</i>
37	Сәлбен – <i>Salvia</i>
38	Жалпақжапырақты көкбас - <i>Eryngium planum</i>
39	Баданалы қоңырбас - <i>Poa bulbosa</i>
40	Кәдімгі мыңжапырақ - <i>Achillea millefolium</i>
41	Шренк қызғалдағы - <i>Tulpipa schrikii</i>
42	Арамшытыр – <i>Lepidium</i>
43	Томар бояу кермек - <i>Limonium gmelinii</i>
44	Шалғын қоңырбас - <i>Poa pratensia</i>
45	Төскей – <i>Linosyris</i>
46	Абалақ төскей - <i>Linosyris villosa</i>

Оңтүстік Орал таулы аймағында (Қазақстан бөлігіндегі) орналасқан Дон тау-кен байыту комбинатының аумағы қуаң әртүрлі шөпті дала белдем тармағында орналасқан дала аймағында жатыр.

Өсімдік жамылғысы сирек және негізінен бетеге және бетеге-жусан формацияларымен сипатталады. Табиғи дала қауымдастықтары бетеге-қылтықты шөп ассоциацияларынан түзіліп, олардың құрамында ксерофильді, түптізу шым түзетін астық тұқымдастар басым: бетеге (*Festuca valesiaca*), жіңішке қауырсынды бетеге (*Stipa capillata*), таракбоз қауырсынды бетеге (*S. saeptana*), қызғылт қауырсынды бетеге (*S. rubens*), қысқа қауырсынды бетеге (*S. lessingiana*) және шөлдік арпабас (*Helictotrichon desertorum*). Сонымен қатар шөптесін жамылғыда жусан (*Artemisia spp.*) және қуаңшылыққа төзімді әртүрлі шөптер – татарша астрагат (*Galatella tatarica*), жіңішке күлтелі қалампыр (*Dianthus stenocalyx*), сабаусыз тасжарған (*Potentilla acaulis*), қазақстандық түймедақ (*Tanacetum kasachstanicum*) кездеседі.

Шөптесіннің тұтастығы 60%-ға дейін жетеді, өсімдіктердің орташа биіктігі 50–60 см (Berdenov et al., 2022).

Өсімдік жамылғысы Дон тау-кен байыту комбинатының (Дон ТКБК) тау-кен жұмыстары нәтижесінде бұзылған (Berdenov et al., 2021).

Тау-кен жұмыстары, қала құрылысы және басқа да мақсаттар үшін тікелей пайдаланылатын алаңдарды қамтитын кәсіпорынның жер телімі шамамен 5 мың га құрайды. Осы аумақтың шамамен 90 %-ы қара-қоңыр түсті орташа саздақты топырақтарда қалыптасқан, кей жерлерінде сортаңдармен ауысып отыратын ауыл шаруашылық жерлері алып жатыр. Тікелей кен өндіруге (тау-кен телімі) бөлінген жер көлемі 350 гектарды құраса, ал жыныс үйінділері, қалдық сақтау қоймасы және су қоймасы алып жатқан аумақ екі есе үлкен (Beketova et al., n.d.).

Аймақтың өсімдік жамылғысына тән ерекшелігі – оның дала бұталарының, негізінен, тобылғының басымдылығы (Carpenter et al., 2009).

Жазықтардың далалық өсімдіктер арасында шағын аумақтармен шабындықтар кездеседі. Олар қосымша ылғалдану болатын жерлерге – Ор, Ойсылқара өзендері және олардың салаларының аңғарларына тән. Шабындық өсімдіктерінің флоралық құрамы бай, олар мезофильді астық тұқымдастармен, алуан түрлі шөптесіндермен және жусандармен сипатталады.

Қарастырылып отырған нысан аумағында жемшөптік қасиеттері бар өсімдіктерден бөлек, дәрілік өсімдіктер де кездеседі: қанқызыл (*Sanguisorba officinalis*), кәдімгі жусаншөп (*Tanacetum vulgare*), нағыз қырмызыгүл (*Galium verum*), кәдімгі мыңжапырақ (*Achillea millefolium*), Маршалл тимьяны (*Thymus marschallianus*) - шүйгіншөп, ірі жолжелкен (*Plantago major*), кәдімгі бақбақ (*Taraxacum officinale*), қойқап (*Capsella bursa-pastoris*), дәрілік түйежоңышқа (*Melilotus officinalis*), сарыгүл (*Hypericum perforatum*), дәрілік балдырған (*Valeriana officinalis*), алтынгүл (*Adonis spp.*) (Chashina et al., 2020).

Кен орны аумағында және оған іргелес жатқан жерлерде Қазақстанның Қызыл кітабына енген, заңмен қорғалатын өсімдік түрлері анықталған жоқ. Кен орынға жақын жердегі ұзақ мерзімді техногендік жүктеменің әсерінен өсімдік жамылғысы айтарлықтай әлсіреген және іс жүзінде жоқтың қасы. Учаске аумағы негізінен игерілген кеңістіктермен, ескі үйінділермен және т.б. көрсетілген (Aypaisova, 2012).

Комбинаттың қоршаған ортаға негізгі экологиялық әсер түрлеріне: газ-аэрозольдік және шаңмен ластану, сондай-ақ химиялық, механикалық, радиациялық, жылулық, шудық және сейсмикалық әсерлері жатады. Тау кендерін өндіруден бастап дайын өнім шығаруға дейінгі технологиялық үрдістерді жүргізу кезінде мұнай өнімдері, мыс, мырыш, темір, кальций, магний және басқа да ауыр металдар сияқты көп мөлшердегі ластаушы заттардың түзілуі және бөлінуі орын алады. Кеніш және шахта суларын үлкен көлемде жерүсті су жүйелеріне төгу нәтижесінде теріс экологиялық әсерлер кен орындары шегінен тыс жерлерде байқалып, ірі аумақтарды қамтуда. Жер телімі мен ресурстарды алу - табиғи ландшафттың бұзылуына әкеліп соғатындар маңызды мәселелердің бірі болып табылады (Ramazanova et al., 2019).

2. Материалдар мен әдістер

Зерттелетін аумақта А.Г. Мошкалева (1988) және Н.Т. Смирнов (1979) әдістемелері бойынша 10x10 м² үлгілік алаңдар алынды (Smirnov, 1979; Baitenov, 1999). Дон ТКБК-на іргелес аумақта үлгілік алаңдар «Мирный» карьерінен, «Южный» карьерінің үйінділерінен және «Поисковый» карьері үйінділерінен 500 м, 3000 м, 5000 м қашықтықтарда (кесте 2) орналастырылды. Әрбір үлгілік алаңда өсімдіктердің түрлік құрамы есептеліп, талданды. Өсімдіктерді анықтау үшін анықтамалықтар пайдаланылды (Baitenov, 1999; Pavlov, 1956–1966).

Кесте 2. Өсімдіктерді зерттеуге арналған сынақ алаңдарының атауы мен координаттары

Үлгілік алаңдардың аталуы	Географиялық сипаттамасы	Географиялық оординаттары
«Мирный» карьері	Хромтау қаласынан оңтүстік-батысқа қарай 2,5 км және жақын маңдағы тұрғын аудандардан 1,2 км қашықтықта орналасқан. Карьер ұзартылған сопақша пішінді, өлшемі шамамен 1,1×0,7 км және тереңдігі 180-200 м дейін. Бұзылған аумақтың ауданы іргелес технологиялық аймақтармен бірге 0,8 км ² -ден асады.	Карьердің орталық бөлігінің географиялық координаттары: 50°14'10" с. е. 58°23'55" ш. б.
«Южный» карьерінің үйінділері	Үйінділер Ақтөбе облысы, Хромтау қаласының оңтүстік өнеркәсіптік аймағында, жақын маңдағы тұрғын аудандардан шамамен 300 м және қараусыз қалған өнеркәсіптік аумақтан шамамен 50 м қашықтықта орналасқан. Нысан хромит кендерін өндіру кезінде аршу жұмыстары кезінде пайда болған солтүстік-шығыс және шығыс бағытта созылған үйінділер жүйесімен ұсынылған. Жеке үйінділердің биіктігі 20-дан 60 м-ге дейін, ұзындығы-1,2 км-ге дейін, ені-300 м-ге дейін. үйінділердің жалпы ауданы шамамен 0,35 км ² құрайды.	Үйінділердің орталық бөлігінің географиялық координаттары: 50°14'50" с. е. 58°25'10" ш. б.
«Поисковый» карьері үйінділері	Үйінділер Хромтау қаласының өнеркәсіптік аймағының солтүстік-батыс бөлігінде, «Поисковый» карьеріне жақын жерде және қаланың орталық бөлігінен солтүстік-батысқа қарай 3 км жерде орналасқан. Үйінділер шамамен 1,5 км ² аумақты алып жатыр және хромит кендерін өндіру кезінде карьерден шығарылған аршылған және үйінді жыныстардың бірнеше ірі конус тәрізді және жоталы жинақтарымен ұсынылған. Жеке үйінділердің биіктігі 60-75 м-ге жетеді.	Үйінді аймағының орталық бөлігінің координаттары: 50°16'05" с. е. 58°21'45" ш. б.

Өсімдік жамылғысының бұзылу деңгейін бағалау жұмыстары ландшафттардың кеңістіктік-типологиялық ерекшеліктерін ескере отырып, картографиялық, қашықтықтан зондау және далалық зерттеулер деректерін кешенді талдау негізінде жүргізілді. Негізгі дереккөз ретінде құрылымдық-динамикалық жіктеу қағидаттарына сәйкес құрастырылған 1:3000000 (масштаб) ландшафттық және өсімдік карталары, геоақпараттық деректер базасы және жоғары айырымды ғарыштық суреттер, сонымен қатар далалық зерттеу материалдары пайдаланылды. Бұл жіктеуде өсімдіктер табиғи ортаның жай-күйінің интегралдық көрсеткіші ретінде қарастырылады. (de Groot et al., 2010).

Жоғарыда аталған бағалау жұмыстарын жүзеге асыру мақсатында өсімдік жамылғысының бұзылу деңгейін сипаттайтын үш градациядан тұратын жіктеу жүйесі әзірленді (Pettorelli et al., 2011):

Фондық және аз бұзылған өсімдік жамылғысы. Сипаттамасы – ілеспе түрлер үлесінің аздап төмендеуі (5 %-ға дейін) және проекциялық жамылғыда әлсіз өзгерістердің байқалуы. Фитоценоздардың құрылымы мен құрамы табиғи жағдайларға барынша жақын күйінде сақталады.

Орташа бұзылған өсімдік жамылғысы. Ілеспе түрлерді құрамының 10–30 %-ға өзгеруі байқалады. Негізгі доминанттар сақталғанымен, қауымдастықтар құрылымында ішінара бұзылулар орын алады.

Күшті бұзылған өсімдік жамылғысы. Ілеспе түрлердің басым бөлігінің (40–60 %-ға дейін) жойылуымен мен адвентивті және рудеральды топтардың айтарлықтай басып кіруімен

сипатталады. Жекелеген аумақтарда олардың үлесі өсімдік жамылғысының жалпы құрылымының 50 %-дан асып түседі.

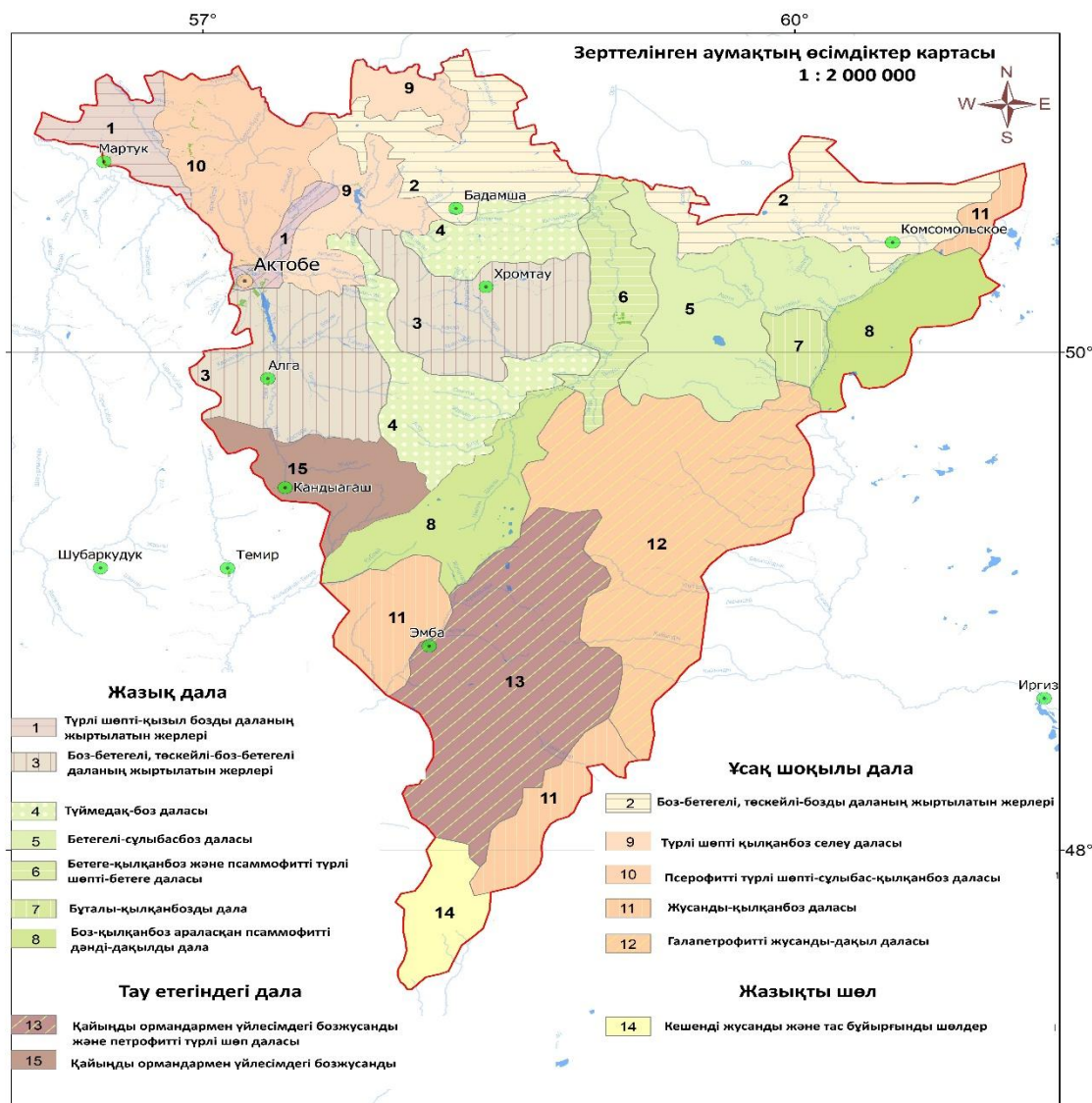
3. Нәтижелер

Зерттелген аумақтардағы өсімдік жамылғысын талдау нәтижесінде зерттеу аймағында ең көп таралған түрлер ретінде *Festuca valesiaca* (құм селеу), *Stipa capillata* (бетеге) анықталды. Жусан тұқымдастардан жусандардың австриялық түрі және *Artemisia lerchiana* (ақ жусан) кездеседі; әртүрлі шөптерден негізінен *Medicago* (жабайы жоңышқа), *Achillea nobilis* (асыл мыңжапырақ), *Potentilla* (қан тамыршөп) және басқалары басым. Проекциялық жамылғысы 60–70%, өнімділігі 1 гектардан 5–6 центнер (кесте 3).

Кесте 3. Дон тау-кен байыту комбинатының өндірістік алаңдарынан 500–5000 м қашықтықтағы іргелес аумақтың флоралық құрамы

Өсімдік түрі	Түр өміршендігі	Ботаникалық тиесілілігі	Экоморфасы	Фитоценотүрлілігі	Шаруашылық мақсаты
<i>Stipa capillata</i> L.	көпжылдық	дәнді дақылды	ксерофит	таулы далалық	азықтық
<i>Stipa sareptana</i>	көпжылдық	дәнді дақылды	ксерофит	дала және тасты беткейлер	азықтық
<i>Stipa lessingiana</i>	көпжылдық	дәнді дақылды	эвксерофил	далалық	азықтық
<i>Stipa pulcherrima</i>	көпжылдық	дәнді дақылды	мезоксерофит	дала, тасты дала	азықтық
<i>Festuca rupicola</i>	көпжылдық	дәнді дақылды	анемофил	жартасты беткейлер мен жартастар	азықтық
<i>Festuca valesiaca</i>	көпжылдық	дәнді дақылды	апофит	дала, құрғақ шалғындар, тасты беткейлер	жайылымдық-азықтық
<i>Calamagrostis sylvatica</i>	көпжылдық	дәнді дақылды	-	-	-
<i>Elytrigia repens</i>	көпжылдық	дәнді дақылды	ксерофит	дала, жол жиектері, сортаң жерлер	арамшөп
<i>Artemisia pontica</i>	көпжылдық	түрлі шөп	эвксерофит	құрғақ тұзды және тұзды шалғындар	арамшөп
<i>Achillea nobilis</i>	көпжылдық	түрлі шөп	эвксерофит	шөгінді беткейлері	арамшөп
<i>Artemisia austriaca</i>	көпжылдық	жартылай бұта	ксерофит	дала, тұзды жерлер	арамшөп (дәрілік)
<i>Kochia prostrata</i> (L.) Schrad	көпжылдық	жартылай бұта	эвксерофил	тұзды батпақтар	азықтық

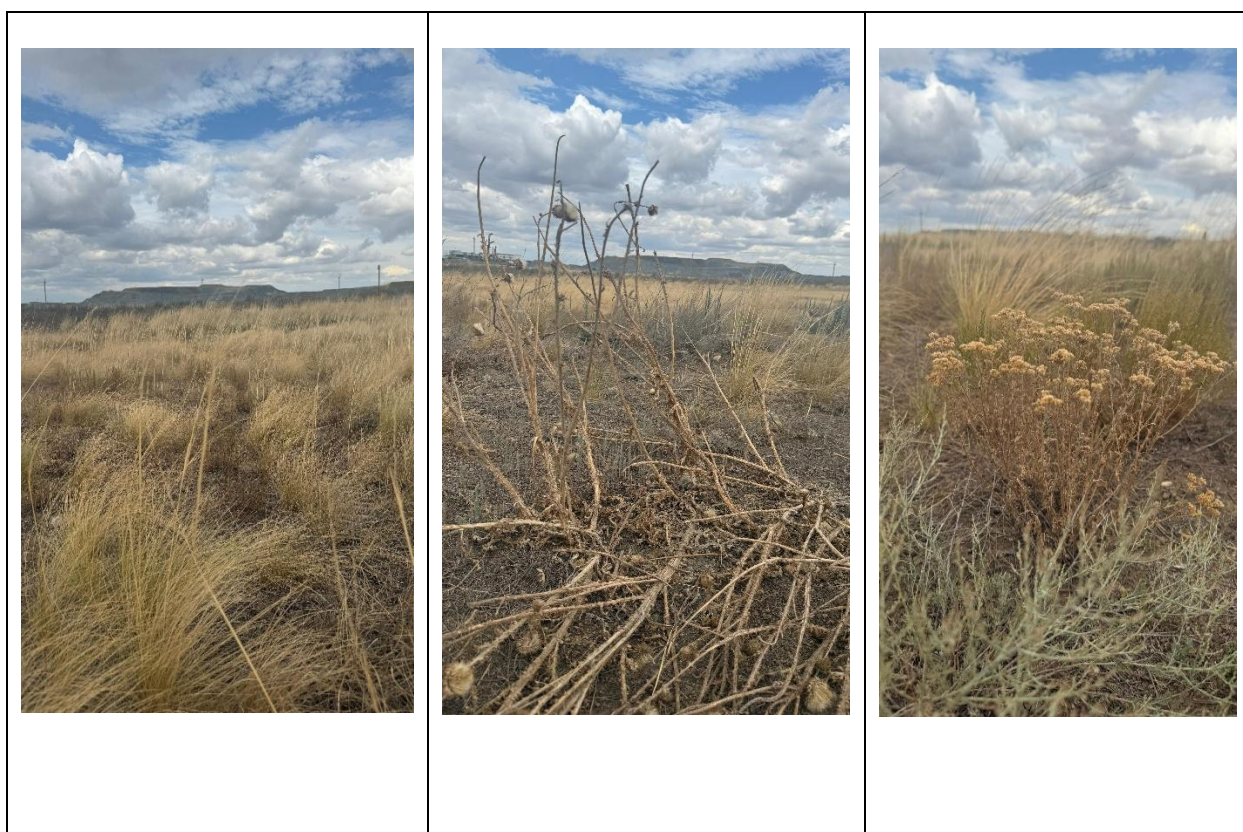
Жүргізілген жұмыстар барысында зерттелген нысандарда Қазақстанның Қызыл кітабына енгізілген түрлер анықталмады, алайда ареалы қысқарып бара жатқан сирек, эндемик өсімдіктер тобына жататын 8 түр анықталды. Олар: қатты жапырақты көдела (*Koeleria seleroophylla* P. Smirn), дулыға тәрізді сале (Orchis *militaris*), жабысқақ қоңырқай (*Alnus glutinosa*), домалақ жапырақты шықшайыр (*Drosera rotundifolia*), Комаров жоңышқасы (*Medicago komarovii* Vass), Мұғалжар басгүлі (*Jurinea mugodsharica* Iljin), Талиев көкгүлі (*Centaurea talievii* Kllop) (сурет 1).



Сурет 1. Оңтүстік Орал таулы аймағының (Қазақстан бөлігіндегі) өсімдік жамылғысының картасы

4. Талдау

Жүргізілген зерттеулер техногендік әсердің өсімдік жамылғысының жағдайына елеулі ықпалын тигізетінін көрсетті. Фитоценоздардың толық жойылуы түріндегі өсімдіктің әлсіреуі байқалмағанымен, өсімдіктер жамылғысы сипатының өзгеруі айқын көрінеді. Ең айқын бұзылулар ластаушы көздерден, соның ішінде карьерлер мен үйінді массивтерінен 500 м қашықтықта (сурет 2) орналасқан учаскелерде тіркелді. Бұл аймақта өсімдік жамылғысы деградациясының айқын белгілері байқалады, мысалы, өсімдіктердің жекелеген бөліктерінің курауы, жапырақтардың табиғи түсінің өзгеруі, биомассаның және проективті жамылуының төмендеуі. Сонымен қатар, техногендік әсер өсімдіктердің морфологиялық және физиологиялық сипаттамаларының бұзылуына әкелетіні анықталды: жапырақтар мен гүлдердің пішіні мен түсі өзгеріп, сондай-ақ вегетация мерзімдері ығысады.



