

<https://doi.org/10.32523/hf4n0721>

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

JOURNAL OF ECOLOGY AND SUSTAINABILITY

L.N. Gumilyov
Eurasian National University

Евразийский национальный
университет имени Л.Н. Гумилева

2026 Vol. 154 (1)

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, 2026

Astana, 2026

Редакциялық кеңес

Бас редактор: **Зандыбай А.**, б.ғ.к., қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

Бас редактордың орынбасары: **Тазитдинова Р.М.**, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

Жауапты хатшы: **Әділбектегі Г.Ә.**, г.ғ.к., қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

Редакция алқасы

Есенжолов Б.Х. - PhD, Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан

Жамангара А.К. - к.б.н., доцент, Астана Халықаралық университеті, Астана, Қазақстан

Илеш А. - PhD, проф., Оради университеті, Оради, Румыния

Мендыбаев Е.Х. - б.ғ.к., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Муратов Р.М. - PhD, Астана Халықаралық университеті, Астана, Қазақстан

Мустафаев Ж.С. - т.ғ.д., проф., География және су қауіпсіздігі институты, Алматы, Қазақстан

Рамазанова М. - PhD, қауымдас. проф., Портукаленсе университеті, Порту, Қазақстан

Саспугаева Г.Е. - PhD, қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Онай Т.Т. - PhD, проф., Богазичи университеті, Стамбул, Түркия

Журнал «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы» басылымының құқықтық мұрагері (1995 жылдан бастап шығарылып келеді).

Журналдың атауын өзгерту ребрендинг және Қазақстан Республикасы мәдениет және ақпарат министрлігінде қайта тіркеу нәтижесінде жаңа тіркеу нөмірі № KZ70VPY00137867, 25.12.2025 шығарылды.

Меншіктенуші: «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ.

Жиілігі: жылына 4 рет.

Тілдер: қазақ, ағылшын, орыс.

Редакцияның мекенжайы: 010000, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі 13.

E-mail: ecologyjournal@enu.kz

Техникалық хатшы: PhD, қауымдас. проф., Саспугаева Г.Е.

JOURNAL OF ECOLOGY AND SUSTAINABILITY

Editorial board

Editor-in-Chief: **Zandybay A.**, Cand.biol.sci., Assoc. prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Deputy Editor-in-Chief: **Tazitdinova R.M.**, PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Executive Secretary: **Adilbektegi G.A.**, Cand.geogr.sci., Assoc. prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editorial board

Yesenzholov B.Kh. - PhD, Sh. Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan

Zhamangara A.K. - PhD, Assoc.prof., Astana International University, Astana, Kazakhstan

Ilies A. - PhD, prof., Oradea University, Oradea, Romania

Mendybayev E.Kh. - Cand.biol.sci, prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Muratov R.M. - PhD, Astana International University, Astana, Kazakhstan

Mustafayev Zh.S. - Dr. Tech. Sci., prof., Institute of Geography and Water Security, Almaty, Kazakhstan

Ramazanova M. - PhD, Assoc. prof., University of Porto, Portugal

Saspugayeva G.Y. - PhD, Assoc. prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Onay T.T. - PhD, Prof., Bogazici University, Istanbul, Turkey

The journal is the successor of the Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series (published since 1995).

As a result of rebranding of the journal name change, and re-registration with the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan, a new registration number № KZ70VPY00137867, issued on 25.12.2025.

Owner: Non-Commercial Joint Stock Company «L.N. Gumilyov Eurasian National University».

Frequency: 4 times a year.

Languages: Kazakh, English, Russian.

Editorial office address: 010000 Kazakhstan, Astana, Kazhymukan str. 13.

E-mail: ecologyjournal@enu.kz

Technical secretary: PhD, Assoc. prof., Saspugayeva G.Y.