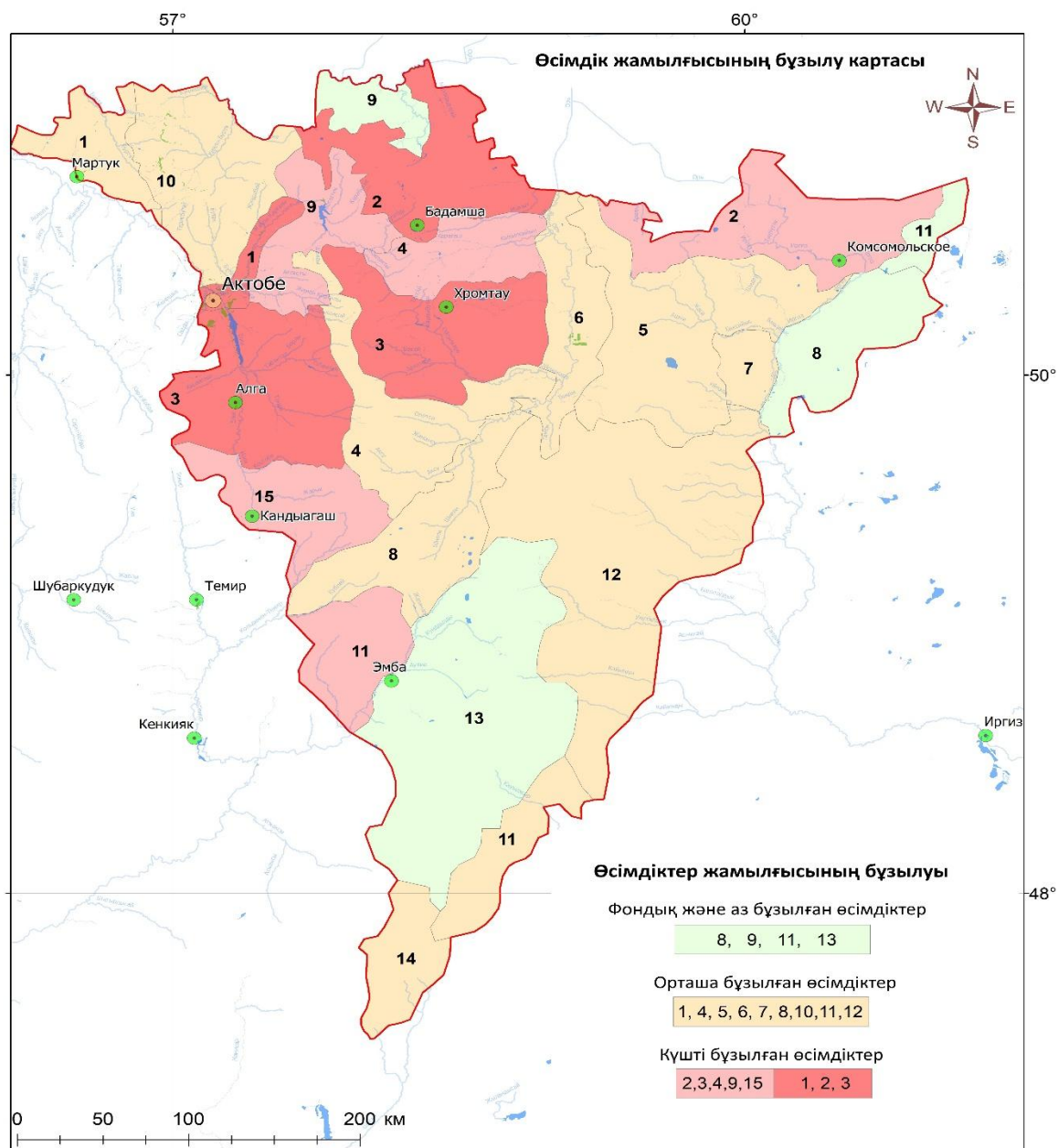
Сурет 2. Үйінділерден 500 м қашықтықтағы аумақтың өсімдік құрамы



Сурет 3. Үйінділерден 5000 м қашықтықтағы аумақтың өсімдік құрамы

Ластаушы көздерден 3000–5000 м қашықтықтағы учаскелерде (сурет 3) аталған теріс құбылыстар әлдеқайда аз немесе мүлдем байқалмайды. Бұл өнеркәсіптік нысаннан қашықтаған сайын өсімдік қауымдастықтарындағы өзгерістер дәрежесі азаятын техногендік әсер градиентінің бар екенін көрсетеді.

Жұмыс барысында зерттеу аумағында жиналған далалық зерттеу материалдары жүйеленіп, өңделді. Олар өсімдік жамылғысын сипаттау, түрлік құрамын, проекциялық жамылғыны және негізгі фитоценоздардың морфологиялық жағдайын қамтиды. Алынған нәтижелер цифрланып, геодеректер базасына енгізіліп, өсімдік жамылғысының бұзылу дәрежесінің үш градациясы көрсетілген (сурет 4) Қазақстан аумағындағы Оңтүстік Орал сілемдері өсімдіктер жамылғысының бұзылу картасы жасалды.



Сурет 4. Оңтүстік Орал таулы аймағының (Қазақстан бөлігіндегі) өсімдік жамылғысының бұзылу картасы

5. Қорытынды

Қорытындылай келе Дон тау-кен байыту комбинатының (ТКБК) өндірістік әсерін іргелес аумақтың өсімдік жамылғысына зерттеу нәтижесінде техногендік факторлардың негізінен өсімдіктердің экологиялық-физиологиялық жағдайына әсер ететіні, ал олардың түрлік алуандылығына әсері аз екені анықталды.

Өсімдік жамылғысы деградациясының айқын белгілері ластаушы көздерден (карьерлер, үйінділер) 500 м қашықтықта байқалды. Бұл аймақта өсімдіктердің қурауы, жапырақтар түсінің өзгеруі, биомассаның төмендеуі және фитоценоздар құрылымының бұзылуы тіркелді.

Ренатурализацияның бастапқы белгілері 1000–1200 м қашықтықта, ал бүлінген аумақтардың белсенді түрде қайта өсуі 2000 м-ден бастап байқалады. Проекциялық жамылғының артуы 2500 м-ден бастап барлық зерттелген нысандар үшін тән болып табылады.

Құрастырылған өсімдік жамылғысының бұзылу деңгейінің картасы (7-сурет) зерттелген аумақтағы фитоценоздардың антропогендік трансформация деңгейін айқын көрсетеді. Жоғары бұзылу дәрежесі бар ең үлкен аумақтар (қызыл түспен белгіленген) Ақтөбе қаласы мен Хромтау, Қарғалы және Алға аудандарында тіркелді. Бұл аталған аймақтағы қарқынды тау-кен өндірісі мен ірі өнеркәсіптік нысандардың болуымен байланысты айтарлықтай техногендік әсерді растайды.

Алынған деректер техногендік әсердің градиентінің бар екенін және ластаушы көздерден алыстаған сайын өсімдік жамылғысының ішінара өздігінен қалпына келу әлеуетін көрсетеді. Бұл рекультивациялық жұмыстар мен экологиялық мониторингті жүргізуде сараланған тәсілдің қажеттілігін айғақтайды (Berdenov et al., 2024).

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация - А.Б., Е.М.; әдістемесі - А.Б.; бағдарламалық қамтамасыз ету - Г.Г.; валидация - А.Б., Е.М., Г.Г.; формалды талдау - А.Б.; зерттеу - А.Б.; ресурстар - А.Б.; деректерді өңдеу - Г.Г.; жазу-түпнұсқа жобасын дайындау - А.Б.; жазу-шолу және өңдеу - Г.Г.; визуализация - Е.М.; жетекшілік - А.Б.; жоба жетекшілігі - А.Б.; қаржыландыру - А.Б. Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасымен танысып, келісті.

8. Автор туралы ақпарат

Бекетова, Айдана - зерттеуші, PhD-студент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; email: atbeketova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6389-7922>

Мендыбаев, Ерболат – биология ғылымдарының кандидаты, профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; email: mendybayev_yekh@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0193-8781>

Гатаулина, Гульзира – зерттеуші, PhD-студент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; email: gulziragataulina@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2181-8272>

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің гранты есебінен қаржыландырылатын «Жас Ғалым» ғылыми жоба аясында жүзеге асырылды (AP25795613).

10. Алғыстар: Алғыс айтылмайды.

11. Мүдделер қақтығысы: Мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейміз.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Abdulin, A.A. (1994). Geology and mineral resources of Kazakhstan (Geologija i mineral'nye resursy Kazahstana [in Russian]). Gylym.
2. Agroclimatic resources of Aktobe region (Agroklimaticheskie resursy Aktjubinskoj oblasti [in Russian]). (1974). Hydrometeoizdat.
3. Arystan, I.D., Baizbaev, M.B., Mataev, A.K., Bogzhanova, Zh.K., Abdrashev, R.M. (2020). Selection and justification of technology for fixing preparatory workings in unstable massifs on the example of the mine 10 years of independence of Kazakhstan. *Ugol* 6, 10–14. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-10-14>
4. Aypeisova, S.A. (2012). Conspectus of the flora of the Aktobe floristic district: Monograph (Konspekt flory Aktjubinskogo floristicheskogo okruga: monografija [in Russian]). Aktobe.
5. Baitenov, M.S. (1999). Flora of Kazakhstan (Flora Kazahstana [in Russian], Vol. 1–2. Gylym.
6. Beketova, A., Berdenov, Z., Mendybayev, E., Safarov, R., Shomanova, Z., Herman, G.V. (2019). Geochemical monitoring of industrial center for development of recreational areas (on the example of Khromtau-Don industrial hub, Kazakhstan). *GeoJournal of Tourism and Geosites* 27(4), 1449–1463. <https://doi.org/10.30892/gtg.27428-447>
7. Berdenov, Z., Mendybayev, E., Beketova, A., Satkarova, N., Gozner, M. (2021). Assessment of the Southern Urals recreational potential for the development of the Aktobe tourism industry. *GeoJournal of Tourism and Geosites* 38(4), 1274–1279. <https://doi.org/10.30892/gtg.38435-769>
8. Berdenov, Z.G., Yeginbayeva, A., Zinabdin, N., Beketova, A., Mendybayeva, G., Assylbekova, A., Önal, H. (2024). Recreational and functional zoning of territories with technogenic impact for the purpose of sustainable development of the region. *GeoJournal of Tourism and Geosites* 55(3), 1354–1363. <https://doi.org/10.30892/gtg.55336-1308>
9. Berdenov, Zh.G. (2018). Current state and geoecological analysis of geosystems of the Ilek river basin: Monograph (Sovremennoe sostojanie i geoekologicheskij analiz geosistem bassejna reki Ilek [in Russian]). Epigraf.
10. Berdenov, Zh.G., Dzhanaaleeva, G.M. (2014). Landscape-geochemical features of the runoff formation zone of the Ilek macro-geosystem. *Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. D. Serikbaeva* 4(66), 16–24.
11. Berdenov, Zh.G., Safarov, R.Z., Mendybaev, E.Kh., Shomanova, Zh.K., Ilieş, D.C. (2022). Impact of technogenic factors on surface water of the Ilek River Basin. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences* 5, 37–50.
12. Berdenov, Zh., Mendybayeva, G., Beketova, A., Sadvakassova, S., Laiskhanov, S., Kara, T., Kholov, Y. (2025). Technogenesis as a driver in the development of recreational areas for sustainable development and biodiversity conservation. *GeoJournal of Tourism and Geosites* 61(3), 1454–1461. <https://doi.org/10.30892/gtg.61305-1515>
13. Carpenter, S.R., Mooney, H.A., Agard, J., Capistrano, D., DeFries, R.S., Díaz, S., Dietz, T., Duraipappah, A.K., Oteng-Yeboah, A., Pereira, H.M. (2009). Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(5), 1305–1312. <https://doi.org/10.1073/pnas.0808772106>
14. Chashina, B., Ramazanov, N., Atasoy, E., Berdenov, Zh., Ilieş, D.C. (2020). Natural recreation potential of the West Kazakhstan Region of the Republic of Kazakhstan. *GeoJournal of Tourism and Geosites* 32(4), 1355–1361. <https://doi.org/10.30892/gtg.32424-580>
15. De Groot, R.S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity* 7(3), 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>
16. Dmitriyev, P.S., Fomin, I.A., Teslenok, S.A., Berdenov, Zh.G., Safarov, R.Z. (2024). The use of geoinformation systems in forecasting gully erosion on the territory of the North Kazakhstan Region. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences* 2, 65–78.

17. Dokhman, G.I. (1954). Vegetation of Mugodzhzar (Rastitel'nost' Mugodzharskogo hrebta [in Russian]). State Publishing House of Geographical Literature.
18. Dzhanaleeva, K.M. (1998). Physical geography of the Republic of Kazakhstan (Fizicheskaja geografija Respubliki Kazahstan [in Russian]). Kazakh University.
19. Gataulina, G., Mendybaev, Y., Aikenova, N., Berdenov, Z., Ataeva, G., Saginov, K., Dukenbayeva, A., Beketova, A., Almurzaeva, S. (2025). Ecological and geochemical characteristics of the content of heavy metals in steppe ecosystems of the Akmola Region, Kazakhstan. *Sustainability* 17(14), 6576. <https://doi.org/10.3390/su17146576>
20. Kakimzhanov, Y.Kh., Kyrgyzbay, K.T., Zhumatayev, S.M., Bazarbayeva, T.A., Kunypiyaeva, G.T. (2025). Assessment of soil contamination of the West Kazakhstan region with heavy metals as a result of industrial activity. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences* 1, 72–90.
21. Koshim, A.G., Sergeeva, A., Umirzakova, Zh., Baydrakhmanova, G. (2015). Geoecological state of the Khromtau deposit and its mapping using multitemporal Landsat images. *KazNU Bulletin. Geography Series* 2(41), 310–315.
22. Kozachok, A.F. (2008). Workplace of Donskoy MPP (chronicle of the enterprise) (Mesto raboty Donskoj GOK (letopis' predpriyatija) [in Russian]). EKO.
23. LLP Ecoproject. (2015). Natural conditions of the Aktobe region: Monograph (Prirodnye uslovija Aktjubinskoj oblasti: Monografija [in Russian]).
24. Moshkalev, A.G. (1988). Laying of forest taxation and decoding sample plots: Textbook (Zakladka lesotaksacionnyh i deshifrovochnyh probnyh ploshhadej: Uchebnoe posobie [in Russian]). SPbTA.
25. Neudakhin, S.D. (1988). Ore and people of Khromtau (about Donskoy MPP) (Ruda i ljudi Hromtau (o Donskom Gorno-obogatitel'nom kombinat) [in Russian]). Kazakhstan.
26. Novikova, A.G., Storozhenko, D.M., Bikmukhametov, M.A., Tyurmenko, A.N. (1968). Soils of the Aktobe region (Pochvy Aktjubinskoj oblasti [in Russian]). Alma-Ata.
27. Ozgeldinova, Z., Zhanguzhina, A., Mukayev, Z., Berdenov, Z., Ulykpanova, M. (2025). Assessment of the dynamics and condition of post-fire forest recovery in the Amankaragay Massif, Kostanay Region, Republic of Kazakhstan. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science* 5(2), 713–733.
28. Pavlov, N.V. (Ed.). (1956–1966). Flora of Kazakhstan (Flora Kazahstana [in Russian], Vol. 1–9. Academy of Sciences of the Kazakh SSR.
29. Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jędrzejewska, B., Lima, M., Kausrud, K. (2011). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Unforeseen successes in animal ecology. *Climate Research* 46(1), 15–27. <https://doi.org/10.3354/cr00936>
30. Program of industrial environmental monitoring of Donskoy MPP (branch of JSC TNK Kazchrome) for 2024–2028 (Programma proizvodstvennogo jekologicheskogo kontrolja Donskogo GOK – filiala AO TNK Kazhrom na 2024–2028 gody [in Russian]). (2023). Khromtau.
31. Ramazanova, N., Berdenov, Zh., Ramazanov, S., Kazangapova, N., Romanova, S., Toksanbaeva, S., Wendt, J. (2019). Landscape-geochemical analysis of steppe zone basin Zhaiyk. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences* 4(436), 33–41.
32. Safarov, R., Berdenov, Z., Shomanova, Z., Nossenkov, Y., Bexetova, Z. (2023). Spatial distribution of elements, environmental effects, and economic potential of technogenic waste materials of chromite slag from dumps of Don mining and processing plant. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy* 58(6), 1206–1219.
33. Sazanbayeva, A., Jangulova, G., Levin, E. (2024). Theoretical substantiation and technology of geodetic support of chromite deposits. *Acta Montanistica Slovaca* 29(3), 525–534. <https://doi.org/10.46544/AMS.v29i3.01>

34. Smirnov, N.T. (1979). Laying of sample plots: Methodological guidelines for students of the forestry faculty (Zakladka probnyh ploshhadej: Metodicheskie ukazaniya dlja studentov lesohozjajstvennogo fakul'teta [in Russian]). Ussuriysk.
35. Sotnikov, A.V., Bekmukhamedov, Kh.M., Kovalenko, V.A. (1972). *Water resources of the Aktobe region and their use* (Vodnye resursy Aktjubinskoj oblasti i ih ispol'zovanie [in Russian]). Kainar.
36. Vilesov, E.N., Naumenko, A.A., Veselova, L.K., Aubekero, B.Zh. (2009). Physical geography of Kazakhstan: Textbook (Fizicheskaja geografija Kazahstana: Uchebnoe posobie [in Russian]). Kazakh University.

Assessment of anthropogenic impact on the vegetation cover of the mountainous region of the Southern Urals (within Kazakhstan)

Aidana Beketova, Yerbolat Mendybaev, Gulzira Gataulina

Abstract: In this study, the vegetation cover of the Southern Ural mountain region (within the territory of Kazakhstan) is described, and the main plant communities of the area are considered. Special attention is given to endemic, relict, and medicinal species, as well as to species listed in the Red Book. A vegetation map of the territory was compiled. In addition, the article examines the impact of the activities of the Don Mining and Processing Plant, located within the study area, on the ecological state of adjacent vegetation cover. Field research was carried out in the areas of the “Mirny” quarry and the dumps of the “Poiskovy” and “Yuzhny” quarries. Sample plots were established in order to analyze the composition of the flora, and the dominant plant species characterizing current biodiversity were identified. A comparative analysis of vegetation structure was conducted at distances of 500, 3000, and 5000 m from pollution sources. The analysis of results showed that technogenic impact affects not so much the species composition of the vegetation cover, but mainly its overall ecological and physiological state. The main indicators of degradation, reflecting the weakening of phytocenoses and stressful growth conditions, include changes in natural leaf coloration, drying of individual plant parts, reduction in total biomass, as well as the disruption of community structure. These degradation features were observed starting from 500 m from pollution sources, while the initial signs of renaturalization were recorded at distances of 1000–1200 m, the regrowth of disturbed areas was evident at 2000 m, and the increase in projective cover was noted from 2500 m. The results of the study were digitized and entered into a geodatabase, and a vegetation disturbance map was created for the study area, based on three gradations of disturbance levels. The compiled map of vegetation disturbance levels makes it possible to determine the degree of anthropogenic transformation of phytocenoses in the investigated territory.

Keywords: technogenic impact; vegetation cover; Donskoy Mining and Processing Plant; ecological state; Southern Urals.

Оценка техногенного воздействия на растительный покров горной области Южного Урала (в пределах Казахстана)

Айдана Бекетова, Ерболат Мендыбаев, Гульзира Гатаулина

Аннотация: В данной работе описан растительный покров Южно-Уральской горной области (в пределах Казахстана) и рассмотрены основные растительные сообщества региона. Особое внимание уделено эндемичным, реликтовым и лекарственным видам, а также видам,

занесённым в Красную книгу. Составлена карта растительности территории. Кроме того, в статье рассматривается влияние деятельности Донского горно-обогатительного комбината, расположенного в пределах исследуемого района, на экологическое состояние растительного покрова сопредельных территорий. Исследования проводились на территории карьера «Мирный», а также на отвалах карьеров «Поисковый» и «Южный». Для анализа состава флоры были заложены пробные площадки. Определены доминирующие виды растений, характеризующие современное биоразнообразие. На расстояниях 500, 3000 и 5000 м от источников загрязнения был проведён сравнительный анализ структуры растительного покрова. Анализ результатов показал, что техногенное воздействие влияет не столько на видовой состав растительности, сколько на её общее эколого-физиологическое состояние. Основными признаками деградации, свидетельствующими об ослаблении фитоценозов и стрессовом характере условий произрастания, являются изменение естественной окраски листьев, увядание отдельных частей растений, уменьшение общей биомассы, а также нарушение структуры сообществ. Указанные признаки деградации отмечались начиная с 500 м от источников загрязнения, в то время как начальные проявления ренатурализации фиксировались на расстоянии 1000–1200 м, восстановление нарушенных участков – с 2000 м, а увеличение проективного покрытия – с 2500 м. Результаты исследования были оцифрованы и занесены в геоинформационную базу, на основе чего составлена карта растительного покрова по трём градациям уровня нарушенности. Составленная карта степени нарушенности растительности позволяет определить уровень антропогенной трансформации фитоценозов в исследуемой территории.

Ключевые слова: техногенное воздействие; растительный покров; Донской ГОК; экологическое состояние; горная область Южный Урал.

Плацента как биомаркер экологической ситуации: результаты микроминерального анализа в Акмолинской области

Ардак Ержанова¹, Ерик Меркибаев^{2*}, Сауле Нурмакова², Ерлан Жумай¹, Ануар Ахметжан³, Алина Еркинқызы³, Акмарал Ниязова²

¹Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан; erlanzhumai@gmail.com

²Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, Алматы, Казахстан; ar.yerzhanova@satbayev.university; Niyazova.akma@mail.ru

³Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфандиярова, Алматы, Казахстан; akhmetzhan@rambler.ru; Dr_yerkinovna@mail.ru

*Корреспонденция: y.merkibayev@satbayev.university

Цитирование: Ержанова, А., Меркибаев, Е., Нурмакова, С., Жумай, Е., Еркинқызы, А., Ниязова, А. (2025). Плацента как биомаркер экологической ситуации: результаты микроминерального анализа в Акмолинской области. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 152(3), 191-206.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-192-207>

Академический редактор:
Ж.Г. Берденов

Поступила: 09.09.2025
Исправлена: 17.09.2025
Принята: 19.09.2025
Опубликована: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация: В статье представлены результаты комплексного исследования микроминерального состава плацент жительниц Акмолинской области, региона, характеризующегося повышенной радиоэкологической напряжённостью, связанной с интенсивной добычей урана и золота, а также с наличием природных радоновых аномалий. Основной целью исследования стало выявление особенностей накопления и распределения минеральных фаз в плацентарной ткани, что позволило оценить влияние эколого-геохимических факторов на систему «мать–плацента–плод».

Методическая база включала использование сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, Hitachi S-3400N) и энергодисперсионной спектроскопии (Bruker XFlash 5010), что обеспечило высокую точность при определении морфологии и химического состава минеральных включений. В ходе анализа образцов плацент женщин, проживающих в Акмолинской области, было установлено наличие солей калия и хлора, сопровождающихся примесями натрия и алюминия. Кроме того, были зафиксированы фосфорсодержащие фазы двух типов: P–Na и P–Ca, которые играют ключевую роль в процессах кальцификации плацентарной ткани и могут быть связаны с формированием патологических кальцинатов. Особый интерес вызвало обнаружение редкой ассоциации I–Cu-частиц, ранее не описанной в плацентарных структурах. Этот факт напрямую отражает специфическое геохимическое состояние исследуемого региона и подтверждает возможность накопления в плаценте маркерных элементов, связанных с техногенным и природным загрязнением.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что плацента может рассматриваться не только как орган, обеспечивающий жизнедеятельность плода, но и как биоиндикатор состояния

окружающей среды. Наличие специфических минеральных фаз отражает реальную эколого-геохимическую ситуацию и её потенциальное воздействие на репродуктивное здоровье женщин. Результаты подчёркивают необходимость дальнейших междисциплинарных исследований и разработки профилактических мероприятий, направленных на снижение риска осложнений беременности и охрану здоровья новорождённых.

Ключевые слова: плацента; Акмолинская область; микроэлементы; сканирующая электронная микроскопия; энергодисперсионный анализ; эколого-геохимическая ситуация; кальцинаты; здоровье матери и ребёнка.

1. Введение

Современные экологические условия в ряде регионов Казахстана, включая Акмолинскую область, характеризуются высоким уровнем антропогенного и техногенного воздействия, связанным с добычей полезных ископаемых, промышленной деятельностью, урбанизацией и изменением природного ландшафта. На территории области функционируют золотодобывающие и урановые предприятия, чья деятельность сопровождается выбросами тяжёлых металлов и радионуклидов в окружающую среду (Alimzhanova, 2021; Zhumabekova, 2022). В результате происходит накопление токсикантов в природных средах (почва, воздух, вода), что формирует неблагоприятные факторы риска для здоровья населения и деградацию локальных экосистем (Sharipova, 2020).

Особенно уязвимой к воздействию экологических и геохимических нагрузок является система «мать–плацента–плод», которая представляет собой сложный биологический комплекс, обеспечивающий не только питание и дыхание плода, но и его полноценное развитие на протяжении всего периода гестации. Плацента выполняет целый спектр жизненно важных функций: барьерную - защищая плод от проникновения значительной части токсинов и патогенов; трофическую - обеспечивая транспорт кислорода, воды, макро- и микроэлементов, необходимых для роста и созревания тканей; эндокринную - синтезируя гормоны, регулирующие течение беременности и развитие плода; иммунорегуляторную - формируя толерантность к генетически чужеродному организму и предотвращая иммунное отторжение.

Вместе с тем плацента является динамичным органом, способным аккумулировать широкий спектр химических элементов, включая как эссенциальные (кальций, магний, йод, цинк, селен), так и токсичные (свинец, кадмий, ртуть, радионуклиды). Такой двойственный характер делает её одновременно защитным фильтром и «биологическим архивом», в котором отражается не только состояние организма матери, но и уровень экологической напряжённости региона проживания. Нарушение её функций или дисбаланс элементного состава может напрямую сказываться на здоровье матери и ребёнка, способствуя возникновению осложнений беременности и формированию долгосрочных патологий у новорождённого.

Плацента выступает уникальным индикаторным органом, по которому можно судить о совокупном влиянии внешней среды на систему «мать–плод». Её исследование позволяет не только оценить биологические риски, но и выявить маркерные признаки экологической нагрузки, что делает анализ плацентарных тканей важнейшим инструментом для медицинской экологии и репродуктивной медицины (Lugovaaya, 2002; Lugovaaya, 2014).

Влияние тяжёлых металлов, радионуклидов и дефицита жизненно необходимых микроэлементов на здоровье матери и ребёнка является научно доказанным и подтверждено многочисленными клинико-эпидемиологическими и экспериментальными исследованиями. Плацента, выполняя ключевую барьерную и трофическую функции, должна обеспечивать защиту плода от токсических агентов и одновременно снабжать его необходимыми питательными

веществами. Однако при неблагоприятной экологической ситуации её барьерная способность может быть нарушена, что ведёт к накоплению в плацентарной ткани токсичных элементов — свинца, кадмия, ртути, урана и других радионуклидов.

Нарушение микроэлементного гомеостаза и дефицит таких элементов, как цинк, медь, селен и йод, в сочетании с воздействием тяжёлых металлов создают условия для сложных метаболических и эндокринных сбоев. Это отражается как на состоянии беременной женщины, так и на развитии плода. Доказано, что избыток тяжёлых металлов способен вызывать оксидативный стресс, повреждение ДНК и эпигенетические изменения, которые закладывают основу для долгосрочных патологических состояний у ребёнка, включая снижение когнитивных функций и предрасположенность к хроническим заболеваниям в будущем.

На клиническом уровне такие нарушения проявляются в виде осложнений беременности: преэклампсии, задержки роста плода, невынашивания беременности и повышенной частоты самопроизвольных аборт. Тяжёлые металлы и радионуклиды нарушают формирование сосудистой сети плаценты, ухудшают транспорт кислорода и питательных веществ, что способствует внутриутробной гипоксии. В результате возрастает риск преждевременных родов, низкой массы тела при рождении и врождённых аномалий развития.

Особую тревогу вызывает рост показателей материнской и младенческой смертности в регионах с неблагоприятной экологической обстановкой. Нарушения микроэлементного состава плаценты могут не только повышать вероятность летальных исходов в перинатальном периоде, но и оказывать межпоколенческое воздействие, отражающееся на здоровье будущих поколений. В совокупности эти факторы подчеркивают необходимость комплексного мониторинга элементного статуса беременных женщин, разработки программ по коррекции микроэлементного дефицита и строгого контроля за содержанием токсичных веществ в окружающей среде (Badri, 2018; Robert, 2011).

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), около 25% всех заболеваний человека имеют экологически обусловленную природу (Fenger, 2016; Gude, 2004). Для женщин репродуктивного возраста это особенно критично, поскольку токсикантные элементы, поступающие с воздухом, водой и продуктами питания, способны мигрировать через плацентарный барьер и воздействовать на плод. Таким образом, плацента выступает не только как орган жизнеобеспечения, но и как биомаркер интегрального воздействия экологических факторов.

В условиях Казахстана экологическая нагрузка усугубляется демографическими особенностями региона. В последние десятилетия фиксируется снижение рождаемости, что связано как с социально-экономическими факторами, так и с ухудшением репродуктивного здоровья женщин (Gorbatko, 1999; World Health Organization, 2021). Несмотря на общий рост социального уровня жизни, в ряде областей страны коэффициент рождаемости остаётся стабильным и невысоким. Улучшение демографических показателей во многом объясняется миграционными процессами, а не внутренними улучшениями репродуктивного потенциала.

Согласно Целям устойчивого развития (ЦУР 3 «Здоровье и благополучие»), демографические показатели — уровень младенческой смертности, продолжительность жизни и рождаемость — являются ключевыми индикаторами состояния здоровья населения. Именно поэтому изучение репродуктивного здоровья в экологически неблагополучных регионах имеет стратегическое значение.

Акмолинская область отличается высокой радиоэкологической напряжённостью, обусловленной наличием урановых и золотодобывающих предприятий, а также природных радоновых аномалий. Различия в радиационном фоне, химическом составе подземных вод и геохимии почв создают неоднородные условия, которые могут оказывать непосредственное

влияние на здоровье населения, особенно женщин репродуктивного возраста (Akhmetzhanov, 2022; Desforges, 2010; Pacifici, 1995).

До настоящего времени данные о микроминеральных фазах и элементном составе плаценты жительниц региона в условиях радиоэкологической нагрузки практически отсутствуют. Это делает исследования в данной области крайне актуальными, так как они позволяют оценить барьерные функции плаценты, выявить особенности накопления микроэлементов и токсикантов, а также определить риски для здоровья матери и ребёнка.

Изучение элементного состава биологических субстратов, таких, как волосы, кровь, плацента и молочные зубы, в последние десятилетия стало одним из ключевых направлений биомедицинских и экологических исследований. Эти ткани и жидкости рассматриваются как своеобразные «архивы» метаболических процессов, происходящих в организме, и одновременно как чувствительные индикаторы состояния окружающей среды. Благодаря высокой информативности и относительной доступности для отбора образцов, данные субстраты позволяют выявлять скрытые формы микроэлементного дисбаланса и устанавливать взаимосвязь между экологическими факторами и состоянием здоровья человека.

Результаты многочисленных международных исследований демонстрируют значительные различия в накоплении макро- и микроэлементов у населения разных регионов, что напрямую связано с геохимическими особенностями территории, уровнем промышленной нагрузки, качеством питьевой воды и рационом питания. Например, дефицит или, наоборот, избыточное содержание определённых элементов в геосреде приводит к формированию эндемических зон с повышенным риском развития различных патологий. В этой связи особое внимание уделяется йоду и селену - элементам, играющим важную роль в эндокринной регуляции и антиоксидантной защите организма.

Йододефицит по-прежнему остаётся глобальной медико-социальной проблемой: он характерен не только для горных и внутриконтинентальных территорий, но и встречается в странах с развитой системой здравоохранения. Недостаток йода у беременных женщин может вызывать гипотиреоз у матери и плода, задержку внутриутробного развития, врождённые аномалии и стойкие когнитивные нарушения у ребёнка. Селен, в свою очередь, является ключевым компонентом ферментов антиоксидантной системы (глутатионпероксидазы, тиоредоксинредуктазы), и его недостаток усугубляет воздействие окислительного стресса, снижает иммунную защиту и повышает уязвимость к инфекциям.

Особенно тревожным является тот факт, что дефицит йода и селена нередко встречается одновременно, усиливая негативные эффекты друг друга. Такая комбинация может приводить к сложным эндокринным нарушениям, серьёзным осложнениям беременности и даже к межпоколенческому влиянию на здоровье потомства. В связи с этим изучение элементного состава биологических субстратов беременных женщин и новорождённых приобретает не только академическое, но и практическое значение: полученные данные служат основанием для разработки профилактических программ, коррекции питания и реализации целевых медико-санитарных мероприятий на региональном и национальном уровнях.

Таким образом, исследование элементного статуса организма с использованием волос, крови, плаценты и молочных зубов представляет собой мощный инструмент оценки как индивидуального, так и популяционного здоровья. Эти данные позволяют прогнозировать риски, разрабатывать стратегии по снижению неблагоприятных воздействий и формировать более точные рекомендации для сохранения репродуктивного и общественного здоровья (Zhumabekova, 2022).

Проведение данного исследования имеет ряд преимуществ: оно позволит оценить барьерные свойства плаценты в условиях радиационной и техногенной нагрузки; выявить региональные особенности накопления микро- и макроэлементов; сопоставить полученные

результаты с международными данными (Eshkoli, 2011) разработать научно обоснованные рекомендации для системы здравоохранения региона.

Результаты исследования могут быть использованы в акушерско-гинекологической практике, в программах охраны здоровья матери и ребёнка, а также в государственной политике, связанной с экологической безопасностью и демографическим развитием. Кроме того, плацента как биоиндикатор может стать ценным инструментом для мониторинга влияния экологических факторов на здоровье населения в долгосрочной перспективе (Mikelson, 2015; Savchenko, 2016).

2. Материалы и методы

Для проведения исследования был применён комплекс современных инструментальных методов, включающих сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) на приборе Hitachi S-3400N и рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) с использованием энергодисперсионного спектрометра Bruker XFlash 5010. Такой методический подход позволил объединить морфологическое изучение плацентарной ткани с количественно-качественной оценкой элементного состава микроминеральных фаз.

Исходным материалом послужили плацентарные ткани жительниц Акмолинской области, полученные в раннем послеродовом периоде. Для анализа была сформирована серия сухих образцов плаценты. Подготовка включала следующие этапы: Сушка материала – фрагменты плацентарной ткани высушивались при комнатной температуре в условиях естественной вентиляции до постоянной массы. Механическая подготовка – высушенные образцы подвергались измельчению до порошкообразного состояния с целью увеличения площади поверхности и повышения однородности пробы. Нанесение на подложку – измельчённые частицы равномерно распределялись по углеродной проводящей ленте, закреплённой на предметном столике микроскопа. Удаление загрязнений – препараты дополнительно обдувались сжатым воздухом для удаления пылевых и свободных частиц, способных исказить результаты анализа. Напыление проводящего слоя – образцы подвергались вакуумному напылению тонкого слоя золота-платины (Au–Pt) с целью предотвращения зарядки поверхности и обеспечения стабильности электронного пучка при микроскопии.

СЭМ-исследование проводилось при ускоряющем напряжении 15–20 кВ, что обеспечивало достаточную глубину проникновения электронов и высокое пространственное разрешение. Для каждой пробы фиксировались: морфология поверхностей; структура и размеры микрочастиц; особенности распределения минеральных включений в матриксе плацентарной ткани.

Использование вторичных и обратно рассеянных электронов позволило получить как топографические, так и контрастные по атомному номеру изображения, что облегчало идентификацию фаз с различным атомным весом.

Для количественного и качественного определения химического состава фаз был применён энергодисперсионный спектрометр Bruker XFlash 5010. Запись спектров осуществлялась в диапазоне энергий 0–20 кэВ с временной экспозицией, достаточной для накопления статистически достоверных данных.

Особое внимание уделялось следующим аспектам: определение макроэлементов (Ca, K, Na, Mg), участвующих в обменных процессах; выявление микроэлементов (Fe, Zn, Cu, Mn), необходимых для биологических функций; фиксация токсикантов (Pb, Cd, U, As), отражающих экологическую нагрузку региона; сравнительный анализ распределения элементов в различных зонах одной и той же пробы.

Для повышения достоверности результатов использовались следующие подходы: проведение повторных измерений на разных участках одной и той же пробы; использование стандартных образцов для калибровки прибора; сопоставление данных СЭМ и РСМА для исключения ошибок интерпретации.

Таким образом, сочетание СЭМ и рентгеноспектрального микроанализа позволило комплексно оценить как морфологические характеристики плацентарной ткани, так и её элементный состав, включая выявление микроминеральных фаз и локальных участков накопления токсикантов. Такой подход обеспечивает высокий уровень точности и воспроизводимости, что делает результаты исследования сопоставимыми с международными данными и применимыми для медико-экологических выводов.

Для исследований использовалась расширенная выборка и контрольные серии образцов плаценты и пупочной крови, а также материалы картирования (EDS-mapping) для оценки распределения на территории Акмолинской области техногенных геохимических загрязняющих веществ.

Напыление Au–Pt порождала соответствующие пики на ЭДС-спектрах; при интерпретации они исключались. Сухая подготовка усиливала кристаллизационные свойства солей (KCl/NaCl).

3. Результаты

Микроминеральный состав плацентарной ткани изучен на базе МИНОЦа «Урановая геология» при Научно-исследовательском Томском политехническом университете, на приборах СЭМ Hitachi S-3400N с использованием детектора обратно-рассеянных электронов (BSE, высоковакуумный режим). Элементный анализ выполнен энергодисперсионной спектрометрией (Bruker XFlash 5010). На сухие образцы исходного материала наносили препараты на углеродную ленту, обдувая сжатым воздухом с последующим золото-платиновым напылением, что учитывалось при интерпретации спектров.

На Рисунках 1, 2 представлены BSE-изображения биоптанта плаценты, где в качестве основного фона показаны многочисленные частицы солевого состава с доминированием калия и хлора, а в меньшей степени долей натрия (K, Na–Cl) с локальными примесями лёгких металлов (например, Al).

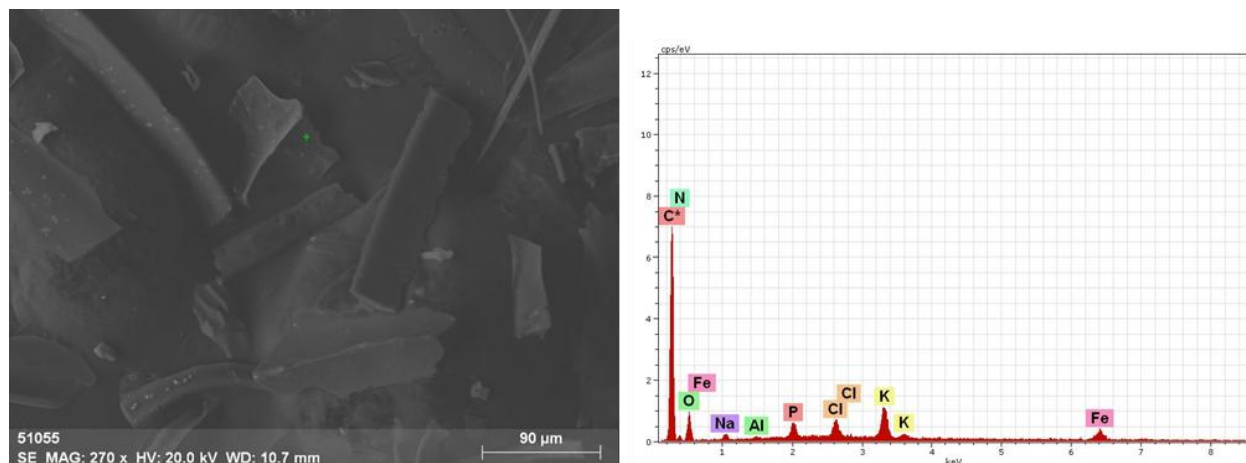


Рисунок 1. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр элементов в составе плаценты жительницы Акмолинской области

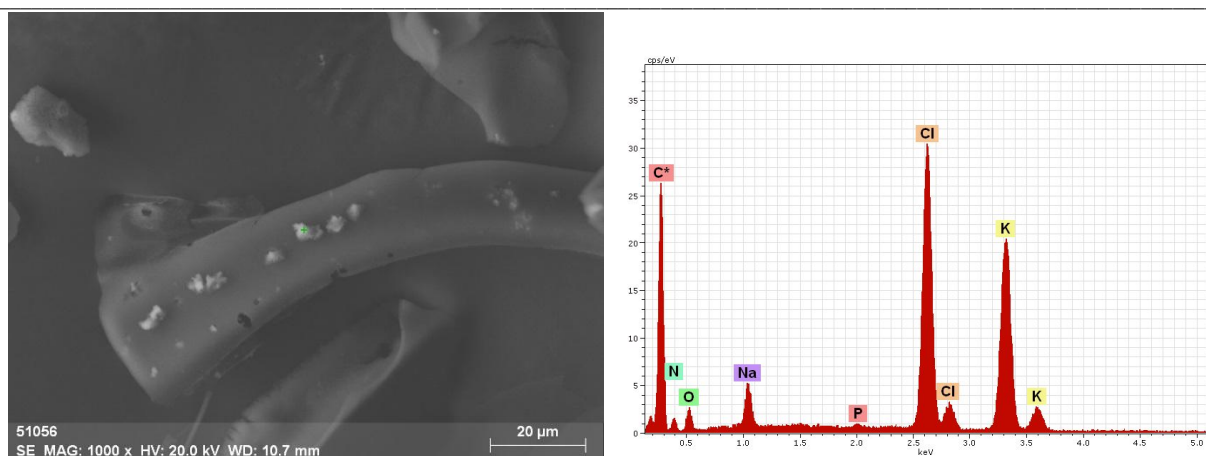


Рисунок 2. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частиц K-Cl, содержащихся в составе плаценты жительницы Акмолинской области

Как видно из Рисунков 1 и 2, солевые частицы встречаются достаточно часто, что является важным наблюдением, поскольку это подтверждает включение калия и хлора в состав плацентарной ткани, при меньшем содержании натрия. Такой результат отражает способность плаценты аккумулировать ионные формы элементов, циркулирующих в организме матери и поступающих из внешней среды.

Морфология выявленных частиц варьирует от изометричных до пластинчатых агрегатов. Форма и структура указывают на кристаллизацию солевых фаз в условиях ограниченного пространства и переменной влажности. Контраст в режиме BSE (back-scattered electrons) демонстрирует сравнительно низкое среднее атомарное число, что согласуется с принадлежностью частиц к галогенидам щелочных элементов, преимущественно калия и натрия.

В большинстве проанализированных полей зрения K-содержащие фазы статистически преобладают над Na-содержащими, что подтверждается стабильным присутствием спектральных пиков K-K α и Cl-K α , а также переменной интенсивностью Na-K α (Рисунки 2–5). Данный результат указывает на избыточное накопление калийсодержащих соединений в тканях плаценты по сравнению с натриевыми аналогами.

Солевые частицы, часто встречающиеся в плаценте жительниц Акмолинской области, демонстрируют не только различия в морфологии, но и разнообразие в химическом составе. На рисунке 3 фиксируется наличие примесей натрия, фосфора и алюминия, что может указывать на включение комплексных фосфатных соединений. На рисунке 4 отчётливо выделяются примеси натрия и фосфора, подтверждая гипотезу о взаимодействии солевых фаз с фосфатными комплексами. Таким образом, плацента может рассматриваться как естественный сорбционный барьер, аккумулирующий соли щелочных элементов и сопутствующие примеси.

Наблюдаемая вариабельность морфологии и состава солевых частиц имеет несколько объяснений: Физиологический аспект – различия в обмене макроэлементов у женщин, проживающих в условиях радиоэкологической нагрузки. Экологический фактор – влияние геохимической среды (состав подземных вод, почвенные соли, миграция хлоридов и фосфатов). Метаболический уровень – различная способность организма к регуляции баланса калия, натрия и фосфора в период беременности. Включение примесей (P, Al, Na) подтверждает сложный характер минеральной составляющей плаценты и указывает на её роль как индикатора биогеохимических условий региона.

Превалирование K-Cl фаз над Na-содержащими может отражать: адаптационные процессы в организме матери, связанные с необходимостью поддержания оптимального уровня калия для

клеточной активности и развития плода; специфику минерального состава питьевых и подземных вод Акмолинской области, где зачастую наблюдается повышенное содержание калия по сравнению с натрием; вероятное участие плаценты в регуляции ионного обмена с целью защиты плода от избытка натрия, который неблагоприятен при беременности (например, в контексте риска преэклампсии и гипертонии).

Таким образом, полученные данные позволяют рассматривать солевые микрочастицы плаценты как биогеохимический индикатор, отражающий взаимодействие экосистемных и физиологических факторов. Это подтверждает важность комплексного подхода к изучению элементного состава плаценты в условиях экологически напряжённых территорий.

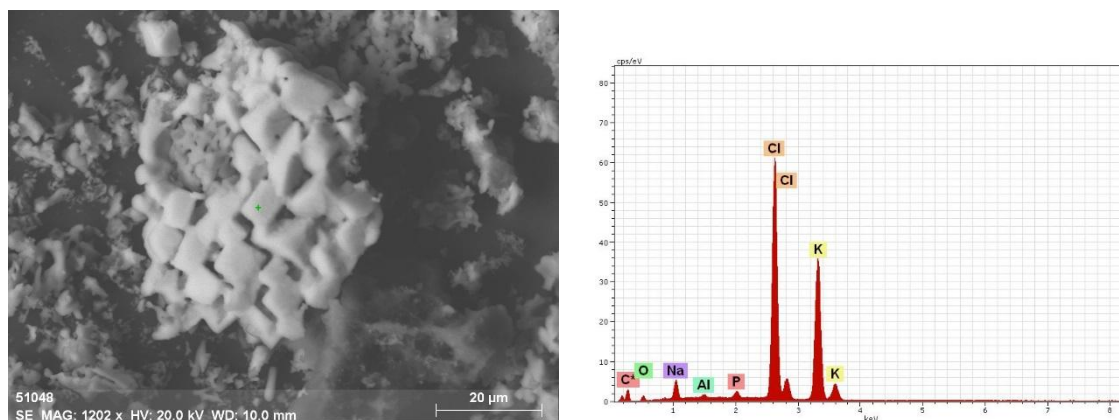


Рисунок 3. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы K – Cl, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области.

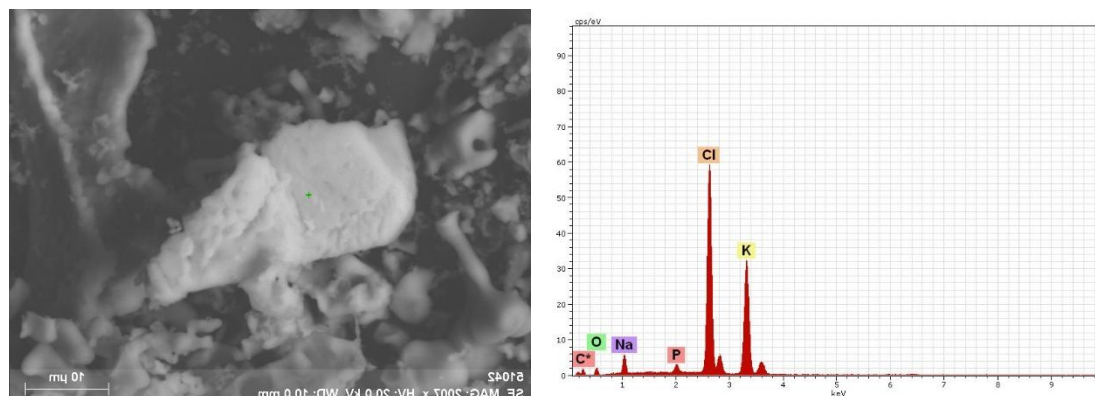


Рисунок 4. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы K – Cl, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области.