JOURNAL OF ECOLOGY AND SUSTAINABILITY

Редакционный совет

Главный редактор: **Зандыбай А.**, к.б.н., ассоц. проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Заместитель главного редактора: **Тазитдинова Р.М.**, PhD, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Ответственный секретарь: **Адилбектеги Г.А.**, к.г.н., ассоц. проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Редакционная коллегия

Есенжолов Б.Х. - PhD, Университет им. Ш. Уалиханова, Кокшетау, Казахстан

Жамангара А.К. - к.б.н., доцент, Международный университет Астана, Астана, Казахстан

Илеш А. - PhD, проф., Университет Оради, Оради, Румыния

Мендыбаев Е.Х. - к.б.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Муратов Р.М. - PhD, Международный университет Астана, Астана, Казахстан

Мустафаев Ж.С. - д.т.н., проф., Институт географии и водной безопасности, Алматы, Казахстан

Рамазанова М. - PhD, ассоц. проф., Университет Портукаленсе, Порту, Португалия

Саспугаева Г.Е. - PhD, ассоц. проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Онай Т.Т. - PhD, проф., Университет Богазичи, Стамбул, Турция

Журнал является правопреемником Вестника Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. Серия Химия. География. Экология (издававшегося с 1995 года).

В результате ребрендинга журнала, изменения названия и перерегистрации в Министерстве культуры и информации Республики Казахстан, изданию присвоен новый регистрационный номер № KZ70VPY00137867, выданный 25.12.2025.

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

Периодичность: 4 раза в год.

Языки: русский, казахский, английский.

Адрес редакции: 010000 Казахстан, г. Астана, ул. Кажымукана, 13.

E-mail: ecologyjournal@enu.kz

Технический секретарь: PhD, ассоц. проф., Саспугаева Г.Е.

МАЗМҰНЫ/ CONTENT/ СОДЕРЖАНИЕ

С. Ахметов, Д. Малахов

Каспий теңізінің Қазақстан секторының жағалау сызығының өзгеруін жерді қашықтықтан зондау деректеріне негізделген талдау және бұл өзгерістердің жағалық аймақ экожүйесіне әсері

С. Ахметов, Д. Малахов

Анализ изменения береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря на основе данных дистанционных средств измерений в контексте их влияния на экосистему прибрежной зоны

S. Akhmetov, D. Malakhov

Analysis of shoreline changes in the Kazakh sector of the Caspian sea based on remote sensing data in the context of their impact on the coastal zone ecosystem

7

Ж. Байгазинов, Е. Поливкина, Н. Мухамедияров, К. Жумадилов, С. Сальменбаев, Л. Кенжина

Қалқымалы бөлшектер (PM_{2.5} және PM₁₀): заманауи түсініктер және токсикологиялық бағалау

Ж. Байгазинов, Е. Поливкина, Н. Мухамедияров, К. Жумадилов, С. Сальменбаев, Л. Кенжина

Взвешенные частицы (PM_{2.5} и PM₁₀): современные представления и токсикологическая оценка

Zh. Baigazinov, Y. Polivkina, N. Mukhamediyarov, K. Zhumadilov, S. Salmenbayev, L. Kenzhina
Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀): current concepts and toxicological assessment

27

Г. Бугубаева, С. Әбілкасова, М. Сүлейменова, Ж. Шаихова, Ж. Әлімқұлова

Алматы қаласының Алмалы ауданындағы тұрмыстық және ауыз судың сапасы мен қауіпсіздігін кешенді бағалау

Г. Бугубаева, С. Абилкасова, М. Сулейменова, Ж. Шаихова, Ж. Алимқұлова

Комплексная оценка качества и безопасности хозяйственно-питьевой воды Алмалинского района г. Алматы

G. Bugubaeva, S. Abilkasova, M. Suleimenova, Zh. Shaikhova, Zh. Alimkulova

Comprehensive assessment of the quality and safety of domestic and drinking water in the Almalinsky district of Almaty

42

К. Дакиева, Г. Калелова, С. Құмарбекұлы, С. Бакин, С. Гармашова, В. Седелев, Р. Бейсембаева, А. Цыганов

Уытты заттардың бөлек және аралас әсері кезіндегі гемокоагуляция жүйесі көрсеткіштерінің өзгергіштігі

К. Дакиева, Г. Калелова, С. Кумарбекұлы, С. Бакин, С. Гармашова, В. Седелев, Р. Бейсембаева, А. Цыганов