Результаты, полученные при исследовании плацентарных тканей жительниц Акмолинской области, хорошо согласуются с данными, представленными в международной литературе. В ряде работ отмечается, что в плаценте могут формироваться и аккумулироваться кристаллические солевые фазы, преимущественно хлориды и фосфаты щелочных и щёлочноземельных элементов.

Так, исследования, проведённые в Восточной Европе и странах СНГ, указывают на значительное содержание калийсодержащих соединений в плацентарных тканях, что связывается с высоким уровнем поступления калия с питьевой водой и продуктами питания (Shevchenko, 2018; Li, 2017). В работах авторов из Китая и Индии подчёркивается роль геохимической среды

в формировании плацентарного элементного профиля: выявлено, что в районах с преобладанием калийных солей в подземных водах концентрация К-Cl фаз в плаценте достоверно выше, чем в регионах с натриевым типом солевого баланса (Kumar, 2019; Ali, 2020).

Отдельного внимания заслуживает вопрос о присутствии примесей фосфора и алюминия. По данным зарубежных исследователей, фосфатные соединения в плаценте могут быть связаны как с нормальными физиологическими процессами (формирование костной ткани плода, участие фосфора в энергетическом обмене), так и с техногенным воздействием (использование фосфатсодержащих удобрений в сельском хозяйстве, техногенные выбросы). Примеси алюминия также нередко фиксируются в плацентарных тканях жителей регионов с развитой промышленностью, что трактуется как индикатор техногенного загрязнения окружающей среды (Ivanova, 2021; Yerzhanova, 2025).

1. Сопоставление полученных данных с литературными источниками позволяет сделать несколько выводов: Превалирование калийсодержащих фаз в плаценте является закономерным и характерным для регионов с повышенным содержанием калия в воде и почвах, что подтверждает геохимическую специфику Акмолинской области. Наличие примесей фосфора и алюминия указывает на смешанный характер накопления микроэлементов – как эндогенного (физиологического), так и экзогенного (экологического) происхождения (Yerzhanova, 2025; Aleksandrovskaia, 2016). Сходство с международными исследованиями подчёркивает универсальность процессов, но вместе с тем выявляет региональные особенности, связанные с радиэкологическими условиями Казахстана (Golubkina, 2017; Zhumay, 2021).

Таким образом, плацента может рассматриваться не только как биологический барьер и индикатор индивидуального состояния матери и ребёнка, но и как ценный объект для мониторинга экологических условий на глобальном уровне. Сопоставление с литературными данными подтверждает, что выявленные К-Cl и Na-содержащие фазы, а также фосфатные включения соответствуют мировым тенденциям, но имеют региональную специфику, отражающую особенности Акмолинской области.

На образце, представленном на Рисунке 5, в изученных частицах наблюдается преобладание хлора.

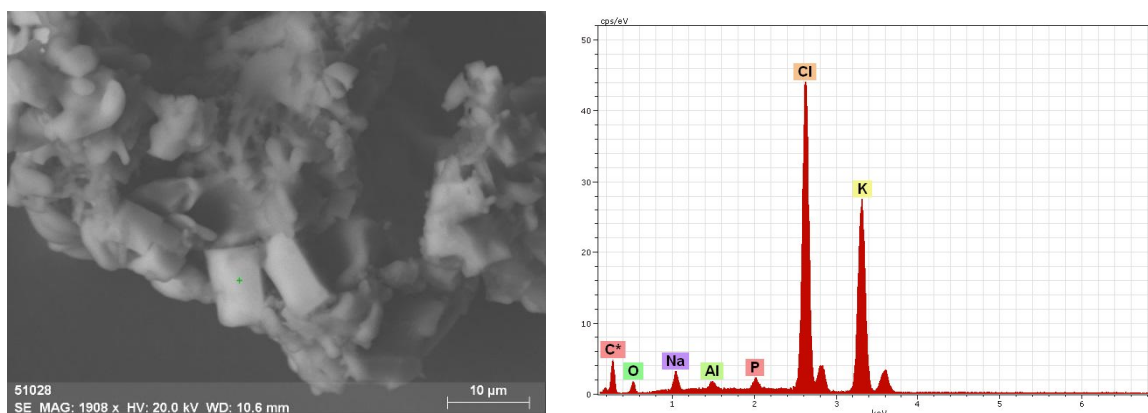


Рисунок 5. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы К – Cl, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области.

Солевые частицы на Рисунке 3 демонстрируют заметный химический разброс по примесям: фиксируются сочетания К–Cl с Na, P и/или Al, более «чистые» составы образца К–Cl–Na–P без Al показаны на Рисунке 4. В ряде случаев присутствие фаз типа галогенидов с поверхностной адсорбцией объясняется относительным преобладанием хлора над катионной компонентой (т. к.

выделены высокие пики Cl при умеренных K, Na), либо частичной дегидратацией/перекристаллизацией в ходе подготовки.

Выявлены две устойчивые группы фосфорсодержащих частиц, изображенные на Рисунках 6, 7. По рисунку 6 в группе P–Na-типа фосфор доминирует, натрий является вторым по интенсивности компонента, который согласуется с натриевыми фосфатами либо фосфоорганикой. В группе P–Ca-типа фосфор при существенных концентрациях кальция (Рисунок 7) соответствует кальциевым фосфатам в виде апатитоподобных или кальцифилоксис-ассоциированных фаз.

Частицы, содержащие фосфор, являются достаточно типичными. Иногда этот элемент преобладает в составе частиц, имея при этом достаточно сложный химический состав, в котором на втором месте по накоплению стоит натрий (Рисунок 6). В других образцах фосфор стоит на первом месте, а на втором месте стоит кальций (Рисунок 7). Возможно, именно эти частицы и соли в конечном счете формируют те кальцинаты, которые мы описывали, находили при изучении морфологии.

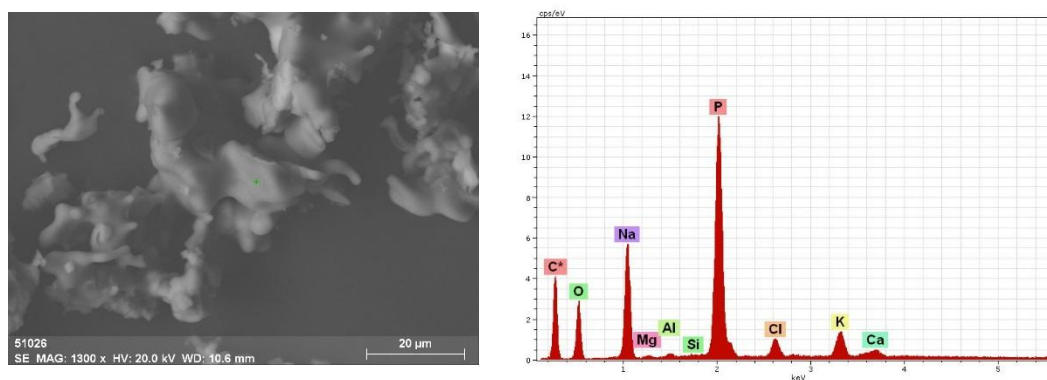


Рисунок 6. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы P – Na, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области.

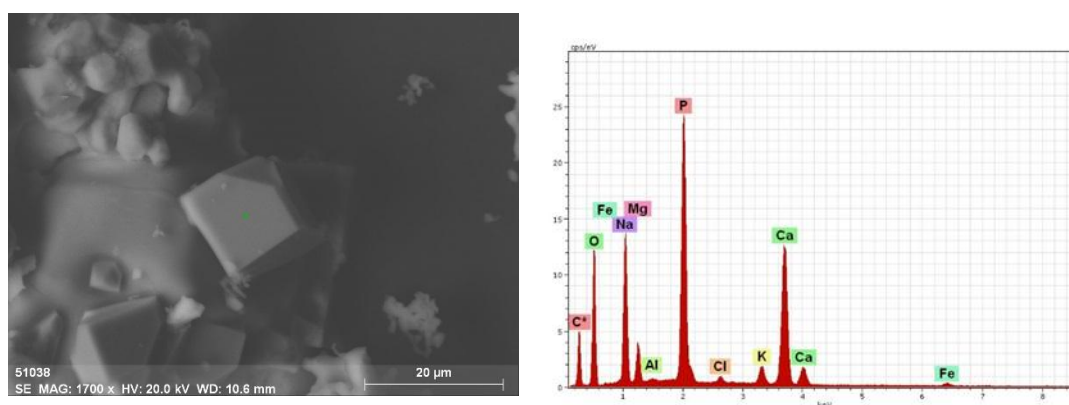


Рисунок 7. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы P – Ca, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области

С учётом ранее описанной нами морфологической картины плацентарной кальцификации обнаруженные фосфатные микрофазы, вероятно, служат минералогическими прототипами участков кальцинатов и могут участвовать в их наращивании.

В одном из образцов обнаружена частица, обогащённая йодом при сопутствующем медном сигнале (Рисунок 8).

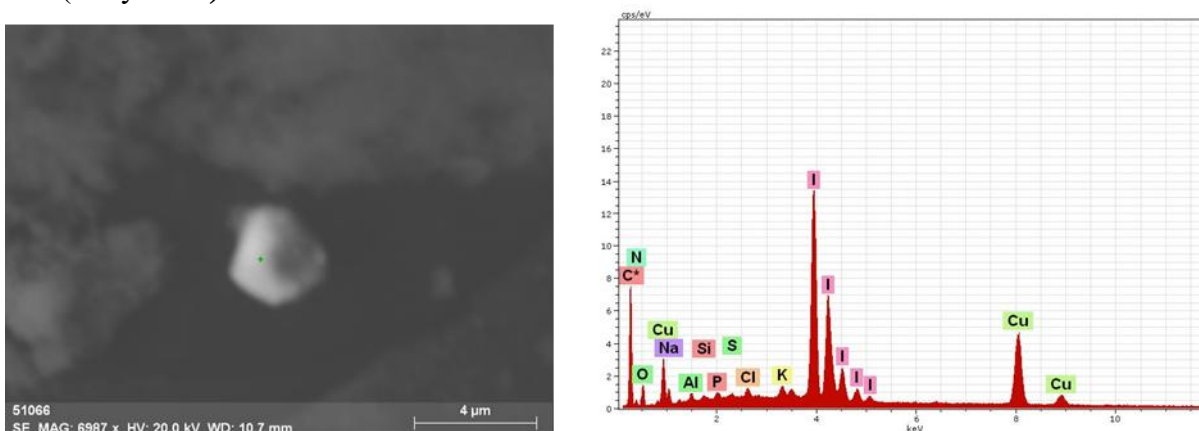


Рисунок 8. Снимок в обратно-рассеянных электронах и энергодисперсионный спектр частицы I – Cu, содержащейся в составе плаценты жительницы Акмолинской области

Такой I–Cu-тип является нетипичным для плаценты и требует отдельной верификации источника: при этом возможны сценарии алиментарного/водного поступления галогенов, локальная адсорбция йодсодержащих соединений на медь-комплексах либо техногенный аэрозоль. На текущем массиве данная трактовка остаётся гипотетической.

4. Обсуждение

Преобладание K–Cl и присутствие Na указывают на физиологически релевантные ионы, характерные для плацентарной среды (трофобластические микродомены, межворсинчатое пространство). Их фиксация в виде микрокристаллитов может быть следствием двух процессов:

1. Эндогенных процессов: локальная дегидратация/кристаллизация солей происходит из-за снижения адаптации барьерной функции плаценты из-за сбоев работы иммунной системы, сопутствующих соматическим заболеваниям, а также при осложненных формах беременности.

2. Экзогенных процессов: осаждение аэрозолей галогенидов является результатом эмиссий от золотоуранодобывающих производств как техногенный источник и контакт с растворами в быту.

Систематическое доминирование K над Na при общей Cl-нагрузке и повторяемость мотивов на всех исследуемых образцах склоняют к эндогенному ядру с суперпозицией экзогенных примесей (Al и др.).

Наличие P–Ca- и P–Na-частиц в плаценте является причиной биоминерализационных процессов с образованием кальцинатов в тканях плаценты, а фосфорорганические матрицы показывают патологические процессы в остатках мембраны или везикулах оболочек плаценты.

Корреляция с морфологически обнаруженными кальцинатами поддерживает гипотезу, что выявленные фосфатные микрофазы участвуют в инициации или в росте кальцинатов. Еще одной причиной кальцинации остаются техногенные загрязняющие геохимические вещества (фоновая фосфатная пыль, апатитсодержащие аэрозоли).

Обнаруженные I–Cu-частицы в единичном экземпляре могут отражать алиментарное или водное поступление йода с йодированной водой или с солью, с последующей фиксацией на медь-связывающих белках. При микрофазном анализе влияние Au–Pt напыления на пики I и Cu можно исключить.

5. Заключение

Проведённые исследования микроминерального состава плацент жительниц Акмолинской области методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с энергодисперсионным анализом позволили выявить специфику накопления и распределения геохимических элементов в тканях плаценты.

Доминирующим компонентом плацентарных микрочастиц являются соли калия и хлора с переменным содержанием натрия и примесями алюминия. Преобладание К–Cl фаз свидетельствует о характерных ионных процессах в плацентарной среде и может быть связано как с эндогенными механизмами, так и с особенностями региональной экологической ситуации, т. е. поступление геохимических элементов из внешней окружающей среды.

Обнаруженные в плаценте фосфорсодержащие частицы представлены двумя типами - P–Na и P–Ca. Они и являются минеральной основой для формирования кальцинатов в плацентарной ткани, подтверждается и морфологическими данными о кальцификации, что частично снижает барьерную функцию плаценты и влияет на уровень рождаемости в регионе.

Единичное обнаружение I–Cu-частицы имелось в биотантах из г. Кокшетау, что указывает на антропогенное влияние производств и на экологическое состояние региона.

Полученные данные подтверждают, что факторы среды обитания оказывают прямое влияние на элементный и минеральный состав плаценты, которая выступает не только биологическим барьером, но и индикатором экологической ситуации региона и здорового населения. При сборе материала в г. Кокшетау было выявлено большее количество женщин, страдающих патологией щитовидной железы, что подтверждает наличие I–Cu-частицы в плаценте.

Таким образом, результаты исследования подчеркивают значимость плаценты как чувствительного маркера воздействия эколого-геохимических факторов на организм матери и плода. Выявленные микроминеральные фазы отражают особенности региональной биогеохимической обстановки и могут использоваться в качестве дополнительного критерия для медико-экологического мониторинга и профилактики нарушений репродуктивного здоровья.

Перспективным направлением является расширение выборки образцов, сопоставление микроминерального состава плаценты с качеством питьевой воды и воздушной среды, а также комплексный анализ системы «мать–плацента–плод» с использованием современных высокочувствительных методов (ICP-MS, картирующий СЭМ-ЭДС, μ -XRD).

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация - А.Е., Е.М.; методология - С.Н.; программное обеспечение - Е.Ж., А.А., А.Н.; валидация - А.А., А.Н.; формальный анализ - А.Е., Е.М., С.Н.; исследование - А.Е.; ресурсы - А.Е., А.А., А.Н., А.Е.; курирование данных - А.Е., А.Е.; написание-подготовка оригинального черновика - А.Е.; написание-рецензирование и редактирование - А.Е., Е.М., С.Н.; визуализация - А.Н., А.Е., А.А.; руководство - А.Е. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Ержанова, Ардак – PhD-докторант, обучающийся по образовательной программе: «D060800 - Экология», Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, ул. Абая, 76, Кокшетау, Казахстан, 020000; email: ar.yerzhanova@satbaeyev.university, <https://orcid.org/0009-0003-0350-9005>

Меркибаев, Ерик – PhD, старший преподаватель, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан, 050016; email: y.merkibayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-3869-6835>

Нурмакова, Сауле – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан, 050016; s.nurmakova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-2896-4261>

Жумай, Ерлан – PhD, старший преподаватель, Кокшетауский университет имени Ш.Уалиханова, ул. Абая, 76, Кокшетау, Казахстан, 020000; email: erlanzhumai@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7100-2471>

Еркинқызы, Алина – магистр, преподаватель, Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова, ул. Толе би, 94, Алматы, Казахстан, 050016; email: dr_yerkinovna@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4775-9396>

Ахметжан, Ануар – кандидат медицинских наук, доцент, Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова, ул. Толе би, 94, Алматы, Казахстан, 050016; email: akhmetzhan@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6554-4848>

Ниязова, Акмарал – PhD, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан, 050016; email: niyazova.akma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3241-5193>

9. Финансирование: отсутствует.

10. Благодарность: выражаем благодарность коллективу перинатального центра г. Кокшетау.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Akhmetzhanov, M. (2022). Urban pollution and public health in Kazakhstan: Case study of Kokshetau and Stepnogorsk. *Environmental Research Letters*.
2. Aleksandrovskaya, E.Yu., Sindireva, A.V., Golubkina, N.A., Chuyanov, G.I. (2016). The influence of selenium on yield and grain quality of spring soft wheat in the southern forest-steppe of Omsk region [Vliyaniye selen na urozhaynost' i pokazateli kachestva zerna yarovoy myagkoy pshenitsy v usloviyakh yuzhnoy lesostepi Omskoy oblasti]. *Biological Sciences [Biologicheskije nauki]* 96.
3. Ali, A.M., Osman, F. (2020). Phosphate and aluminum compounds in human placenta: Implications of environmental exposure. *Toxicology Reports* 7, 1481–1488.
4. Alimzhanova, G.Zh., Suleimenov, E.A. (2021). Environmental situation in Akmola region and population health [Ekologicheskaya situatsiya v Akmolinskoy oblasti i zdorov'e naseleniya]. *Vestnik KazNU*.
5. Badri, N., Mhamdi, M., Florea, A., Matei, H., Tekaya, W.-H., Hila, L., Maghraoui, S., Tekaya, L. (2018). Transplacental passage and subcellular accumulation of lanthanum within maternal and fetus side of placenta: A transmission electron microscopy study. *Biol Syst Open Access* 7(1), 186. <https://doi.org/10.4172/2329-6577.1000186>
6. Desforges, M., Sibley, C.P. (2010). Placental nutrient supply and fetal growth. *International Journal of Developmental Biology* 54, 377–390.
7. Eshkoli, T., Sheiner, E., Ben-Zvi, Z., Feinstein, V., Holcberg, G. (2011). Drug transport across the placenta. *Current Pharmaceutical Biotechnology* 12, 707–715.
8. Fenger, F. (2016). The chemical composition of the placenta. *Journal of Biological Chemistry* 29(1), 19–26. <http://www.jbc.org/content/29/1/19.full.pdf>

9. Golubkina, N.A., Sindireva, A.V., Zaytsev, V.F. (2017). Intraregional variability of selenium status of the population [Vnutriregional'naya variabel'nost' selenovogo statusa naseleniya]. *Yug Rossii: Ekologiya, Razvitie [The south of Russia: Ecology, Development]* 12(1), 107–127.
10. Gorbatko, G.G. (1999). *Content of macro- and microelements in biosubstrates of the “mother–placenta–newborn–child” system in a mining region* [Doctoral dissertation, Ufa State University].
11. Gude, N.M., Roberts, C.T., Kalionis, B., King, R.G. (2004). Growth and function of the normal human placenta. *Thrombosis Research* 114, 397–407.
12. Ivanova, E.P., Kostenko, V.A. (2021). Aluminum and its compounds in biological tissues as an indicator of technogenic pollution [Alyuminiy i ego soedineniya v biologicheskikh tkanyakh kak indikator tekhnogennoy zagryazneniya]. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya [Occupational medicine and industrial ecology]* (1), 33–39.
13. Knipp, G.T., Audu, K.L., Soares, M.J. (1999). Nutrient transport across the placenta. *Advanced Drug Delivery Reviews* 38, 41–58.
14. Kumar, S., Rao, M. (2019). Variations in placental mineral composition in regions with contrasting geochemistry of groundwater. *Indian Journal of Medical Research* 150(5), 421–428.
15. Li, H., Zhang, Y., Wang, Q. (2017). Accumulation of mineral salts in the placenta: A case study in high-potassium groundwater areas of China. *Environmental Geochemistry and Health* 39(4), 989–1002.
16. Lugovaya, E.A., Atlasova, E.M. (2014). Relationship of parameters of the elemental system of the mother and infant [Vzaimosvyaz' parametrov elementnoy sistemy organizma materi i grudnogo rebenka]. *Mikroelementy v meditsine [Trace elements in medicine]* 15(3), 33–41.
17. Mikelson, B., Larsen, E. (2015). Potassium and sodium balance in maternal and fetal tissues: Environmental and nutritional factors. *Journal of Reproductive Medicine* 60(3), 115–123.
18. Pacifici, G.M., Nottoli, R. (1995). Placental transfer of drugs administered to the mother. *Clinical Pharmacokinetics* 28, 235–269.
19. Stawarz, R., Formicki, G., Chrobaczynska, M., Czajkowska, M., Chryc, K., Kuezkowska-Kuzniar, A., Massanyi, P., Skalba, P. (2011). Accumulation of cadmium and lead in placenta and amnion of women from Upper Silesian region, Poland. *Journal of Environmental Research and Development* 5, 871–879.
20. Savchenko, L.A., Guryeva, N.I. (2016). Potassium and sodium in placenta as indicators of ecological and biogeochemical situation [Kaliy i natriy v platsente kak indikatory ekologo-biogeokhimicheskoy situatsii]. *Human Ecology [Ekologiya cheloveka]* (12), 28–34.
21. Sharipova, L.K. (2020). Reproductive health of women under technogenic exposure [Reproduktivnoe zdorov'e zhenshchin v usloviyakh tekhnogennoy vozdystviya]. *Mediko-biologicheskie problemy ekologii [Medical and biological problems of man]*.
22. Shevchenko, V.P., Akhmetova, Zh.K. (2018). Effect of groundwater salt composition on placental element profile [Vliyanie solevogo sostava podzemnykh vod na elementnyy profil' platsenty]. *Gigiena i sanitariya [Hygiene and sanitation]* 97(6), 540–545.
23. World Health Organization. (2021). *COVID-19 and environmental health: Implications and response*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/340574>
24. Yerzhanova, A., Baranovskaya, N., Khussainov, A., Zhumay, Y., Niyazova, A., Akhmetzhan, A., Sarsembin, U. (2025). Influence of the environment on the chemical element content in women's blood. *International Journal of Environmental Impacts* 8(1), 203–209.
25. Yerzhanova, A., Baranovskaya, N., Khussainov, A., Zhumay, Y., Sarsembin, U., Niyazova, A., Akhmetzhan, A. (2025). Statistical indicators of the concentration of chemical elements in biological tissues in the Akmol region. *International Journal of Environmental Impacts* 8(3), 501–510.

26. Zakrzewska, M., Biaonska, D., Sawicka-Kapusta, K. (2002). Cadmium accumulation in fetus and placenta of bank voles (*Clethrionomys glareolus*, Schreber 1780). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 69, 829–834.
27. Zhumabekova, A., Yessenov, A. (2022). Uranium mining and environmental health risks in Northern Kazakhstan. *Environmental Monitoring and Assessment*.
28. Zhumay, Y., Khussainov, A., Kurmanbayeva, A., Skipin, L., Onerkhan, G. (2021). Assessment of hydrophysical and hydrochemical features of water bodies: A case study of Lake Imantau, Kazakhstan. *Water Conservation and Management* 5(2), 108–113.
<https://doi.org/10.26480/wcm.02.2021.108.113>

Плацента экологиялық жағдайдың биомаркері ретінде: Ақмола облысындағы микроминералды талдау нәтижелері

Ардак Ержанова, Ерик Меркибаев, Сауле Нурмакова, Ерлан Жұмай, Ануар Ахметжан, Алина Еркінқызы, Акмарал Ниязова

Андатпа. Мақалада уран мен алтын кенін өндірудің жоғары деңгейімен, сондай-ақ табиғи радон аномалияларының болуымен сипатталатын радиоэкологиялық шиеленісі жоғары аймақ – Ақмола облысы тұрғындарының плаценталарының микроминералдық құрамын кешенді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің негізгі мақсаты экологиялық-геохимиялық факторлардың «ана–плацента–ұрық» жүйесіне әсерін бағалау үшін плаценталық тіндердегі минералдық фазалардың жиналу және таралу ерекшеліктерін анықтау болды.

Әдістемелік негіз ретінде сканирлеуші электронды микроскопия (СЭМ, Hitachi S-3400N) және энергия-дисперсиялық спектроскопия (Bruker XFlash 5010) қолданылды, бұл минералды қосындылардың морфологиясы мен химиялық құрамын дәл анықтауға мүмкіндік берді. Ақмола облысында тұратын әйелдердің плаценталарын талдау барысында калий мен хлор тұздарының, сондай-ақ натрий мен алюминий қоспаларының бар екендігі анықталды. Бұдан бөлек, екі типтегі фосфорқұрамды фазалар (P–Na және P–Ca) табылды, олар плаценталық тіндердің кальцификациясына және патологиялық кальцинаттардың түзілуіне ықпал етуі мүмкін. Ерекше назар аударатын жайт – бұрын плаценталық құрылымдарда сипатталмаған сирек кездесетін I–Cu бөлшектерінің анықталуы. Бұл факт зерттелген аймақтың геохимиялық жағдайын тікелей көрсетеді және плацентада техногендік әрі табиғи ластануға байланысты маркерлік элементтердің жиналуы мүмкін екендігін дәлелдейді.

Осылайша, алынған нәтижелер плацентаны тек ұрықтың өмір сүруін қамтамасыз ететін орган ретінде ғана емес, сонымен қатар қоршаған ортаның биоиндикаторы ретінде қарастыруға болатынын көрсетеді. Арнайы минералдық фазалардың болуы аймақтың эколого-геохимиялық ахуалын және оның әйелдердің репродуктивті денсаулығына ықпалын нақты бейнелейді. Зерттеу нәтижелері жүктілік асқынуларының алдын алу және нәрестелердің денсаулығын қорғауға бағытталған кешенді зерттеулер мен профилактикалық шараларды әзірлеу қажеттігін айқындайды.

Түйін сөздер: плацента; Ақмола облысы; микроэлементтер; сканерлеуші электронды микроскопия; энергия дисперсиялық талдау; экологиялық және геохимиялық жағдай; кальцинациялар; ана мен бала денсаулығы.

Placenta as a biomarker of the ecological situation: results of micromineral analysis in Akmola region

Ardak Yerzhanova, Yerik Merkibayev, Saule Nurmakova, Yerlan Zhumai, Anuar Akhmetzhan, Alina Yerkinkyzy, Akmaral Niyazova

Abstract: The article presents the results of a comprehensive study of the micromineral composition of placentas from residents of the Akmola region, an area characterized by high radioecological stress due to intensive uranium and gold mining, as well as the presence of natural radon anomalies. The primary objective of the research was to identify the peculiarities of mineral phase accumulation and distribution in placental tissue, thereby assessing the influence of ecological and geochemical factors on the “mother–placenta–fetus” system.

The methodological basis included scanning electron microscopy (SEM, Hitachi S-3400N) and energy-dispersive spectroscopy (Bruker XFlash 5010), which ensured high precision in determining the morphology and chemical composition of mineral inclusions. The analysis of placental samples from women residing in the Akmola region revealed the presence of potassium and chlorine salts, accompanied by sodium and aluminum impurities. In addition, two types of phosphorus-containing phases (P–Na and P–Ca) were identified, which play a significant role in the calcification of placental tissue and may contribute to the formation of pathological calcifications.

Of particular interest was the detection of a rare I–Cu particle association, previously not described in placental structures. This finding directly reflects the specific geochemical conditions of the studied region and confirms the potential for placental accumulation of marker elements related to both anthropogenic and natural contamination.

Thus, the obtained results demonstrate that the placenta can be considered not only as an organ vital for fetal development but also as a bioindicator of environmental conditions. The presence of specific mineral phases reflects the actual ecological and geochemical situation and its potential impact on women’s reproductive health. The findings emphasize the necessity of further interdisciplinary research and the development of preventive measures aimed at reducing pregnancy complications and safeguarding newborn health.

Keywords: placenta; Akmola region; microelements; scanning electron microscopy; energy dispersive analysis; ecological and geochemical situation; calcifications; health of mother and child.

Assessment of the impact of local vibration on the health of workers in the mining industry of East Kazakhstan

Gauhar Nurzhan¹, Gulnaz Sadykanova², Sanat Kumarbekuly^{3*}, Kuralay Alipina², Zhamal Igissinova²

¹«Educational and Research Ecobiocenter» of the Department of Education for the city of Ust-Kamenogorsk of the Department of Education for the East Kazakhstan region, Oskemen, Kazakhstan; gauhar_sagittarius@mail.ru

²S. Amanzholov East Kazakhstan University, Oskemen, Kazakhstan; gulnaz.sadykanova@mail.ru; alipina_87@mail.ru; igisinova.j@mail.ru

³Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan; sanat_kv@mail.ru

*Correspondence: sanat_kv@mail.ru

Citation: Nurzhan, G., Sadykanova, G., Kumarbekuly, S., Alipina, K., Igissinova, Zh. (2025). Assessment of the impact of local vibration on the health of workers in the mining industry of East Kazakhstan. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, 152(3), 207-221. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-207-221>

Academic Editor:
Zh.G. Berdenov

Received: 05.05.2025
Revised: 08.09.2025
Accepted: 15.09.2025
Published: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Abstract: This work is dedicated to the study of impact of local vibration on the health of miners in the East Kazakhstan region, where mining industry is one of the leading sectors of the economy and a major source of employment. Vibration disease is one of the most common occupational diseases among workers who use vibration-prone equipment on a regular basis. Vibration, combined with other harmful factors such as industrial noise, poor microclimate, and heavy physical loads, negatively affects workers' health and significantly contributes to the development and progression of vibration pathology. The study used mathematical modeling methods to analyze the relationship between vibration dose, exposure time, and the body's physiological response. Special attention was given to eco-rehabilitation measures aimed at improving working conditions and reducing the risks of occupational diseases in hazardous environments. The work presents practical recommendations for organizing effective protective measures for workers, including compliance with sanitary and hygienic standards, reducing vibration exposure, conducting regular preventive medical examinations, and improving the occupational medical care system. The results of the study can be used to develop and implement new standards and recommendations for the mining industry to improve working conditions and protect the health and long-term well-being of miners.

Keywords: local vibration; vibration disease; mining industry; occupational diseases; workers' health; prevention.

1. Introduction

Occupational health and safety in the mining industry remain a significant concern in modern industrial production. One of the major risk factors is exposure to local vibration, especially from mechanized hand tools.

Vibration disease is among the most common occupational illnesses, accounting for approximately 80.5% of all cases linked to hand-held tool use (Zimmerman et al., 2024).

Scientific interest in the health effects of vibration dates back to 1911, when Loriga first described the clinical symptoms caused by pneumatic tools (Coggon, 2022). Later, Walsh et al. (2019) proposed a dose-based evaluation system for protective measures (Walsh et al., 2019).

In recent decades, deteriorating socio-economic and healthcare conditions - particularly in urban areas like Moscow - have exacerbated health risks (Shastin et al., 2021). For example, in the UK, over 2 million people report work-related illnesses, with 0.5 million suffering from chronic stress. National initiatives promote healthy workplaces, rehabilitation, and early diagnostics (Ljandres et al., 2000; Alekseev & Janushanec, 2002; Izmerov, 2012; Trumel', 2002; Maljutina & Ereemeev, 2003).

According to Eurostat and the 2nd European Working Conditions Survey, occupational morbidity is increasing across Europe (Barnay, 2016). In Russia, Retnev V.L. reports that long-term exposure to physical and environmental stressors remains the main cause of occupational illness. Annually, Russia registers 10,000–11,000 cases, while the U.S. reports around 200,000, with an estimated economic burden of \$40 billion. The UK has integrated health and safety into its business frameworks (Nurzhasarova, 2007; Lebedev et al., 2002).

Between 2019 and 2024, the number of registered occupational diseases in Russia increased from 9,280 to 57,710, although official rates remain 30–45 times lower than in developed countries due to differing diagnostic standards (Zenkov, 2002; Oleshhenko et al., 2002).

In the coal mines of Kuzbass, disease incidence exceeds the regional average by 3.5 times, reaching 12.9 per 10,000 workers. Most common diagnoses include musculoskeletal disorders (48%), hearing loss (22.2%), and vibration disease (16.2%) (Amanbekov et al., 2002). In Ukraine, vibration disease accounted for 61.8% of occupational illnesses among miners (2019–2021), with physical overstrain contributing 9.7% (Farrell et al., 2020).

In low-mechanized mines, occupational illness is caused by intense vibration, dust, noise, and high workload (Muhin & Solov'ev, 2001). Even in mechanized enterprises, over 63% of cases are related to musculoskeletal and nervous system disorders (Walker-Bone et al., 2002). A comparative study involving 2,245 patients from 24 professions confirmed the significant role of regional muscle overload (Moellering et al., 2023).

Conditions such as polyosteoarthrosis, spondylosis, radiculopathy, and osteochondrosis are most prevalent among workers aged 45–65, especially with genetic predisposition and prolonged physical load.

Professional breakdown shows coal miners (32%), tunnelers (22.2%), repair workers (12.5%), machine operators (6.8%), electricians (5.6%), engineers/technicians (6.5%), and other professions (14.4%) (Farbtuh et al., 2002). Notably, 84% of miners work in Class III hazardous conditions, with 34.3% in levels 3–4. In Smolensk, 75% of illnesses are attributed to vibration, noise, and strain.

Modern occupational illnesses are increasingly multifactorial, combining vibration, overload, and microclimate impacts, with 70% of cases involving comorbid pathologies (e.g., musculoskeletal and vibration-related) (Samanta et al., 2023).

Theoretical modeling and socio-economic analysis of comorbid illnesses are key research priorities. In Kemerovo, up to 1,500 workers are declared disabled annually due to occupational diseases, with 60% from the coal industry. In Anzhero-Sudzhensk, 29% of patients have 2–3 diagnoses. Despite industrial decline, morbidity remains high (Shastin et al., 2019).

In Latvia, from 2019 to 2021, the average number of diseases per case was 2.2. In Donetsk, cardiovascular and musculoskeletal disorders dominate. In Kazakhstan, the highest risk regions are Karaganda, Zhezkazgan, East Kazakhstan, and Pavlodar, with illness prevalence rising among workers with over 15 years of experience.

This research is aimed at analyzing the structure, prevalence, and causes of occupational diseases associated with vibration exposure among workers in the mining industry of Kazakhstan and selected CIS countries.

The study focuses on identifying key vibrational, physical, and ergonomic factors contributing to the development of occupational pathologies. Particular emphasis is placed on the correlation

between working conditions (including duration of exposure, intensity of vibration, and combined action of harmful factors) and the incidence of disorders affecting the musculoskeletal and nervous systems. In addition, the study assesses the effectiveness of preventive and protective measures aimed at mitigating occupational health risks.

It is hypothesized that chronic multifactorial exposure to vibration, physical overload, and industrial noise exerts a cumulative and systemic effect on the health of mining personnel. This effect is especially pronounced among workers with long-term exposure and limited access to medical surveillance.

2. Materials and methods

Object of the study: Industrial mining enterprises in Kazakhstan (including the Ridder Mining and Processing Plant), Kuzbass (Russia), and Donbas (Ukraine).

Subject of the study: Occupational morbidity associated with local vibration, noise, and physical overload in high-risk mining occupations.

Data sources and research tools:

- Official statistics from the Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan, the National Center for Occupational Pathology, Rosstat (Russia), Eurostat, and WHO reports;
- Archival data on occupational disease incidence (2000–2024);
- National and international legal documents and sanitary norms (e.g., SNIP, GOST, ISO standards);
- Clinical reports and diagnostic data (functional, neurological, and imaging examinations) from occupational health centers.

Analytical methods:

- Content analysis of regulatory frameworks and labor protection laws;
- Comparative method for interregional and international comparison of disease prevalence and risk factors;
- Descriptive and inferential statistical analysis using SPSS Statistics 26.0, including correlation, regression, and trend analysis;
- Graphical visualization and structural mapping with Microsoft Excel and Tableau Public;
- Synthesis of clinical results, including data from electromyography, radiographic imaging, and cardiovascular functional tests.

Stages of the study:

1. Collection and verification of statistical, clinical, and legal data (2000–2024);
2. Quantitative analysis of the structure and dynamics of occupational morbidity in the mining sector;
3. Identification of regional and professional risk factors, including duration of exposure and workplace conditions;
4. Comparison of international preventive practices and implementation models in occupational health;
5. Formulation of recommendations for risk assessment, prevention, and mitigation strategies in the mining sector.

3. Results

3.1 Clinical characteristics of vibration disease

When determining the severity of vibration disease, researchers take into account the degree of expression of vegetative-vascular, trophic, sensory, motor, and reflex disorders.

Vibration disease of the first degree is marked by early symptoms, including:

- Peripheral angiodystonic syndrome;
- Angiodystonic syndrome with intermittent acrospasms of the fingers;

- Sensory polyneuropathy of the hands. The early symptoms include mild pain and paresthesia in the limbs, slight acrocyanosis of the fingers, capillary spasms up to the wrist joint, reduced vibrational sensitivity, and mild functional disorders of the central nervous system.

Vibration disease of the second degree is characterized by moderately pronounced symptoms, including:

- Peripheral angiospastic syndrome with frequent acrospasms and chronic vegetative-trophic disorders;

- Sensory polyneuropathy with dystrophic changes in the musculoskeletal system and polyradicular disturbances.

In these cases, pain and paresthesia become constant, the polyneuritic type of disorder spreads to the hand and forearm, accompanied by reduced vibrational sensitivity, acrocyanosis of the hands, and whitening of the fingers. Functional disorders of the nervous system, such as neurasthenia syndrome and cardialgia, are also observed.

Vibration disease of the third degree is characterized by pronounced manifestations:

- Sensomotor polyneuropathy syndrome;

- Generalized angiospastic syndrome with polyneuropathy.

Vegetative-vascular and trophic disorders become persistent, with thermosymmetry, capillary atony, and arterial hypertension syndrome. Sensory disturbances become more persistent and may be segmental in nature. Vibrational sensitivity decreases or disappears.

Pronounced asthenoneurotic states are accompanied by increased reflexes, eyelid and finger tremors. Vestibulopathy and disorders of endocrine and metabolic processes are often observed. Cardiac dysfunction becomes persistent, and myocardial dystrophy is detected on the ECG.

3.2 Subjective assessment of working conditions

The questionnaire method was applied to assess the working conditions of 32 miners, with attention to the severity and intensity of labor processes. The survey revealed a diverse range of responses concerning factors perceived to influence performance in underground mining operations.

More than one-third of the respondents (38.7%) attributed decreased performance to the heaviness of the work, with 47.0% noting it as a primary factor. Among tunneling miners, 55.1% reported that dust exposure hindered the completion of production tasks. The next most frequently cited factors were the heaviness of the work (48.6%) and high air humidity (32.3%).

Support workers, engaged in particularly demanding physical activities, primarily associated reduced performance with the heaviness of the work (69.7%) and the effects of vibration (24.7%). For underground electricians, the main limiting factors were the heaviness of the work (26.6%) and elevated humidity levels (24.3%).

Additionally, 46.1% of miners linked their work efficiency to increased strain on sensory systems, while heaviness of labor, vibration, and cooling microclimate conditions were commonly perceived as hindrances to productivity (Table 1).

Table 1. Subjective assessment of working conditions by miners in underground mines, %

Questions	Answer options	Mining face workers	Tunneling miners	Support workers	Underground electrical fitters	χ^2 / p-value
Assessment of Working Conditions	Good	31.25	21.67	21.4	24.8	$\chi^2 = 6.54$, p = 0.011
	Satisfactory	46.8	45.18	43.1	45.1	
	Bad	21.95	33.15	35.5	30.1	
Total:		100	100	100	100	
Have the working conditions	Improved	14.3	13.7	11.3	15.2	$\chi^2 = 4.28$, p = 0.042
	Worsened	21.2	19.4	23.3	20.4	
	Remained	64.5	66.9	65.4	64.4	

changed in the last few years (2020-2024)	unchanged					
Total:		100	100	100	100	

Note: Values are presented as percentages of respondents ($n = 32$). Statistical significance was assessed using the chi-square test for categorical data. $p < 0.05$ () was considered statistically significant.

Figure 1 presents the subjective assessment of the impact of mining industry factors on the health of miners, expressed as a percentage of respondents who identified specific risk factors.



Figure 1. Subjective assessment of the impact of mining industry factors on the health of miners, (% of respondents, $n = 32$).

Data are presented as percentages for four occupational groups: mining face workers, tunneling miners, support workers, and underground electrical fitters.

3.3 Hygienic standards of vibration

For comparison with the obtained results, hygienic standards for vibration were used according to the Sanitary and Epidemiological Requirements No. 310 (Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan, 2005). Tables 2 and 3 present the hygienic standards for vibration and the maximum allowable values of local vibration parameters along the axes Z, X, and Y, respectively. These reference values are presented in Tables 2 and 3.

Table 2. Hygienic standards for vibration

Type of Vibration	Maximum allowable vibration velocity level, dB, in octave bands with mean geometric frequencies, Hz										
	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
General transport	132	123	114	108	107	107	117	-	-	-	-
vertical horizontal	132	117	116	116	116	116	116	-	-	-	-
Transport-technological	-	117	108	102	101	101	101	-	-	-	-
Technological	-	108	99	93	92	92	92	-	-	-	-
In production rooms where there are no machines generating vibration	-	100	91	85	84	84	84	-	-	-	-

In service rooms, medical points, design offices, and laboratories	-	91	82	76	75	75	75	-	-	-	-
Local vibration	-	-	-	115	109	109	109	109	109	109	109

Table 3. Maximum allowable values of local vibration parameters along the axes Z, X, and Y

Mean geometric frequencies of octave bands, Hz	Vibration acceleration		Vibration velocity	
	m/s ²	dB	m/s × 10 ⁻²	dB
8	1.4	123	2.8	115
16	1.4	123	1.4	109
31.5	2.8	129	1.4	109
63	5.6	135	1.4	109
125	11.0	141	1.4	109
250	22.0	147	1.4	109
500	45.0	153	1.4	109
1000	89	159	1.4	109
Corrected and equivalent corrected values and their levels	2.0	126	20.0	112

Source: Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan (2005).

3.4 Prevalence of vibration disease

The data on the number of patients analyzed for vibration disease, categorized by severity, age, and experience, are shown in Figure 2.

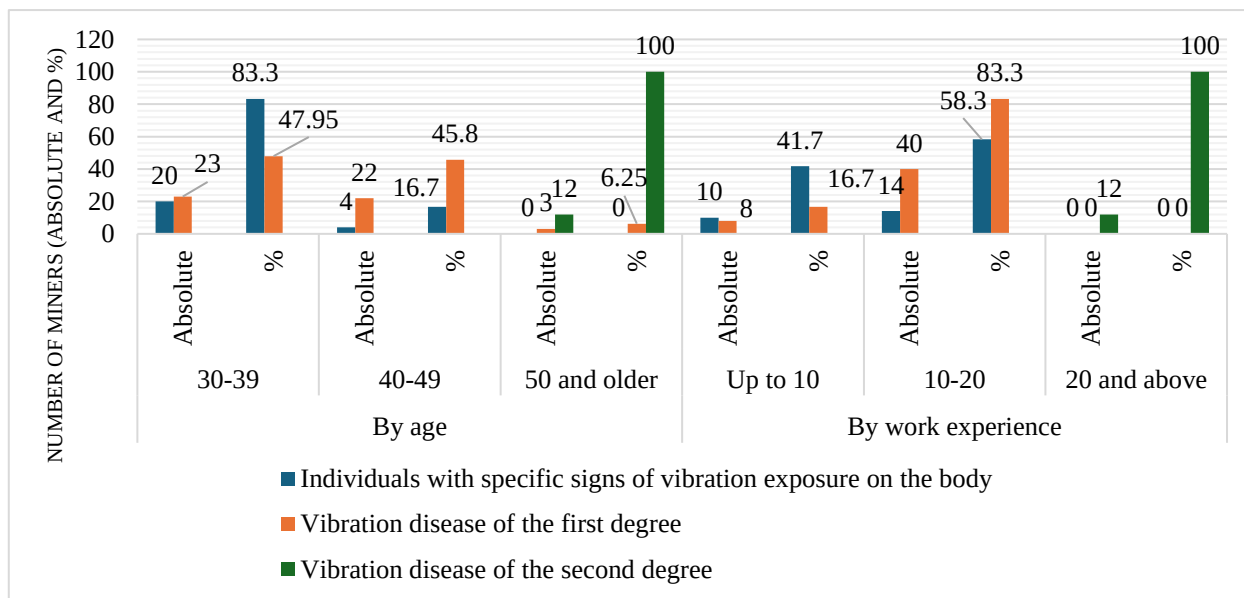


Figure 2. Distribution of patients with vibration disease by severity, age, and work experience (absolute numbers and %, descriptive statistics)

3.5 Mathematical modeling of vibration impact

A mathematical model was developed to assess the «dose–time–effect» relationship of vibration exposure among miners. Figures 3-7 illustrate the progression of physiological response depending on dose level and exposure time.

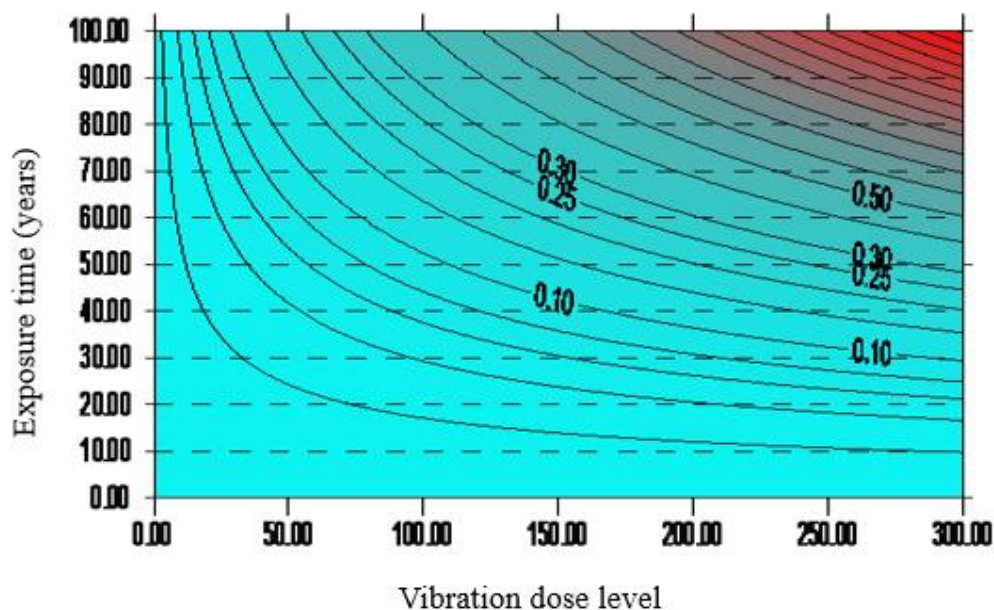


Figure 3. Mathematical model of the «dose–time–effect» relationship of vibration exposure, showing the dependence of exposure time (years) on vibration dose level

A fragment of the construction of the mathematical model is shown below in Figure 4.