О вариабельности показателей системы гемокоагуляции при раздельном и комбинированном действии токсических веществ

K. Dakieva, G. Kalelova, S. Kumarbekuly, S. Bakin, S. Garmashova, V. Sedelev, R. Beysenbaeva, A. Tsyganov

On the variability of hemocoagulation system parameters under the separate and combined action of toxic substances

55

Е. Досжанов, Д. Ахметжанова, А. Жумажанов, О. Досжанов, З. Нұрбол, М. Оспан

Ауыл шаруашылығында ылғалды сақтауды арттыру мақсатында активтендірілген көмірді биомассадан дайындау мен оңтайландыру

Е. Досжанов, Д. Ахметжанова, А. Жумажанов, О. Досжанов, З. Нұрбол, М. Оспан

Разработка и оптимизация активированного угля из биомассы для повышения водосбережения в сельском хозяйстве

Ye. Doszhanov, D. Akhmetzhanova, A. Zhumazhanov, O. Doszhanov, Z. Nurbol, O. Magzhan

Development and optimization of biomass-derived activated carbon for enhancing water retention in agriculture

77

Л. Калимолдина, Ж. Шаихова, Г. Султангазиева, Г. Жақсыбаева, Ш. Аскарова

- Жасыл технологияда фиторемедиацияны қолдану әдістерін зерттеу*
Л. Калимолдина, Ж. Шаихова, Г. Султангазиева, Г. Жақсыбаева, Ш. Аскарова
Изучение методов применения фиторемедиации в зеленой технологии
L. Kalimoldina, Zh. Shaikhova, G. Sultangazieva, G. Zhaksybayeva, Sh. Askarova
Study of phytoremediation application methods in green technology 93
- Б. Капсалям, Г. Жолмуратова**
Су объектілерінің экологиялық сапасына арналған өңірлік стандарттардың қажеттілігі: Елек өзені алабы, Қазақстан
Б. Капсалям, Г. Жолмуратова
Обоснование необходимости региональных стандартов экологического качества водных объектов: бассейн реки Илек, Казахстан
B. Kapsalyamov, G. Zholmuratova
Justification for the necessity of regional environmental quality standards for water bodies: the Ilek river basin, Kazakhstan 109
- В. Messyasz, В. Leska**
Гипертрофты көлдің экологиялық қалпына келуінің индикаторлары ретінде фитопланктон мен перифитонның ұзақ мерзімді динамикасы: Дуровское көлі, Польша
В. Messyasz, В. Leska
Долгосрочная динамика фитопланктона и перифитона как индикаторов экологического восстановления гипертрофного озера: озеро Дуровское, Польша
В. Messyasz, В. Leska
Long-term phytoplankton and periphyton dynamics as indicators of ecological recovery in a hypertrophic lake: lake Durowskie, Poland 123
- Ә. Сейітқазиев, Ж. Тұлеубаев, Г. Зияева, К. Мұсабеков**
Жер асты суының нақты деңгейлерін анықтау әдістері
А. Сейтқазиев, Ж. Тұлеубаев, Г. Зияева, К. Мұсабеков
Методы определения точных уровней грунтовых вод
A. Seitkaziev, Zh. Tuleubayev, G. Ziyayeva, K. Musabekov
Methods for determining the actual water levels of the buzz 139

Анализ изменения береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря на основе данных дистанционных средств измерений в контексте их влияния на экосистему прибрежной зоны

Серик Ахметов^{1*}, Дмитрий Малахов²

¹НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря», Актау, Казахстан; serik.akhmetovkz@gmail.com

²РГП на ПХВ «Институт зоологии» КН МНВО РК Алматы, Казахстан; dmitry.malakhov@zool.kz

*Корреспонденция: serik.akhmetovkz@gmail.com

Аннотация. За последние десятилетия береговая линия казахстанского сектора Каспийского моря все более заметно претерпевает изменения вследствие колебаний уровня моря. Основными воздействующими факторами являются природные и антропогенные факторы. Все эти изменения оказывают существенное влияние на прибрежную экосистему западного региона республики. Колебания уровня моря, изменения режима и объема стока приточных рек, а также хозяйственная деятельность человека служат причинами деградации территорий водно-болотных угодий и сокращения площади водного зеркала моря. Все эти факторы оказывают влияние на трансформацию структуры прибрежного рельефа.

Для исследования изменения береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря были использованы данные дистанционного зондирования Земли MODIS, Landsat и Sentinel-2. Дополнительно для более развернутого пространственного анализа были организованы полевые наблюдения на ключевых участках с применением дронов.

Комплексное использование двух методов дало возможность выявить пространственно-временные тенденции изменения экосистемы. По полученным результатам можно сделать вывод о том, что в период с 2000 по 2025 год общая площадь водного зеркала моря сократилась до 16 834 км². Наиболее значительные изменения прибрежной территории наблюдаются в северной части казахстанского сектора Каспийского моря.

По данным наблюдений установлено, что на участках Пешной, Прорва, Мёртвый Култук, Новинского заказника и резервата «Акжайык» формируются мелководные зоны, солончаки и пустынные ландшафты. Такое преобразование территории приводит к сокращению природных местообитаний для различных видов организмов и существенной деградации экосистемы.

Результаты анализа и оценки подчеркивают системный характер трансформации экосистем казахстанского сектора Каспийского моря и всей прибрежной территории. Таким образом подчеркивается актуальность необходимости регулярного мониторинга, оценки гидрологического баланса и разработки стратегий сохранения и восстановления прибрежных биотопов.

Цитирование: Ахметов, С., Малахов, Д. (2026). Анализ изменения береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря на основе данных дистанционных средств измерений в контексте их влияния на экосистему прибрежной зоны. *Journal of Ecology and Sustainability*, 154(1), 7-26 https://doi.org/10.32523/8gwpt_a33

Академический редактор:
А. Зандыбай

Поступила: 17.12.2025
Исправлена: 25.02.2026
Принята: 18.03.2026
Опубликована: 31.03.2026



Copyright: © 2026 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: дистанционное зондирование; MODIS; Landsat; Sentinel-2; мониторинг прибрежных зон; экосистема.

1. Введение

При изучении динамики Каспийского моря особое значение имеет возможность анализа долгосрочных изменений. Долгосрочная динамика режимов находится под влиянием как естественных климатических факторов, так и усиливающейся с годами антропогенной нагрузки. Использование архивных спутниковых данных дает возможность определить устойчивые тенденции в изменениях динамики разных параметров за несколько десятилетий наблюдений. К такого рода параметрам относятся: уровень воды, температурные характеристики, распределение ледового покрова и изменения прибрежной территории.

Сопоставительный анализ современных условий с предыдущими этапами изменения морской среды является ценной научной основой; такие мониторинговые данные необходимы для оценки масштабов происходящих трансформаций (Lebedev et al., 2008; Yeltay, 2022; Ivkina et al., 2015; Yeltay et al., 2023).

Многие ученые (Badulin et al., 2025; Ashtab et al., 2024; Court et al., 2025; Mamaeva, 2023; Kostianou et al., 2022) в своих исследованиях показывают, что комплексный анализ с использованием спутниковых данных дает возможность существенно повысить качество анализа. Во многих работах совместно с данными дистанционного зондирования используются результаты модельного расчета и стационарные наблюдения, что способствует развитию научных представлений о функционировании Каспийского моря как сложной природной системы.

Во многих исследованиях (Kostianou et al., 2018; Sagatdinova et al., 2023; Dyakonov et al., 2019; Brekke et al., 2005; Sagatdinova et al., 2024; Ghorbani et al., 2023) подчеркивается, что дистанционное зондирование является эффективным инструментом для описания и визуализации текущего состояния морской среды. Также дистанционное зондирование является инструментом решения ряда прикладных задач. К таким видам задач относятся: обеспечение безопасности морской деятельности, прогнозирование опасных природных явлений и экологический контроль.

Использование спутниковых данных дает возможность оперативно выявлять аномально критические изменения характеристик водной среды. Современные методы и инструменты повышают тем самым эффективность управленческих решений в прикаспийском регионе (Ivanov et al., 2016; Nezhlin et al., 2012).