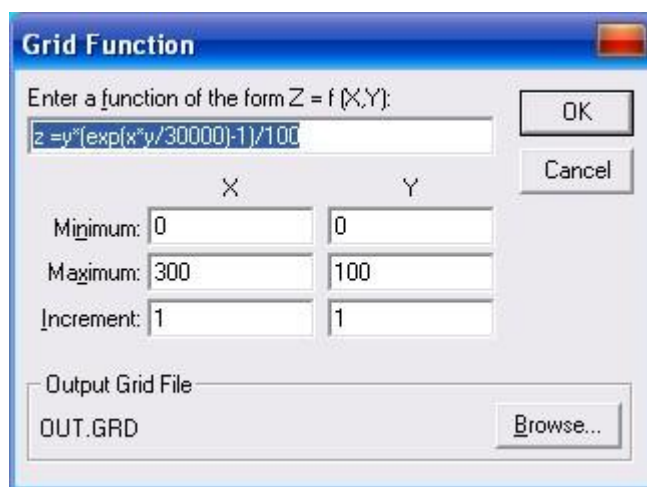


Figure 4. Fragment of the construction of the mathematical model

$$E = \tilde{d} * (\exp(\tilde{t} * \tilde{d}) - 1) \quad (1)$$

where E - effect

- scalable dose;

- scalable time;

The scalable dose and time are defined as follows:

$$\tilde{d} = d/D^*$$

and accordingly

$$\tilde{t} = t/T^*$$

where D^* и T^* - are the maximum dose and maximum work experience, respectively

The following values for the dose and time parameters were used in the above-mentioned graphs: $T^* = 25$ years = 300 months, $D^* = 1000$ Hz

Figure 5 shows the cumulative effect of vibration exposure at fixed doses over the maximum time period.

$$E = \sum_{i=1}^N E_i \quad (2)$$

where E - the effect obtained at a fixed dose, and N - the maximum time.

$$E_i = \tilde{d}_i * \left(\exp(\tilde{t} * \tilde{d}_i) - 1 \right) \quad (3)$$



Figure 5. Cumulative effect achieved over the maximum duration

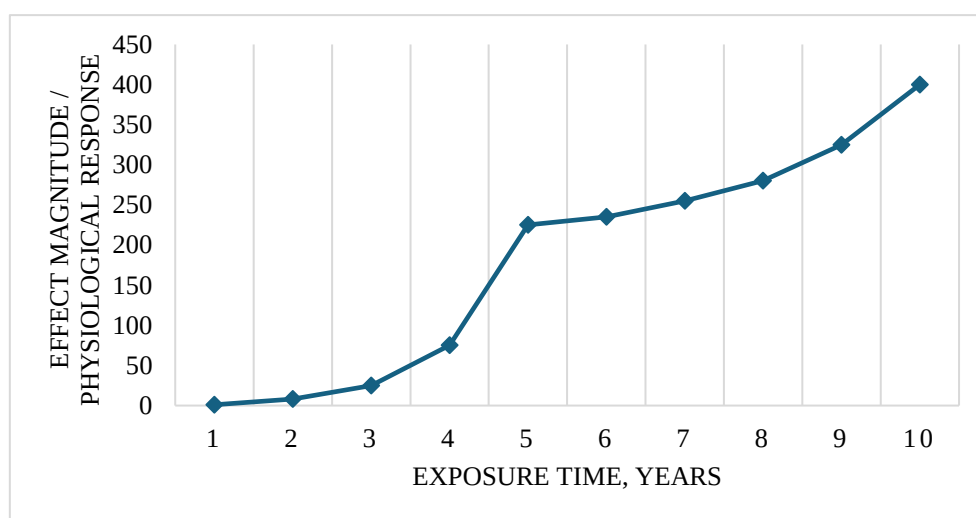


Figure 6. «Dose - time - effect» relationship

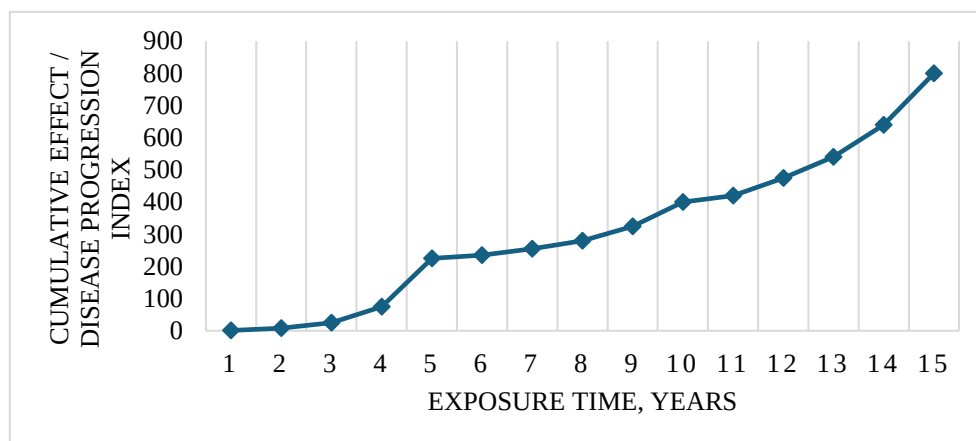


Figure 7. Continuation of the «dose - time - effect» relationship

4. Discussion

Vibration exerts multisystem effects through mechanical transmission and neuroreflex pathways. Its biological impact depends on frequency and intensity, affecting vascular tone and peripheral nerve function.

Our findings confirm the critical involvement of both central and peripheral nervous systems in the development of vibration disease. Notably, dysfunction of the sympathetic nervous system, which regulates vascular tone, is consistent with earlier reports by Grassi et al. (2015) and Bruno et al. (2012). Sensory disturbances - including reduced vibrational sensitivity and paresthesia - increase in severity proportionally with exposure duration and intensity, supporting the dose–time–effect relationship demonstrated in Figures 3–7.

It is known that low-frequency vibrations (4-11 Hz) particularly impair coordination and psychomotor functions, consistent with the observations of Matsumoto and Griffin (2002). Moreover, female workers are at increased risk of gynecological complications under chronic vibration exposure, as noted by Skröder et al. (2020).

Despite ongoing technological modernization, vibration disease remains prevalent in the mining sector, especially in areas using outdated equipment or lacking adequate hygienic oversight. This is corroborated by our survey (Table 1), where over 30% of miners assessed their working conditions as poor, citing vibration, high workload, and inadequate microclimate as key hindering factors. These findings align with Sharipova (2015), who emphasized the negative consequences of declining workplace healthcare infrastructure in Kazakhstan.

Our mathematical model of the «dose–time–effect» relationship (Figures 3–7) demonstrates that exceeding vibration exposure thresholds leads to accelerated onset of pathological conditions. The model enables estimation of individual risk levels based on specific exposure parameters, supporting the development of early preventive measures.

However, the study has certain limitations. It was conducted at a single mining site, and longitudinal monitoring was not performed. These factors limit the generalizability of our findings. Future research should include multi-site longitudinal studies and explore biological markers of sensitivity to vibration, as well as the effectiveness of intervention and rehabilitation strategies.

In summary, vibration remains a significant occupational hazard with wide-ranging effects on workers' health and performance. Predictive modeling may serve as a practical tool for early risk identification and enhance hygiene regulations and medical protocols.

Table 1 presents the results of a questionnaire survey conducted among 32 miners, which assessed their subjective evaluation of working conditions in underground mines. The table reflects differences among specific occupational groups - such as tunneling miners, support personnel, and underground electricians - in how they perceive factors like work heaviness, dustiness, air humidity,

and exposure to vibration. These data reveal considerable variation in the perceived impact of working conditions depending on the nature of the tasks performed.

At the current stage of scientific and technological progress, improving working conditions, living standards, and medical services plays an essential role in occupational health. In this regard, a hygienic survey was conducted among miners to collect data for the development of health-improving measures. A questionnaire was used to gather information on miners' subjective assessments of their health status. The results, presented in Figure 1, reveal significant differences in how workers perceive the impact of various mining-related factors on their health.

Mining is classified as heavy physical labor and involves significant dynamic muscle strain. According to the results, 88% of miners are employed under Class III hazardous working conditions, with 54.4% working in levels III.3 and III.4 - environments characterized by exposure to vibration, poor microclimate, and physical overload.

Our analysis confirms that task performance quality is influenced by the degree of mechanization of labor-intensive operations and the intensity of adverse workplace factors. Miners' work remains associated with unmechanized and monotonous tasks, exposure to cold and heat, vibration, and psycho-emotional stress, all of which contribute to accelerated development of occupational pathologies.

Risk assessment of exposure to physical factors - particularly local vibration - is essential in preventing occupational diseases. When hygienic standards are exceeded, both occupational and general somatic illnesses may develop.

As noted by Kulkybaev G.A., the deterioration of occupational healthcare - including the elimination of shop physician positions - has led to reduced effectiveness in prevention and early detection of occupational diseases. The low quality of periodic medical examinations results in late diagnosis and growing numbers of workers with occupational disabilities.

Further study of the pathogenesis of vibration-related disorders and the development of rehabilitation strategies are urgently needed, especially given the limited current understanding of the «dose–time–effect» relationship. This relationship forms the foundation for reliable risk assessment and disease forecasting.

Regulatory documents, including the *Sanitary and Epidemiological Requirements for Working Conditions with Vibration Sources* No. 310 (2005), define permissible exposure levels. These standards regulate vibration exposure within specific frequency bands: 16, 31.5, 63, 125, 250, 500, and 1000 Hz for an 8-hour shift. Hygienic limits for different vibration types and frequencies are summarized in Tables 2 and 3.

Additionally, health records from the Ust-Kamenogorsk Occupational Pathology Clinic were analyzed for 84 miners diagnosed with vibration disease of varying severity. These miners, primarily tunneling workers and drill operators from the Ridder mining and processing plant, were examined at the Research Institute of Hygiene and Occupational Diseases (Ministry of Health, Republic of Kazakhstan).

As illustrated in Figure 2, most patients (48 individuals, 57.2%) were diagnosed with first-degree vibration disease, while 24 individuals (28.6%) exhibited early signs of vibration-related pathology. Only 14.2% (12 individuals) were diagnosed with second-degree vibration disease, confirming that early detection remains feasible with proper monitoring and workplace screening.

The model presented in Figure 4 demonstrates the «dose - time - effect» relationship, where the horizontal curves illustrate the probability of the miner's physiological response depending on vibration exposure and the development of vibration pathology.

From the obtained data, it can be concluded that as the vibration dose increases, the time for the effect to occur from exposure to this physical factor decreases.

As shown in Figure 5, this curve represents the physiological response of a worker engaged in the drilling process with a short work experience (up to 5 years) when using equipment that generates vibration at doses corresponding to the maximum permissible level (MPL) of 109 dB. At a vibration

frequency of up to 250 Hz, which also corresponds to the MPL of local vibration, a sufficient physiological response occurs after 5 years of work experience.

As shown in Figure 6, after a certain period (5–8 years), with an increase in vibration dose, the physiological resources of the body become depleted, and performance decreases. At a vibration dose with a frequency of 300 Hz (130 dB), a physiological response may appear after approximately 3.5 years of exposure, which can lead to the development of vibration disease.

As shown in Figure 7, the model reflects the continuation of the «dose–time–effect» relationship, where negative processes in the body accumulate and intensify with the depletion of physiological resources. When exposed to a physical factor with a frequency of 400 Hz (174 dB), the body may begin to respond after only 2 years of exposure. On the one hand, as the vibration dose increases, the time required for the manifestation of negative physiological effects and the development of vibration disease decreases. On the other hand, with increasing work experience in vibration-producing occupations, the dose load tends to decrease. Thus, based on the results of the mathematical modeling (Figures 3, 5, 6, and 7), the impact on the human body can be assessed in terms of both vibration intensity and duration of exposure.

5. Conclusion

The mining industry remains a strategic sector of the economy in the Republic of Kazakhstan; however, it is associated with intense physical labor and exposure to harmful occupational factors, particularly vibration. The specific geological conditions and outdated equipment used at mining enterprises create an environment that exceeds sanitary and hygienic standards, significantly increasing the risk of developing occupational diseases, especially vibration pathology.

The study confirms that the incidence of vibration disease among miners in East Kazakhstan remains high, reaching 52.6%, with the onset of symptoms observed as early as 8 years into employment. As vibration levels rise, the time for clinical manifestation shortens from 5 to 2 years. The critical exposure period of 5–8 years serves as a threshold for the onset of pathological changes. Furthermore, as experience increases, the cumulative dose tends to decrease, suggesting that physiological adaptation or workforce attrition may play a role.

Vibration pathology remains prevalent among miners, with disease onset observed after 8 years of exposure.

Preventive strategies include limiting exposure duration, providing scheduled breaks, improving tool design, maintaining optimal microclimate, and ensuring regular medical checkups.

However, the current socio-economic context complicates effective prevention. Economic instability, reduction of workplace medical units, and limited access to occupational health services contribute to workers' reluctance to seek timely medical attention. As a result, many continue working despite clear signs of occupational illness.

The study highlights the urgent need for systemic reforms in occupational health management, modernization of equipment, and restoration of preventive medical services in the mining industry. Further longitudinal studies involving larger and more diverse worker populations are needed to refine predictive models and develop targeted interventions. Addressing these issues is essential for safeguarding the health and productivity of Kazakhstan's mining workforce.

6. Supplementary Materials: No supplementary materials.

7. Author Contributions

Conceptualization, methodology, validation, data curation, formal analysis, investigation, resources, writing-original draft preparation - G.N., G.S., S.K.; data curation, writing-review and editing, supervision - K.A., Zh.I. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information

Nurzhan, Gauhar – Master of Natural Sciences in the field of Ecology, Educational and Research Ecobiocenter, Department of Education for the city of Ust-Kamenogorsk, Department of Education of the East Kazakhstan Region, Maxim Gorky St., 66, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, 070004; email: gauhar_sagittarius@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-6656-3100>

Sadykanova, Gulnaz – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Biology, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; email: gulnaz.sadykanova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8676-1972>

Kumarbekuly, Sanat – PhD, Senior Lecturer, Department of Geography and Ecology, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan; email: sanat_kv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1285-3281>

Alipina, Kuralay – Doctoral student, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, 30th Guards Division St., 34, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, 070002; email: alipina_87@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5397-3215>

Igisinova, Jamal – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Biology, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, 070002; email: igisinova.j@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4508-6314>

9. Funding: This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant № AP23489325).

10. Acknowledgements: The authors have no additional acknowledgments to report.

11. Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

12. References

1. Alekseev, S.V., Janushanec, O.Ja. (2002). Jekologija cheloveka – sistemnyj vzgljad na process formirovaniya zdorov'ja [Human ecology – a systemic view of the health formation process]. *Vestnik RAMN [Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences]*, 3–6.
2. Amanbekov, U.A., Konurbaev, T.R., Ibraev, S.A. (2002). Aktual'nye problemy proppatologii v Respublike Kazahstan [Current issues in occupational pathology in the Republic of Kazakhstan]. In *S'ezd proppat [Congress on Occupational Pathology]*, Moscow, 32.
3. Barnay, T. (2016). Health, work and working conditions: a review of the European economic literature. *The European Journal of Health Economics* 17(6), 693-709. <https://doi.org/10.1007/s10198-015-0715-8>
4. Bruno, R.M., Ghiadoni, L., Seravalle, G., Dell'Oro, R., Taddei, S., Grassi, G. (2012). Sympathetic regulation of vascular function in health and disease. *Frontiers in physiology* 3, 284. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00284>
5. Coggon, D. (2022). Estimating population burdens of occupational disease. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 48(2), 83–85. <https://doi.org/10.5271/sjweh.4007>
6. Farbtuh, T.A., Jeglite, M.Je., Matisane, L.V. (2002). Medicina truda Latvii [Occupational medicine in Latvia]. *Medicina truda i promyshlennaja jekologija [Occupational Medicine and Industrial Ecology]*, (12), 16–20.
7. Farrell, M.C., Giza, R.J., Shibao, C.A. (2020). Race and sex differences in cardiovascular autonomic regulation. *Clinical Autonomic Research* 30(5), 371-379. <https://doi.org/10.1007/s10286-020-00723-z>
8. Grassi, G., Mark, A., Esler, M. (2015). The sympathetic nervous system alterations in human hypertension. *Circulation research* 116(6), 976-990. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.116.303604>
9. Izmerov, N.F. (2003). Konceptual'nye podhody k sohraneniju i ukrepleniju zdorov'ja rabotajushhego naselenija Rossii [Conceptual approaches to preserving and strengthening the health of Russia's working population]. *Bjulleten' nauchnogo soveta "Mediko-jekologicheskie*

- problemy rabotajushhih*” [Bulletin of the Scientific Council "Medical and Environmental Problems of Workers"], (1), 4–15.
10. Lebedev, P.A., Golikov, V.P., Hramov, N.L. (2002). Gigienicheskie preimushhestva mehanizirovannogo sposoba ugledobychi v Kuzbasse [Hygienic advantages of the mechanized method of coal mining in Kuzbass]. *Medicina truda i promyshlennaja jekologija* [Occupational Medicine and Industrial Ecology], (10), 44–45.
 11. Ljandres, L.R., Sboev, I V., Bepalova, S.A. (2000). Retrospektivnyj analiz professional'noj zaboлеваemosti sredi trudjashhihsja AP «shahta im. A. F. Zasyad'ko» za 1990–1999 gg [Retrospective analysis of occupational morbidity among workers of Zasyadko coal mine, 1990–1999]. In *Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija* [International Scientific and Practical Conference], Donetsk, 180–181.
 12. Maljutina, N.N., Eremeev, R.B. (2003). Problemy sohraneniya zdorov'ja rabotajushhego naselenija [Problems of preserving the health of the working population]. *Bjulleten' nauchnogo soveta “Mediko-jekologicheskie problemy rabotajushhih”* [Bulletin of the Scientific Council "Medical and Environmental Problems of Workers"], (1), 18–19.
 13. Matsumoto, Y., Griffin, M.J. (2002). Non-linear characteristics in the dynamic responses of seated subjects exposed to vertical whole-body vibration. *J. Biomech. Eng.* 124(5), 527–532. <https://doi.org/10.1115/1.1499959>
 14. Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan. (2005). Sanitary and epidemiological requirements for working conditions with vibration sources No. 310. Astana.
 15. Moellering, D.R., Smith-Johnston, K., Kelley, C., Sammy, M.J., Benedict, J., Brock, G., Hanaoka, B.Y. (2023). Association between skeletal muscle mitochondrial dysfunction and insulin resistance in patients with rheumatoid arthritis: a case–control study. *Arthritis Research & Therapy*, 25(1), 85. <https://doi.org/10.1186/s13075-023-03065-z>
 16. Muhin, V.V., Solov'ev, A.I. (2001). Professional'nyj risk vibracionnoj patologii u gornorabochih ugol'nyh shaht [Professional risk of vibration pathology in coal miners]. *Materialy 10-j Vserossijskoj konferencii po fiziologii truda* [Proc. 10th All-Russian Conference on Labor Physiology], Moscow, 100–103.
 17. Nurzhasarova, M.A. (2007). Ohrana truda [Occupational safety]: Uchebnoe posobie [Textbook]. Astana.
 18. Oleshhenko, A.M., Surzhikov, V.D., Bol'shakov, V.V. (2002). Gigiena truda i zdorov'ja rabochih ugol'nyh razrezov juga Kuzbassa [Occupational hygiene and workers' health in coal mines of southern Kuzbass]. *Medicina truda i promyshlennaja jekologija* [Occupational Medicine and Industrial Ecology], (10), 40–43.
 19. Samanta, A., Lufkin, T., Kraus, P. (2023). Intervertebral disc degeneration - current therapeutic options and challenges. *Frontiers in Public Health* 11, 1156749. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1156749>
 20. Shastin, A.S., Gazimova, V.G., Gagarina, M.S., Malyh, O.L., Gusel'nikov, S.R. (2019). Vozmozhnosti analiza zaboлеваemosti s vremennoj utratoj trudosposobnosti sub'ektov predprinimatel'skoj dejatel'nosti [Opportunities for analyzing temporary disability among entrepreneurs]. *Profilakticheskaja medicina* [Preventive Medicine], 22(4–2), 2012–2016. <https://doi.org/10.17116/profmed20192204212>
 21. Shastin, A.S., Malyh, O.L., Gazimova, V.G., Cepilova, T.M., Ustjugova, T.S. (2021). Zaboлеваemost' trudosposobnogo naselenija Rossijskoj Federacii v 2015–2019 godah [Morbidity among the working population of the Russian Federation in 2015–2019]. *Gigiena i sanitarija* [Hygiene and Sanitation], 100(12), 1487–1494. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-12-1487-1494>
 22. Sharipova, D. (2015). State retrenchment and informal institutions in Kazakhstan: people's perceptions of informal reciprocity in the healthcare sector. *Central Asian Survey* 34(3), 310–329. <https://doi.org/10.1080/02634937.2015.1044199>

23. Skräder, H., Pettersson, H., Albin, M., Gustavsson, P., Rylander, L., Norlén, F., Selander, J. (2020). Occupational exposure to whole-body vibrations and pregnancy complications: a nationwide cohort study in Sweden. *Occupational and environmental medicine* 77(10), 691-698. <https://doi.org/10.1136/oemed-2020-106519>
24. Trumel', V.V. (2002). Zdorov'e rabotajushhego naselenija Rossijskoj Federacii [Health of the working population of the Russian Federation]. *Medicina truda i promyshlennaja jekologija* [Occupational Medicine and Industrial Ecology] (12), 4–8.
25. Walker-Bone, K., Palmer, K.T. (2002). Musculoskeletal disorders in farmers and farm workers. *Occupational medicine*, 52(8), 441-450. <https://doi.org/10.1093/occmed/52.8.441>
26. Walsh, L., Ulanowski, A., Kaiser, J.C., Woda, C., Raskob, W. (2019). Risk bases can complement dose bases for implementing and optimising a radiological protection strategy in urgent and transition emergency phases. *Radiation and environmental biophysics* 58(4), 539-552. <https://doi.org/10.1007/s00411-019-00809-x>
27. Zenkov, V.A. (2002). Aktual'nye problemy gigieny truda i okruzhajushhej sredy v shahterskih gorodah [Current problems of occupational hygiene and the environment in mining cities]. *Medicina truda i promyshlennaja jekologija* [Occupational Medicine and Industrial Ecology], (10), 3–5.
28. Zimmerman, M., Nilsson, P., Rydberg, M., Dahlin, L. (2024). Risk of hand and forearm conditions due to vibrating hand-held tools exposure: a retrospective cohort study from Sweden. *BMJ open* 14(6), e080777. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-080777>

Шығыс Қазақстанның тау-кен өнеркәсібі жұмысшыларының денсаулығына локалды вибрацияның әсерін бағалау

Гаухар Нұржан, Гульназ Садыканова, Санат Құмарбекұлы, Куралай Алипина, Жамал Игисина

Аңдатпа. Бұл жұмыс Шығыс Қазақстан өңіріндегі тау-кен өндірісінде еңбек ететін кеншілердің денсаулығына локалды вибрацияның әсерін зерттеуге арналған. Тау-кен өнеркәсібі - өңір экономикасының жетекші салаларының бірі және халықты жұмыспен қамтудың маңызды көзі болып табылады. Вибрациялық ауру - вибрацияға ұшырайтын құрал-жабдықтармен үнемі жұмыс істейтін жұмысшылар арасында ең жиі кездесетін кәсіптік аурулардың бірі. Вибрация өндірістік шу, қолайсыз микроклимат және ауыр физикалық жүктеме сияқты басқа да зиянды факторлармен қатар жұмысшылардың денсаулығына теріс әсер етіп, вибрациялық патологияның дамуы мен өршуіне елеулі үлес қосады. Зерттеу барысында вибрация дозасы, әсер ету уақыты мен ағзаның физиологиялық жауабы арасындағы байланысты талдау үшін математикалық модельдеу әдістері қолданылды. Қауіпті өндірістік ортада еңбек жағдайларын жақсарту және кәсіби аурулар қаупін азайту мақсатында экологиялық сауықтыру шараларына ерекше көңіл бөлінді. Жұмысшыларды қорғаудың тиімді шараларын ұйымдастыруға арналған практикалық ұсыныстар ұсынылды, оның ішінде санитарлық-гигиеналық талаптарды сақтау, вибрациялық әсерді азайту, тұрақты профилактикалық медициналық тексерулер жүргізу және кәсіби медициналық қызмет жүйесін жетілдіру қамтылған. Зерттеу нәтижелері тау-кен өнеркәсібінде еңбек жағдайларын жақсартуға және кеншілердің денсаулығы мен ұзақ мерзімді еңбекке жарамдылығын сақтауға бағытталған жаңа стандарттар мен ұсынымдарды әзірлеуге және енгізуге пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: локалды вибрация; вибрациялық ауру; тау-кен өндірісі; кәсіби аурулар; жұмысшылардың денсаулығы; профилактика

Оценка воздействия локальной вибрации на здоровье работников горно-рудной отрасли Восточного Казахстана

Гаухар Нуржан, Гульназ Садыканова, Санат Кумарбекулы, Куралай Алипина, Жамал Игисина

Аннотация: Данная работа посвящена изучению воздействия локальной вибрации на здоровье шахтёров Восточно-Казахстанского региона, где горнодобывающая промышленность является одной из ведущих отраслей экономики и важным источником занятости населения. Вибрационная болезнь - одно из наиболее распространённых профессиональных заболеваний среди работников, регулярно использующих оборудование, подверженное вибрации. Воздействие вибрации в сочетании с другими вредными факторами, такими, как производственный шум, неблагоприятный микроклимат и высокая физическая нагрузка, отрицательно сказывается на здоровье работников и в значительной степени способствует развитию и прогрессированию вибрационной патологии.