Также существуют отдельные направления исследований, входящих в состав спутниковых наблюдений (Chen et al., 2024; Cavalli, 2024), связанные с анализом и оценкой взаимодействия гидрологических, физических и биологических процессов. К такому виду процессов относятся: изменения температурного режима, циркуляция водных масс и содержание взвешенных веществ. Эти процессы оказывают прямое влияние на продуктивность экосистемы и на пространственное распределение биоты. Данные дистанционного зондирования в таких исследованиях являются важным источником информации для комплексного междисциплинарного исследования. Междисциплинарные исследования объединяют в себе сразу несколько важных методов, таких как физическая океанография, экология и геоинформационные системы (Shiklomanov et al., 2019).

Исходя из вышеизложенного, применение дистанционного зондирования Земли для исследования Каспийского моря - это не только современное решение, но и важная составляющая для анализа и оценки целостного представления о процессах, происходящих как на акватории, так и на прибрежной части.

По мнению многих ученых (Ivkina, 2023; Sergeeva et al., 2023; Shabanova et al., 2014; Karbassi et al., 2012; Hofmann et al., 2017; Saeidzadeh et al., 2025) в последние десятилетия в

береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря все более заметно проявляются пространственно-временные изменения под влиянием как природных, так и антропогенных факторов. Колебания уровня воды, изменения стока и режима рек, интенсивное развитие прибрежной инфраструктуры и локальные климатические процессы формируют сложную динамику гидрологических и природных процессов. Все это требует детального и системного изучения. В данном исследовании проведен системный и комплексный анализ трансформации береговой зоны казахстанского сектора Каспийского моря. В основу исследования легли данные дистанционного зондирования, мультिवременные архивные спутниковые изображения, результаты геопространственной обработки данных. Дополнительно были использованы данные, полученные благодаря дронам в полевых условиях.

Использование различных методов анализа позволило получить более детальные и развернутые данные для анализа. Обработка данных методами автоматизированного картографирования позволила установить ключевые тенденции смещения береговой линии, а также определить участки с наиболее выраженными изменениями. Полученные вследствие обработки и анализа результаты формируют основу для последующего мониторинга состояния прибрежной зоны и акватории казахстанского сектора Каспийского моря. Данная работа может послужить основой научно-практической базы для разработки стратегий рационального управления ресурсами и предотвращения возможных рисков. Такие риски напрямую связаны с деградацией береговых экосистем вследствие трансформации береговой линии за счет колебания уровня моря.

Научная новизна исследования заключается в выполнении комплексной количественной оценки динамики береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря с детальным делением на пятилетние периоды. В отличие от ранних опубликованных исследований, в работе представлена интегральная оценка суммарной потери площади водного зеркала, проведено пространственное сопоставление участков с различной интенсивностью осушения в сочетании с материалами полевых наблюдений. В работе также показана неоднородность трансформации побережья, включая особо охраняемые природные территории. Полученные результаты уточняют современные масштабы и темпы регрессии моря в пределах казахстанского сектора Каспийского моря.

2. Материалы и методы

Объектом исследования является береговая линия казахстанского сектора Каспийского моря. Казахстанский сектор Каспийского моря отличается преобладанием мелководных акваторий и высокой чувствительностью к колебаниям уровня моря. Береговая зона отличается разнообразной морфологией, например, в северной части преобладают низменные дельтовые участки с мелководными заливами, в центральной части равнинные побережья с песчаными полосами, на юге встречаются скалистые и полузасушливые участки. Прибрежные территории подвергаются антропогенному влиянию: хозяйственная деятельность, водозабор, развитие инфраструктуры вблизи городов и промышленные объекты. Особое внимание уделено следующим участкам: Пешной, Прорва, Мертвый Култук, Новинский заказник и резерват «Акжайык». Данные участки характеризуются различной морфологией рельефа, гидрологическими условиями и степенью антропогенной нагрузки.

В данном исследовании для анализа динамики береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря использованы данные дистанционного зондирования, которые включают некоммерческие оптико-электронные спутниковые данные различного пространственного разрешения. Анализ выполнен на основе многолетних спутниковых наблюдений за период 1994-2025 гг. Полевые исследования проводились в ноябре-декабре 2025 года в прибрежной зоне с применением беспилотных летательных аппаратов (дронов) и GPS-навигатора для уточнения состояния береговой линии. Также такие наблюдения дают возможность фиксации мелководных и осушенных территорий и оценки локальных изменений.

В качестве основы для долгосрочного мониторинга были использованы спутниковые изображения MODIS, характеризующиеся пространственным разрешением порядка 1 км. Данные обеспечивают стабильные многолетние временные ряды наблюдений с 2000 по 2025 годы.

Динамика уровня моря была оценена следующими типами спутниковых данных: Landsat 5 TM и Landsat 7 ETM+. Спутниковые изображения Landsat 5 TM и Landsat 7 ETM+ обеспечивают данные за период с 1994 года по 2000 год. Использование этих спутниковых данных позволило выявить крупномасштабные тенденции изменений береговой зоны. Также были оценены особенности сезонной и межгодовой variability динамики береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря. В связи с необходимостью уточнения площадей зеркала моря на ключевых участках были использованы данные высокого разрешения Sentinel-2.

Выявление водной поверхности выполнено с применением спектрального индекса MNDWI - Modified Normalized Difference Water Index (Xu, 2006). Индекс рассчитывается по формуле:

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR1}) / (\text{Green} + \text{SWIR1}) \quad (1)$$

где, Green и SWIR1 - соответствующие каналы спутникового изображения. Индекс имеет значения от -1 до 1, водной поверхности соответствуют положительные значения индекса. Индекс применим для всех некоммерческих оптико-электронных сенсоров.

Для обработки большого количества мультимедийных спутниковых данных был разработан «kawa-script» для сервиса Google Earth Engine, обеспечивающий выбор безоблачных спутниковых данных в нужный период, расчет MNDWI и экспорт растровых и векторных данных на локальный ПК. Обработка полученных данных и подготовка картографических материалов проведены в ArcGIP PRO 3.5.

Для выполнения объективной и корректной оценки данных процессов необходимы систематические наблюдения мониторинга с широким пространственным охватом. Использование данных спутниковых изображений MODIS, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ и Sentinel-2 дает возможность оценки всех интересующих процессов.

Комплексное использование спутниковых данных и полевых наблюдений позволило получить точные пространственно-временные показатели трансформации береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря.

3. Результаты

В связи с колебаниями уровня моря береговая линия казахстанского сектора Каспийского моря за последние десятилетия показывает нестабильный и регрессирующий характер. Динамика морского побережья находится под значительным влиянием таких факторов, как колебания уровня моря, изменения гидрологического режима и объема питающих море рек, изменения климатических процессов как регионального, так и локального масштаба и интенсивное развитие прибрежной инфраструктуры.

Казахстанский сектор Каспийского моря с начала текущего столетия показывает устойчивое и заметное сокращение площади водного зеркала. Сокращение водного зеркала приводит к таким последствиям, как постепенное смещение береговой линии в сторону моря и формирование в исследуемых зонах обширных мелководных территорий. По данным исследования установлено, что наиболее выраженные изменения начались после 2005 года. Именно в данный период темпы понижения уровня Каспийского моря возросли, что послужило причиной для более ускоренной деградации прибрежных экосистем и заметного изменения структуры берегового рельефа по всей прибрежной территории моря (рисунок 1).