В исследовании использовались методы математического моделирования для анализа взаимосвязи между дозой вибрации, временем воздействия и физиологической реакцией организма. Особое внимание было уделено мерам эко-реабилитации, направленным на улучшение условий труда и снижение рисков профессиональных заболеваний в условиях вредного производства.

Работа содержит практические рекомендации по организации эффективной системы защиты работников, включая соблюдение санитарно-гигиенических норм, снижение уровня вибрационного воздействия, проведение регулярных профилактических медицинских осмотров и совершенствование системы профессионального медицинского обслуживания. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и внедрении новых стандартов и рекомендаций для горнодобывающей отрасли с целью улучшения условий труда, сохранения здоровья и работоспособности горняков.

Ключевые слова: локальная вибрация; вибрационная болезнь; горнодобывающая промышленность; профессиональные заболевания; здоровье работников; профилактика

Экологический инжиниринг в агроэкосистемах: обогащение селеном яровой мягкой пшеницы в условиях Севера Монголии

Анна Синдирева^{1*}, Эрдэнээ Эрдэнэцогт², Анна Мангутова¹, Виктория Иеронова¹, Радмир Косолапов¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет», Школа естественных наук, Тюмень, Россия; a.v.sindireva@utmn.ru; a.k.mangutova@utmn.ru; stud0000265202@study.utmn.ru

²Национальный Центр Общественного Здоровья Монголии, Улан-Батор, Монголия; erd625@yahoo.com

*Корреспонденция: a.v.sindireva@utmn.ru

Цитирование: Синдирева, А., Эрдэнэцогт, Э., Мангутова, А., Иеронова, В., Косолапов, Р. (2025). Экологический инжиниринг в агроэкосистемах: обогащение селеном яровой мягкой пшеницы в условиях Севера Монголии. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 152(3), 222-233. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-222-233>

Академический редактор:
Ж.Г. Берденов

Поступила: 09.09.2025
Исправлена: 22.09.2025
Принята: 23.09.2025
Опубликована: 30.09.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация. В статье впервые представлен комплексный анализ влияния микроэлементов селена и йода на рост и развитие яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в условиях северных регионов Монголии. В ходе полевых опытов изучалось действие различных форм микроэлементов — селенита натрия, селената натрия и йодида калия на биометрические параметры растений и урожайность культуры. Результаты показали дифференцированный ответ растений на применение различных соединений и дозировок. Применение селенита натрия, а также совместное действие селената натрия и йодида калия способствует увеличению урожайности зерна яровой пшеницы, за счет увеличения плотности растений, несмотря на снижение индивидуальной продуктивности колоса. Впервые в конкретных агроэкологических условиях для растений пшеницы установлена сильная корреляция между концентрацией селена в растворах для некорневой обработки и его содержанием в зерне ($r = 0,99$). При этом использование селената натрия обеспечивало более интенсивное накопление микроэлемента (коэффициент $b = 80,23$) по сравнению с селенитом ($b = 44,94$). При максимальной концентрации раствора селената натрия (0,01%) содержание селена в зерне увеличивалось в 6,4 раза относительно контроля. Экологический анализ результатов позволяет рассматривать селеновую и йодную биофортификацию как инновационную биотехнологию, направленную на оптимизацию продуктивности агроэкосистем без чрезмерной химической нагрузки. Такие методы укрепляют концепцию «зелёного земледелия», способствуют сохранению плодородия почв и снижению экологического риска, связанного с применением синтетических удобрений. Важным аспектом является интеграция полученных данных в стратегию устойчивого развития сельского хозяйства северных регионов Монголии, поскольку биофортификация зерновых культур микроэлементами повышает экологическую устойчивость агроландшафтов и способствует разработке мероприятий по коррекции микроэлементозов у человека и животных.

Таким образом, результаты исследования демонстрируют значимость биофортификации как инструмента экологического инжиниринга, позволяющего объединить задачи повышения урожайности, улучшения качества продукции и сохранения природной среды.

Ключевые слова: биофортификация; яровая пшеница; селен (Se); йод (I); некорневые подкормки

1. Введение

Проблема недостатка доступных для растений микроэлементов в почве, является довольно распространенной среди многих агроценозов мира, что может негативно повлиять на урожайность и качество сельскохозяйственных культур. Кроме того, недостаток элементов в системе почва-растение является одной из причин микроэлементозов человека. Известно, что микроэлементы играют большую роль в жизни человека (Aleksandrovskaia, 2016; Bano, 2021). Среди проблем недостатка микроэлементов в системе почва-растение-животное (человек) особо выделяется дефицит йода и селена (Danso, 2023; Erdenotsogt, 2023). Роль этих элементов в растениях недостаточно изучена, однако невысокое содержание этих микроэлементов в растениеводческой продукции может негативно отразиться на здоровье человека и животных. Среди сельскохозяйственных культур с позиции обеспеченности йодом и селеном особое внимание заслуживают зерновые культуры, которые занимают значительное место в рационе животных и человека.

В связи с этим, необходимы исследования в области разработки оптимальных приемов обогащения зерновых культур йодом и селеном и оценка возможности оптимизации селенового и йодного статуса населения при использовании обогащенных растений. При этом анализ возможности применения данных микроэлементов должен осуществляться, как с агрономической, так и с санитарно-гигиенической позиций. Следует отметить, действие селена и йода в системе почва-растение во многих регионах активно изучается (Erdenotsogt, 2023; Golubkina, 2017; Golubkina, 2022; Golubkina, 2024).

Йод и селен используются в репродукции тиреотропных гормонов, которые стимулируют функции всех желез внутренней секреции. Входя в состав активного центра трийодтиронин деиодиназ, селен активно участвует в метаболизме йода, являясь его синергистом. Эти элементы определяют уровень иммунной защиты организма, оптимизируют рост, работу мозга и репродуктивных органов, предупреждают возникновение и развитие кардиологических и ряда онкологических заболеваний. Одновременная недостаточность селена и йода приводит к значительному усугублению последствий их дефицита (Golubkina и др., 2024). До настоящего времени решение этой проблемы осуществлялось независимо для селена и йода (Golubkina, 2024; Gupta, 2017).

В первом случае использовали селеносодержащие премиксы в кормах сельскохозяйственных животных и птицы, селеносодержащие БАДы и селеносодержащие удобрения. Также в ряде работ изучалось действие селена на человека и животных с позиции его взаимодействия с другими элементами (Kapitalchuk, 2023).

Решение проблемы йододефицита осуществлялось в основном путем применения йодированной соли и в меньшей степени йодсодержащих БАД. Тем не менее, по мнению ряда авторов, использование йодированной соли не является достаточно эффективным для оптимизации обеспеченности йодом населения. Кроме того, избыточное потребление соли может вызвать ряд негативных последствий для организма человека (Glagoleva, 2025).

Также доказано и токсическое действие неорганических соединений селена (Samynathan, 2023).

Поэтому представляет интерес возможность обогащения селеном и йодом растениеводческой продукции, поскольку это дает возможность ввести в рацион животных и человека не опасные неорганические соединения, а перевести их в безопасную и доступную

органическую форму (Sheshnitsan, 2024). Кроме того, известно, что обогащение микроэлементами положительно влияет на качество растений (Sindireva, 2022).

Таким образом, широко распространенные дефициты йода и селена среди населения мира и, в частности, в Монголии, а также неразрывная биологическая связь этих элементов-синергистов определяют перспективность получения функциональных продуктов питания на основе как отдельного, так и одновременного обогащения сельскохозяйственных культур йодом и селеном с целью оптимизации йодного и селенового статуса населения, снижения оксидантного стресса у населения и защиты от негативных факторов окружающей среды (Sindireva, 2023; Sindireva и др., 2024; Sindireva, 2025; Skrypnik, 2024; Tallarita, 2025).

Цель работы – агроэкологическая оценка отдельного и совместного применения селени- и йодсодержащих удобрений под яровую мягкую пшеницу в условиях Севера Монголии.

Данные исследования в агроэкологических условиях Севера Монголии проведены впервые.

2. Материалы и методы

Исследования по оценке эффективности применения селена и йода для обогащения яровой мягкой пшеницы сорта Дархан-193 проводили на опытном поле селекционного участка Института растениеводства и сельского хозяйства (г. Дархан) в 2022–2023 гг. (2022 полевые опыты, 2023 лабораторные исследования). Почва опытного участка темно-каштановая, содержание гумуса в среднем составляло 1,16%, рН вод. – 7,2, содержание нитратного азота, подвижных форм фосфора и калия характеризуется как низкое. Исходное содержание селена в почве не превышало 0,08 мг/кг, что характеризуется как довольно низкое.

Климатические условия г. Дархан носят резко континентальный характер. В летний период могут наблюдаться незначительные кратковременные осадки, температура воздуха не более +25 °С. Зимой температура воздуха опускается до –25 °С, снега здесь практически нет. В целом в г. Дархане солнечных дней в году наблюдается более 250.

Характеристика метеоусловий мая-августа 2022 года. Весенне-летний период характеризовался постепенным нарастанием температурного режима с засушливым маем (средняя температура +11.8°C, осадки всего 14.2 мм) и поздними заморозками до –4.8°C. Июнь отмечался умеренно теплой погодой (+17.4°C) с увеличением влажности до 58% и осадками 43.6 мм. Пик летнего сезона пришелся на июль с максимальной средней температурой +20.2°C, обильными дождями (95.8 мм) и высокой влажностью 72%, когда был зафиксирован абсолютный максимум +33.1°C. Август характеризовался началом температурного спада до +18.1°C при сохранении значительной увлажненности (68.3 мм осадков) и появлением первых заморозков в конце месяца (+0.9°C).

Опыты проводили в трехкратной повторности. Опыты мелкоделяночные, площадь одной делянки 1 м², повторность трехкратная, расположение вариантов систематическое. Схема опыта: 1) Контроль; 2) 0,005% раствор селенита натрия; 3) 0,01% раствор селенита натрия; 4) 0,005% раствор селената натрия; 5) 0,01% раствор селената натрия; 6) 0,005% раствор иодида калия; 7) 0,01%, раствор иодида калия; 8) 0,005%, раствор селенита натрия +0,005% раствор иодида калия; 9) 0,005% раствор селената натрия +0,005% раствор иодида калия.

Микроэлементы применяли методом путем некорневой обработки (опрыскивания) однократно перед фазой колошения. На каждое растение расходовалось 30 мл раствора, соответственно на делянку расход препарата составлял в зависимости от количества растений от 4,5 до 5,5 литров. Закладку опытов с микроудобрениями, все учеты, наблюдения и отбор растительных и почвенных образцов проводили по общепринятым методикам. Агротехника в опыте была общепринятой для условий зоны. Наблюдения в опыте: фаза колошения, полной спелости. Отбирали растения с каждой делянки для проведения биометрических измерений по следующим показателям: высота растений, количество растений на 1 м², длина колоса, масса семян на 1 м², масса зерен одного колоса, количество зерен в колосе яровой пшеницы. В статье представлены данные биометрических показателей яровой мягкой пшеницы в уборку

(фаза полной спелости). Уборку проводили в первой декаде сентября 2022 года. Учет урожайности осуществляли прямым поделочным взвешиванием.

Содержание селена и тяжелых металлов в почве и растительных образцах определяли в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по УФО» по Тюменской области методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в соответствии с методическими рекомендациями ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98 («Количественный химический анализ почв», 2005).

По окончании исследования полученные данные подвергали статистической обработке. Для статистической обработки данных использовали стандартные пакеты компьютерных программ Microsoft Office Excel 2007 и STATISTICA 6.0.

3. Результаты

Комплексное воздействие микроэлементов на рост и развитие яровой мягкой пшеницы оценивалось как в период вегетации, так и на стадии уборки урожая. Морфометрический анализ показал, что обработка исследуемыми соединениями оказала неоднозначное действие на изменение параметров роста и развития в большинстве опытных вариантов (Таблица 1, Рисунки 1 и 2).

Таблица 1. Показатели роста сорта яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дархан-193 под влиянием препаратов селена и йода ($M \pm SEM$)

№	Вариант опыта	Высота растений, см	Количество растений, шт.	Длина колоса, см
1	Контроль	91,33±0,88	158,67±9,62	9,80±0,20
2	0,005% Na ₂ SeO ₃	84,67±2,40	184,67±4,67	9,37±0,20
3	0,01% Na ₂ SeO ₃	84,00±1,00**	186,67±29,28	9,27±0,14
4	0,005% Na ₂ SeO ₄	85,67±1,46*	186,67±22,81	9,30±0,12
5	0,01% Na ₂ SeO ₄	84,33±0,66**	149,33±9,34	9,33±0,18
6	0,005% KI	82,67±0,69**	117,33±11,40	9,17±0,41
7	0,01% KI	83,67±0,88**	152,00±29,52	9,03±0,26
8	0,005% Na ₂ SeO ₃ +0,005% KI	85,00±2,52	141,33±22,69	9,50±0,31
9	0,005% Na ₂ SeO ₄ +0,005% KI	90,33±2,37	180,00±14,43	9,47±0,22*

Примечание: * Различия с контролем статистически значимы по t-критерию Стьюдента при $p < 0,05$.; ** - Различия с контролем статистически значимы по t-критерию Стьюдента при $p < 0,05$.

По сравнению с контролем высота растений в опытных вариантах в большинстве случаев достоверно снижалась. Самые низкие показатели высоты растений отмечались при внесении растворов KI в концентрациях 0,005% и 0,01%.

Обработка растений пшеницы изучаемыми препаратами привела к незначительному снижению длины колоса. Минимальное значение отмечено в опытном варианте с 0,01% раствором KI и составило 9,03±0,26 см (контроль - 9,80±0,20 см). Количество растений на делянке в сравнении с контрольным вариантом (среднее значение 158,67±9,62 шт.) варьировало как в сторону увеличения при использовании 0,005 и 0,01% растворов Na₂SeO₃, так и в сторону уменьшения значений параметра (при обработке растений растворами KI).

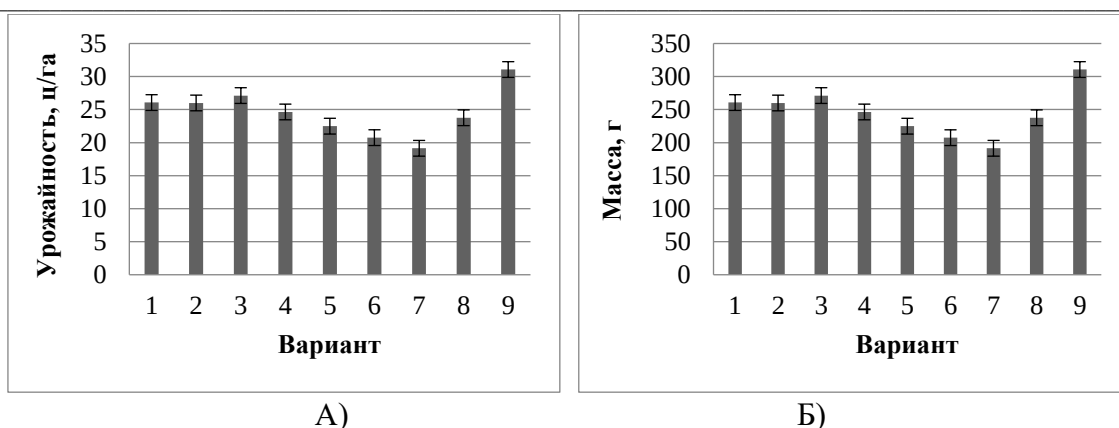


Рисунок 1. Показатели А) урожайности зерна Б) массы зерна яровой пшеницы сорта Дархан-193 на 1 м²

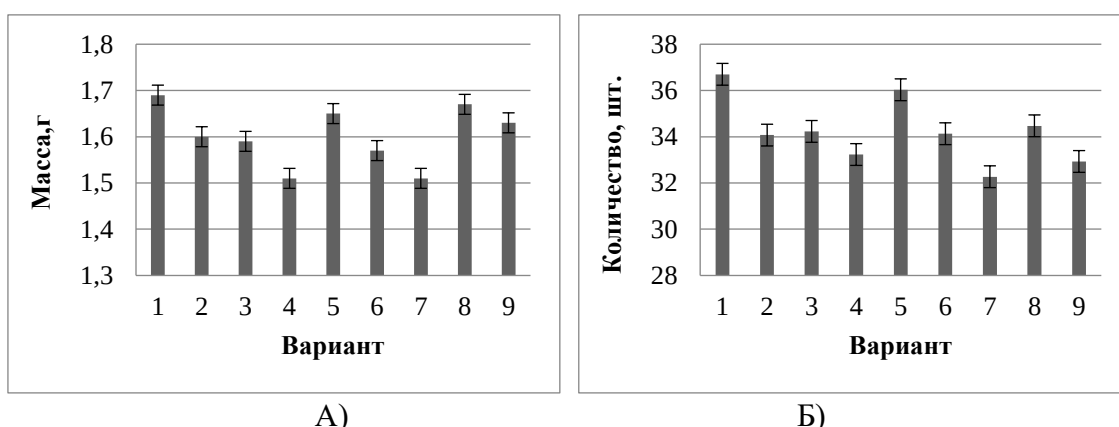


Рисунок 2. Показатели А) массы зерен одного колоса Б) количество зерен в колосе яровой пшеницы сорта Дархан-193

Примечание 1 – контроль; 2 – 0,005 % Na₂SeO₃; 3 – 0,01 % Na₂SeO₃; 4 – 0,005 % Na₂SeO₄; 5 – 0,01 % Na₂SeO₄; 6 – 0,005 % KI; 7 – 0,01 % KI; 8 – 0,005 % Na₂SeO₃+0,005 % KI; 9 – 0,005 % Na₂SeO₄+0,005% KI

Обработка селенитом натрия способствовала проявлению наиболее выраженных положительных эффектов среди всех исследуемых соединений. Несмотря на наблюдаемое снижение массы зерна в одном колосе и их количества, масса семян и общая урожайность либо поддерживались на уровне контроля (0,005% Na₂SeO₃), либо отмечалось увеличение (0,01% Na₂SeO₃) по сравнению с контролем. Данное явление, по-видимому, коррелировало с повышенной плотностью растений на единицу площади, компенсируя снижение индивидуальных параметров растений.

Напротив, растворы йодида калия и селената натрия не оказали благоприятного воздействия ни на развитие растений, ни на параметры урожайности. Применение йодида калия привело к постоянному снижению всех измеряемых параметров при применении микроудобрения в обеих исследуемых дозах. Хотя обработка 0,005% раствором селената натрия способствовала увеличению количества растений на единицу площади, это не привело к повышению урожайности, в отличие от результатов в опыте с применением селенита натрия. Однако совместное применение этих соединений способствовало увеличению показателей роста и развития по сравнению с вариантом 0,005% Na₂SeO₃ + 0,005% KI.

Накопление микроэлементов в пищевых продуктах растительного происхождения происходит в зависимости от вида почвы, ее физических свойств и химического состава, географического расположения района, климатических условий, вида, сорта и стадии вегетации растений, применяемых удобрений и других факторов (Erdenotsogt, 2023). В связи с возможным негативным влиянием избыточных количеств селена, поступивших с

растительной пищей в живой организм, возникает необходимость проводить контроль питания растения по химическому анализу (Wang, 2022). Данные о содержании селена в зерне яровой пшеницы при опрыскивании культуры соединениями селена и йода в различных концентрациях представлены на Рисунке 3.

На всех вариантах с обработкой препаратов отмечалось повышенное содержание селена по сравнению с контролем. Применение селената натрия привело к наиболее интенсивному аккумулярованию селена, при этом наивысшая концентрация (0,01%) привела к 6,4-кратному увеличению содержания селена в зерне по сравнению с контролем, и составляла 0,96 мг/кг.