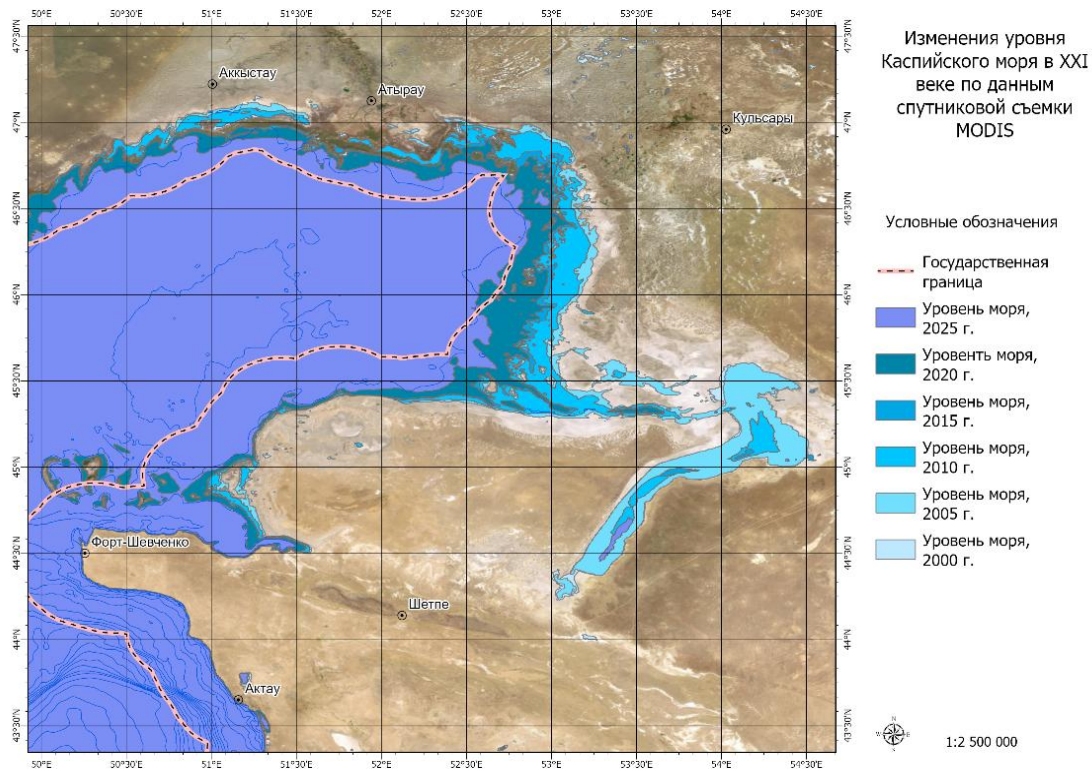


Рисунок 1. Мониторинг уровня моря по всей акватории казахстанского сектора (по данным MODIS)

По данным, представленным на рисунке 1, можно отметить повсеместное увеличение площади осушенных территорий в казахстанском секторе Каспийского моря с 2000 по 2025 годы. Данная тенденция прослеживается на протяжении всего периода исследования. Однако с середины 2010-х годов темпы обмеления увеличились. Вследствие возрастающего влияния факторов, способствующих снижению уровня моря с 2015 по 2025 год, наиболее отчетливо проявляется отступление моря и увеличение обмелевших участков. Данные процессы способствуют трансформации прибрежных зон казахстанского сектора Каспийского моря, расширяя площади вновь образованных сухевых участков и усиливая контрастность береговой морфологии региона.

Воздействующим механизмом процесса осушения территории, увеличения площадей мелководья и существенной трансформации прибрежного рельефа является отступление моря.

Трансформации прибрежных зон казахстанского сектора Каспийского моря были разделены по пятилетним периодам:

1. Первый период - с 2000 по 2005 годы. Данный период можно условно назвать начальной фазой ускорения осушки, в данный период общая площадь обмелевших территорий составила 1449 км². По данным исследования в начале XXI века отступление береговой линии было достаточно умеренным, однако уже заметным. Масштаб осушки в данный период можно характеризовать как ранний индикатор проявления изменений береговой линии. Весь этот процесс связан с перестройкой гидрологического режима Каспийского моря, а именно со снижением уровня моря. Предположительно именно в данный период были сформированы предпосылки последующего ускорения деградации прибрежных зон и регрессии береговой линии.

2. Второй период - с 2005 по 2010 годы. Данный период характеризуется резким скачком осушенных территорий. Общая площадь осушенных территорий составляет 4110 км². Этап уже является первой крупной волной деградации прибрежной территории казахстанского

сектора Каспийского моря. Во втором периоде почти в три раза возросла площадь осушенных территорий по сравнению с первым периодом. Данный процесс указывает на значительное изменение водного баланса в отрицательную сторону, вследствие чего произошло сокращение общей акватории моря и увеличение площадей, обмелевших территории. Увеличение площадей обмелевших территорий в таком объеме указывает на интенсификацию следующих процессов:

- усиление испарения на всей акватории моря;
- уменьшение объемов подпитывающих вод в северную и восточную часть моря;
- ускорение в три раза регрессии береговой линии.