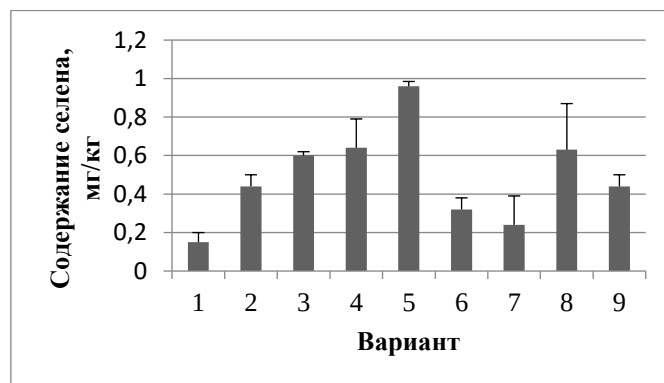


Рисунок 3. Содержание селена в зерне яровой мягкой пшеницы сорта Дархан-193

Примечание 1 – контроль; 2 – 0,005 % Na_2SeO_3 ; 3 – 0,01% Na_2SeO_3 ; 4 – 0,005 % Na_2SeO_4 ; 5 – 0,01 % Na_2SeO_4 ; 6 – 0,005 % KI; 7 – 0,01 % KI; 8 – 0,005 % Na_2SeO_3 +0,005 % KI; 9 – 0,005 % Na_2SeO_4 +0,005 % KI

Установлены прямые линейные зависимости между дозами селена в растворах селенита и селената:

- Селенит: $y_1 = 44,94x_1 + 0,14$, $r = 0,99$ (Уравнение 1)

- Селенат: $y_2 = 80,23x_2 + 0,18$, $r = 0,99$ (Уравнение 2)

где y_1 , y_2 - содержание селена в зерне яровой пшеницы (мг/кг), а x_1 , x_2 - концентрации селена в растворе при некорневой обработке (%).

Полевые исследования позволили рассчитать нормативные коэффициенты интенсивности (b) действия селена в темно-каштановой почве, указывающие на изменения содержания в зерне яровой пшеницы. Эти коэффициенты демонстрируют увеличение содержания селена на 1% увеличения концентрации микроэлемента в растворе: $b = 44,94$ для селенита натрия и $b = 80,23$ для селената натрия.

Одновременное применение селена и йода способствовало значительным изменениям содержания селена в зерне яровой мягкой пшеницы.

В целом исследования по изучению особенностей накопления селена в зерне яровой мягкой пшеницы позволили выявить следующие закономерности:

- накопление селена зависит от способа его применения;
- при различных способах его внесения существует прямая зависимость концентрации селена в растениях от дозы поступления (Yerzhanova и др., 2025; Zharkova, 2020).

В полевых условиях при питании растений возникают сложные взаимосвязи между ионами макро- и микроэлементов, обусловленные взаимодействием не только между двумя, но и большим количеством ионов. Эти взаимосвязи осложняются почвенными условиями и применением удобрений, оказывающими влияние на изменение состава почвенного раствора. Познавание взаимосвязей очень важно для разработки диагностики питания растений, в том числе при применении микроудобрений.

Нашими исследованиями установлено влияние некорневого внесения йода и селена на содержание микроэлементов, определяемых при агроэкологическом мониторинге.

Одним из существенных показателей качества растениеводческой продукции, свидетельствующий об ее экологической безопасности, является элементный химический состав, в частности, содержание тяжелых металлов.

В наших исследованиях изучено взаимодействие селена с микроэлементами при поступлении в растения яровой пшеницы в условиях севера Монголии.

Исследования показали, что характер взаимоотношений при поступлении их в растения во многом определяется биологическими особенностями растений, физико-химическими свойствами селен-содержащих препаратов, применяемых в качестве микроудобрений. При опрыскивании раствором селенита натрия с концентрацией Se 0,01% содержание кадмия снижается в зерне пшеницы на 38% ($P < 0,05$), в то же время при применении селената натрия с аналогичной дозой Se содержание кадмия в зерне увеличивается в среднем на 32% ($P < 0,05$). Таким образом, отмечаются как явления антагонизма, так и синергизма в паре селен-кадмий. Отмечены положительные взаимосвязи в паре селен-цинк, селен-медь. Например, при некорневом поступлении раствора селенита натрия с концентрацией Se 0,01% содержание цинка в зерне пшеницы увеличивается на 16% ($P < 0,05$), меди – на 28,9% ($P < 0,05$).

Взаимодействие селена и никеля, селена и свинца в условиях проведенных исследований характеризуется проявлением антагонизма. Так, при применении селена в дозе 0,01% содержание свинца снижается в среднем на 75 и 78% ($P < 0,05$) соответственно для селенита и селената натрия.

Таким образом, чтобы судить о характере взаимоотношений ионов в растениях, следует знать фактически сложившийся баланс элементов питания внутри растительного организма. Установленные нами зависимости поступления одних элементов от содержания других можно использовать для прогноза влияния микроэлементов (в частности, селена) на химический состав растений и формирование продукционного процесса.

4. Обсуждение

Острая потребность различных стран мира в ликвидации полимикроэлементозов делает исследования возможностей сочетанной биофортификации сельскохозяйственных растений I и Se приоритетными, поскольку именно такой подход может обеспечить недорогой и высокоэффективный способ улучшения I и Se статуса и улучшения здоровья населения. Исследования показали, что совместное применение микроэлементов под яровую мягкую пшеницу в оптимальных дозах положительно сказывается на росте и развитии растений. В то же время при поступлении микроэлементов в почву в исследуемых дозах может возникнуть экологическая проблема, связанная с избыточным накоплением ряда химических элементов и, в первую очередь селена и йода, в системе почва-растение-животное. Поэтому с целью обеспечения экологической безопасности при разработке технологии биофортификации необходимо проводить агроэкологический мониторинг и оценку влияния метода обогащения растений на пищевую ценность получаемого продукта.

Данное исследование выявляет несколько закономерностей относительно биофортификации селеном и йодом яровой мягкой пшеницы. Наибольшая эффективность селенита натрия в части обогащения селеном над другими соединениями микроэлемента согласуется с установленной литературой о биодоступности селена и механизмах поглощения растениями.

Неодинаковая эффективность применения селенита и селената отражает их различные метаболические пути и механизмы клеточного поглощения. Повышенный коэффициент интенсивности действия для селената ($b = 80,23$) по сравнению с селенитом ($b = 44,94$) указывает на более эффективную транслокацию и аккумуляцию в зерне, что объясняется большей подвижностью селената в сосудистых системах растений.

Негативные эффекты, наблюдаемые при обработке йодидом калия, могут отражать фитотоксические реакции при применяемых концентрациях, что указывает на необходимость оптимизации применения йода в качестве микроэлемента. Эффекты взаимодействия между соединениями селена и йода указывают на потенциальные синергические или

антагонистические отношения, которые могут значительно влиять на стратегии биофортификации.

Установленные линейные зависимости и прогностические модели предоставляют ценные инструменты для применения в точном земледелии, позволяя планировать целенаправленное обогащение селеном и йодом при сохранении агрономических показателей. Однако сложные взаимодействия, наблюдаемые между различными микроэлементами, подчеркивают необходимость комплексной оценки подходов к биофортификации несколькими элементами.

Полученные результаты подтверждают возможность применения агрохимического метода, в частности, некорневой обработки селеном, для решения проблемы дефицита микронутриентов, одновременно подчеркивая необходимость выбора соединений, приемов, доз применения для достижения оптимальных результатов.

Также необходимо отметить, что на качество растениеводческой продукции, в частности, в условиях применения микроэлементов в качестве удобрений, значительно влияют взаимосвязи ионов при поступлении их в растительный организм. Как правило, взаимосвязи между элементами питания, в частности, микроэлементами в растениях можно объяснить взаимодействием ионов с биологически активными молекулами, например, ферментативными системами. Особый интерес представляет взаимодействие селена и тяжелых металлов, поскольку это очень важно с позиции экологической безопасности. Как правило, такие взаимосвязи в литературе описываются как антагонизм. Однако исследования показывают, что могут проявляться как явления антагонизма, так и синергизма в зависимости от условий. В наших исследованиях установлены положительные взаимосвязи между селеном и цинком, медью, а отрицательные зависимости между селеном и никелем, свинцом. Неоднозначные взаимосвязи установлены между селеном и кадмием. Очевидно, что характер взаимосвязей при поступлении в растительный организм может зависеть от многих факторов: фазы развития растений, формы, дозы и пути поступления дополнительных количеств микроэлемента в растения. Изучение таких механизмов – довольно трудная задача, но она имеет очень большое значение в практической агроэкологии, агрохимии, а также ветеринарии и медицины, поскольку данный фактор может значительно повлиять на качество кормов.

5. Заключение

Острая потребность различных стран мира в ликвидации полимикроэлементозов делает исследования возможностей как отдельной, так и сочетанной биофортификации сельскохозяйственных растений I и Se довольно перспективными методами, поскольку именно такой подход может обеспечить недорогой и высокоэффективный способ улучшения I и Se статуса и улучшение здоровья населения. Исследования показали, что как отдельное, так и комбинированное внесение микроэлементов под яровую мягкую пшеницу в оптимальных дозах может положительно сказываться на росте и развитии растений. Однако несбалансированное применение микроудобрений в повышенных дозировках может негативно сказаться как на биометрических показателях растений в процессе онтогенеза, так и на снижении продуктивности, урожайности и качества в период физиологической зрелости.

К тому же при поступлении микроэлементов в почву в высоких дозах может возникнуть экологическая проблема, связанная с избыточным накоплением ряда химических элементов, например, селена и йода, в системе почва-растение-животное.

Изучено взаимодействие селена и тяжелых металлов. Установлены положительные взаимосвязи между селеном и цинком, медью, а отрицательные зависимости между селеном и никелем, свинцом. Неоднозначные взаимосвязи установлены между селеном и кадмием. Очевидно, что характер взаимосвязей при поступлении в растительный организм может зависеть от многих факторов: фазы развития растений, формы, дозы и пути поступления дополнительных количеств микроэлемента в растения.

Поэтому с целью обеспечения экологической безопасности при разработке технологии биофортификации необходимо проводить агроэкологический мониторинг и оценку влияния метода обогащения растений на пищевую ценность получаемого продукта.

6. Вспомогательный материал: отсутствует.

7. Вклады авторов

Концептуализация - А.С., Э.Э.; методология - А.С.; программное обеспечение - А.М. В.И.; валидация - А.М., Р.К.; формальный анализ - А.С., А.М., В.И., Р.К.; исследование - Э.Э.; ресурсы - А.С., Э.Э.; курирование данных - А.С.; написание-подготовка оригинального черновика - А.С.; написание-рецензирование и редактирование - А.С., А.М., Р.К.; визуализация - Р.К.; руководство - А.С.; администрирование проекта - А.С.; получение финансирования - А.С. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Синдирева, Анна – д.б.н., заведующая кафедрой геоэкологии и природопользования ШЕН, ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, Россия, 625003; email: a.v.sindireva@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8596-7584>

Эрдэнэцогт, Эрдэнээ - научный консультант, Национальный Центр Общественного Здоровья Монголии, Улан-Батор, Монголия; email: erd625@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0005-6856-0594>

Мангутова, Анна - ассистент кафедры геоэкологии и природопользования ШЕН, ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, Россия, 625003; email: a.k.mangutova@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6489-2069>

Иеронова, Виктория - доцент кафедры геоэкологии и природопользования ШЕН, ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, Россия, 625003; email: v.v.ieronova@utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5404-709X>

Косолапов, Радмир - магистрант кафедры геоэкологии и природопользования ШЕН, ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, Россия, 625003; email: stud0000265202@study.utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5581-9717>

9. Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и МОНСМ в рамках научного проекта №20-55-44028.

10. Благодарности: отсутствует.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Aleksandrovskaya, E.Yu., Sindireva, A.V., Golubkina, N.A., Chuyanova, G.I. (2016). Vliyanie selen na urozhaynost' i pokazateli kachestva zerna yarovoy myagkoy pshenitsy v usloviyakh yuzhnoy lesostepi omskoy oblasti [The influence of selenium on yield and grain quality indicators of spring soft wheat in the conditions of the southern forest-steppe of the Omsk region]. *Biologicheskie nauki*, 96.
2. Bano, I., Skalickova, S., Sajjad, H., Skladanka, J., Horky, P. (2021). Uses of selenium nanoparticles in the plant production. *Agronomy*, 11(11), 2229. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112229>
3. Yerzhanova, A., Baranovskaya, N., Khussainov, A., Zhumay, Y., Sarsembin, U., Niyazova, A., Akhmetzhan, A. (2025). Statistical indicators of the concentration of chemical elements in biological tissues in the Akmola region. *International Journal of Environmental Impacts*, 8(3), 501–510.

4. Danso, O.P., Asante-Badu, B., Zhang, Z., Song, J., Wang, Z., Yin, X., Zhu, R. (2023). Selenium biofortification: Strategies, progress and challenges. *Agriculture*, 13(2), 416. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020416>
5. Erdenotsogt, E., Sindireva, A.V. (2023). Otsenka effektivnosti primeneniya selenosoderzhashchikh udobreniy dlya obogashcheniya yarovoy myagkoy pshenitsy v tselyakh korrektsii selenovogo statusa naseleniya Mongolii [Assessment of the effectiveness of selenium-containing fertilizers for spring wheat enrichment to correct selenium status of the population of Mongolia]. *Voprosy pitaniya*, 92(S5), 268–269.
6. Glagoleva, O.N., Vilms, E.A., Turchaninov, D.V., Turchaninova, M.S., Menshchikova, Yu.V., Brusentsova, A.V. (2025). Gigienicheskaya otsenka potrebleniya pishchevoy soli vzroslym naseleniem Omskoy oblasti: dannye epidemiologicheskogo monitoringa (2006–2023 gg.) [Hygienic assessment of dietary salt consumption by adult population of Omsk region: Epidemiological monitoring data (2006–2023)].
7. Golubkina, N.A., Poluboyarinov, P.A., Sindireva, A.V. (2017). Selen v produktakh rastitel'nogo proiskhozhdeniya [Selenium in plant-derived products]. *Voprosy pitaniya*, 86(2), 63–69.
8. Golubkina, N.A., Sindireva, A.V., Zaytsev, V.F. (2017). Vnutriregional'naya variabel'nost' selenovogo statusa naseleniya [Intraregional variability of selenium status of the population]. *Yug Rossii: Ekologiya, razvitie*, 12(1), 107–127.
9. Golubkina, N., Kharchenko, V., Caruso, G. (2022). Selenium: Prospects of functional food production with high antioxidant activity. In Reference Series in Phytochemistry, 149–175. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95510-7_6
10. Golubkina, N., Amagova, Z., Kharchenko, V., Bogachuk, M., Makarenko, M., Paleeva, M., Malinkin, A., Andreeva, K., Kavarnakaeva, Z., Matsadze, V., Murariu, O.C., Caruso, G. (2024). Effect of foliar selenate supplementation on biochemical characteristics of purslane weed (*Portulaca oleracea* L.). *Horticulturae*, 10(7), 708. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10070708>
11. Golubkina, N., Kharchenko, V., Moldovan, A., Antoshkina, M., Ushakova, O., Şekara, A., Stoleru, V., Murariu, O.C., Tallarita, A.V., Sannino, M., Caruso, G. (2024). Effect of selenium and garlic extract treatments of seed-addressed lettuce plants on biofortification level, seed productivity and mature plant yield and quality. *Plants*, 13(9), 1190. <https://doi.org/10.3390/plants13091190>
12. Golubkina, N., Sheshnitsan, S., Koshevarov, A., Pirogov, N., Plotnikova, U., Tallarita, A.V., Murariu, O.C., Merlino, L., Caruso, G. (2024). Peculiarities of plant mineral composition in semi-desert conditions. *International Journal of Plant Biology*, 15(4), 1229–1249. <https://doi.org/10.3390/ijpb15040089>
13. Gupta, M., Gupta, S. (2017). An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>
14. Kapitalchuk, M.V., Golubkina, N.A., Kapitalchuk, I.P. (2023). Soderzhanie selena v volosakh naseleniya Respubliki Moldova [Selenium content in hair of the population of the Republic of Moldova]. *Ekologiya cheloveka*, 5, 363–373. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2023-5-363-373>
15. Kolbert, Z., Lehotai, N., Molnár, Á., Feigl, G. (2016). “The roots” of selenium toxicity: A new concept. *Plant Signaling & Behavior*, 11(10), e1241935. <https://doi.org/10.1080/15592324.2016.1241935>
16. Samynathan, R., Venkidasamy, B., Ramya, K., Muthuramalingam, P., Shin, H., Kumari, P.S., Thangavel, S., Sivanesan, I. (2023). A recent update on the impact of nano-selenium on plant growth, metabolism, and stress tolerance. *Plants*, 12(4), 853. <https://doi.org/10.3390/plants12040853>
17. Sheshnitsan, S., Golubkina, N., Sheshnitsan, T., Murariu, O.C., Tallarita, A.V., Caruso, G. (2024). Selenium and heavy metals in soil–plant system in a hydrogeochemical province with high selenium content in groundwater: A case study of the lower Dniester valley. *Soil Systems*, 8(1), 7. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010007>

18. Sindireva, A., Zayko, O., Astashov, V., Borodina, I., Guseva, E., Zaytseva, P. (2022). Analysis of the complete blood count in male Wistar rats exposed to different doses of orally administered sodium selenite. *Archiv EuroMedica*, 12, 15–16.
19. Sindireva, A., Golubkina, N., Bezuglova, H., Fedotov, M., Alpatov, A., Erdenotsogt, E., Şekara, A., Murariu, O.C., Caruso, G. (2023). Effects of high doses of selenate, selenite and nano-selenium on biometrical characteristics, yield and biofortification levels of *Vicia faba* L. cultivars. *Plants*, 12(15), 2847. <https://doi.org/10.3390/plants12152847>
20. Sindireva, A.V., Erdenetsogt, E., Golubkina, N.A., Guryev, N.E. (2024). Integral'nyy podkhod k normirovaniyu deystviya selena v sisteme pochva–rasteniye–zhivotnoe dlya razrabotki nauchno-obosnovannoy profilaktiki mikroelementozov v regionakh Rossii i Mongolii [An integrated approach to standardizing selenium action in the soil-plant-animal system for developing scientifically based prevention of microelementoses in the regions of Russia and Mongolia]. Izdatel'skiy tsentr Kan.
21. Sindireva, A.V., Zayko, O.A., Mangutova, A.K. (2025). Ekologo-toksikologicheskaya otsenka vozmozhnosti primeneniya selena dlya korrektsii svintsovoy intoksikatsii u kryss [Ecological-toxicological assessment of the possibility of using selenium for correction of lead intoxication in rats]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 1, 168–176.
22. Skrypnik, L., Feduraev, P., Golubkina, N., Maslennikov, P., Antipina, M., Katserov, D., Murariu, O.C., Tallarita, A.V., Caruso, G. (2024). Foliar spraying of selenium in inorganic and organic forms stimulates plant growth and secondary metabolism of sage (*Salvia officinalis* L.) through alterations in photosynthesis and primary metabolism. *Scientia Horticulturae*, 338, 113633. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.113633>
23. Tallarita, A.V., Golubkina, N., De Pascale, S., Şekara, A., Pokluda, R., Murariu, O.C., Cozzolino, E., Cenvinzo, V., Caruso, G. (2025). Effects of selenium/iodine foliar application and seasonal conditions on yield and quality of perennial wall rocket. *Horticulturae*, 11(2), 211. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11020211>
24. Wang, M., Zhou, F., Cheng, N., Chen, P., Ma, Y., Zhai, H., Qi, M., Liu, N., Liu, Y., Meng, L., Bañuelos, G.S., Liang, D. (2022). Soil and foliar selenium application: Impact on accumulation, speciation, and bioaccessibility of selenium in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Frontiers in Plant Science*, 13, 988627. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.988627>
25. Yerzhanova, A., Baranovskaya, N., Khussainov, A., Zhumay, Y., Niyazova, A., Akhmetzhan, A., Sarsembin, U. (2025). Influence of the environment on the chemical element content in women's blood. *International Journal of Environmental Impacts*, 8(3), 203–209.
26. Zharkova, N.N., Sukhotskaya, V.V., Ermokhin, Yu.I. (2020). Soderzhanie nekotorykh biologicheskikh aktivnykh veshchestv i khimicheskikh elementov v lekarstvennom syr'e *Echinacea purpurea* (L.) Moench pod vliyaniem essentsial'nogo mikroelementa Cu [Content of some biologically active substances and chemical elements in medicinal raw materials of *Echinacea purpurea* (L.) Moench under the influence of essential trace element Cu]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 55(3), 588–596. <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2020.3.588rus>

Агроэкожүйелердегі экологиялық инжиниринг: Солтүстік Моңғолия жағдайында жаздық жұмсақ бидайды селенмен байыту

Анна Синдирева, Эрдэнээ Эрдэнэцогт, Анна Мангутова, Виктория Иеронова, Радмир Косолапов

Аннотация. Мақалада селен мен йод микроэлементтерінің жаздық жұмсақ бидайдың (*Triticum aestivum* L.) өсуі мен даму көрсеткіштеріне әсерін кешенді талдау ұсынылған. Далалық тәжірибелер натрий селенитінің, натрий селенатының және калий йодидінің

биометриялық параметрлер мен дақыл өнімділігіне әсерін зерттеді. Нәтижелер тыңайтқыш ретінде микроэлементтердің әртүрлі формалары мен дозаларын қолдануға өсімдіктердің сараланған реакциясын көрсетеді. Натрий селениті масақтың жеке өнімділігінің төмендеуіне қарамастан, өсімдіктердің тығыздығын арттыру арқылы тұрақты өнімділікті қамтамасыз ететін ең айқын оң әсерді көрсетті. Тамырсыз өңдеу үшін қолданылатын селенит пен натрий селенатының ерітінділеріндегі селен концентрациясы мен оның дәндегі құрамы арасында тікелей байланыс орнатылған ($r = 0,99$). Натрий селенатын қолданған кезде селенитпен ($b = 44,94$) салыстырғанда селеннің неғұрлым қарқынды жинақталуы ($b = 80,23$ коэффициенті) байқалады. Натрий селенатының ерітіндісіндегі селеннің максималды концентрациясында (0,01%) бидай дәніндегі микроэлементтердің мөлшері бақылаумен салыстырғанда 6,4 есе өсті.

Түйін сөздер: биофортификация, жаздық бидай, селен (Se), йод (I), тамырдан тыс азықтандыру

Ecological engineering in agroecosystems: selenium enrichment of spring soft wheat under the conditions of Northern Mongolia

Anna Sindireva, Erdenee Erdenetsogt, Anna Mangutova, Victoria Ieronova, Radmir Kosolapov

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the influence of selenium and iodine micronutrients on the growth and development indicators of spring soft wheat (*Triticum aestivum* L.). Field experiments were conducted to study the effect of sodium selenite, sodium selenate and potassium iodide on the biometric parameters and yield of the crop. The results demonstrate a differentiated response of plants to the application of various forms and doses of trace elements as fertilisers. Sodium selenite showed the most pronounced positive effect, ensuring stable yield by increasing plant density, despite a decrease in individual ear productivity. A direct correlation has been established between the concentration of selenium in selenite and sodium selenate solutions used for foliar application and its content in grain ($r = 0.99$). When sodium selenate was used, a more intense accumulation of selenium was observed (coefficient $b = 80.23$) compared to selenite ($b = 44.94$). At the maximum concentration of selenium in the sodium selenite solution (0.01%), the content of the microelement in wheat grain increased 6.4 times compared to the control.

Keywords: biofortification, spring wheat, selenium (Se), iodine (I), foliar feeding

Редакторлар: **Э.Е. Копишев, Н.Е. Рамазанова, Ж.Г. Берденов**

Авторларға арналған нұсқаулықтар,
жарияланым этикасы журнал сайтында енгізілген: <http://bulchmed.enu.kz>

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы.

Химия. География. Экология сериясы.

– 3 (152)/2025 – Астана: ЕҰУ. 234 б.

Шартты б.т. – 20.43. Таралымы – сұраныс бойынша.

Басуға қол қойылды: 30.09.2025

Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://bulchmed.enu.kz>

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті Тел.: +7(71-72) 70-95-00(ішкі 33-207)

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің баспасында басылды