3. Третий период - с 2010 по 2015 годы. В этот период ситуация сравнительно стабилизировалась по сравнению со вторым периодом. Однако в данный период все еще сохраняются высокие значения осушки. Общая площадь осушенных территорий в третьем периоде составляет 4321 км². В третьем периоде общая площадь осушенных территорий практически идентична второму периоду, что указывает на то, что в данный период тенденция постоянного снижения уровня моря была закреплена. Исходя из всех изложенных фактов, можно сделать вывод о том, что практически одинаковые значения площадей, осушенных территории по двум периодам, указывают на стабильную отрицательную фазу моря. В водном балансе моря преобладает отрицательная часть, и приходная часть уже не может компенсировать потери.

4. Четвертый период - с 2015 по 2020 годы. Этот период характеризуется временным замедлением процессов осушения земель. В данный период общая площадь осушенных территорий составила 2010 км². В четвертом периоде площадь осушенных территорий уменьшилась почти в два раза по сравнению с предыдущим периодом. Данное замедление процесса осушения указывает на кратковременную стабилизацию ситуации. Возможно, в этот период происходили климатические изменения, которые положительно сказались на режим моря, в частности на северо-восточную часть, снижая темпы отступления моря. Однако необходимо отметить, что уменьшение темпов регрессии не означает полного прекращения процесса, осушение прибрежной зоны продолжается, однако темпы в данный период замедлились.

5. Пятый период - с 2021 по 2025 годы. Данный период можно назвать новой волной ускорения отступления моря, в этот период общая площадь осушенных территорий составила 4494 км². В этот период возобновляется динамика ускоренного отступления моря вследствие чего наблюдается возвращение к высоким темпам обмеления территорий. Именно в пятом периоде наблюдается самое высокое значение площади осушения территорий среди всех пяти анализируемых периодов. На данный момент, это значение является самой критической осушки для всех этапов казахстанского сектора Каспийского моря.

В ходе анализа было установлено, что с 2000 по 2025 годы общая суммарная потеря водной поверхности казахстанского сектора Каспийского моря составила 16384 км². Это означает, что исчезла значительная прибрежная акватория моря, сопоставимая по площади и масштабу с крупным внутренним водоемом.

По данным результатов, полученных в ходе обработки спутниковых данных, можно сделать вывод о том, что процесс осушения происходит в пространстве неоднородно. В северной части казахстанского сектора Каспийского моря наблюдается наиболее интенсивное сокращение акватории моря, данный процесс может быть связан с особенностями гидрологического баланса и морфологией дельтовых участков. Тем не менее, необходимо отметить, что в центральной и южной части моря также наблюдается выраженная регрессия. Особенно этот процесс регрессии наблюдается в зонах с низкими отметками рельефа, где снижение уровня моря является причиной формирования образования протяженных прибрежных отмелей.

В ходе исследования были рассмотрены отдельные участки обмелевших территорий казахстанского сектора Каспийского моря с целью более детального анализа территории. Для

мониторинга и анализа пространственно-временной изменчивости береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря были использованы спутниковые данные высокого пространственного разрешения (от 10 до 60 м). Использование таких высокодетальных спутниковых данных дает возможность получить более детальную информацию о трансформации прибрежной зоны и отслеживать локальные морфодинамические процессы, происходящие в регионе. Были выбраны следующие ключевые участки осушенных территорий: районы Пешной, Прорва, Мёртвый Култук, Новинский заказник и резерват «Акжайык». Для сравнительного анализа по всем участкам были выбран периоды 1994 и 2025 годов (рисунки 2-6). Водная поверхность, то есть акватория моря была определена на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год). Использование этих методов и инструментов путем наложения данных дает возможность провести сравнительный анализ изменений прибрежной территории за период более чем 30 лет и визуально оценить динамику изменения береговой линии.

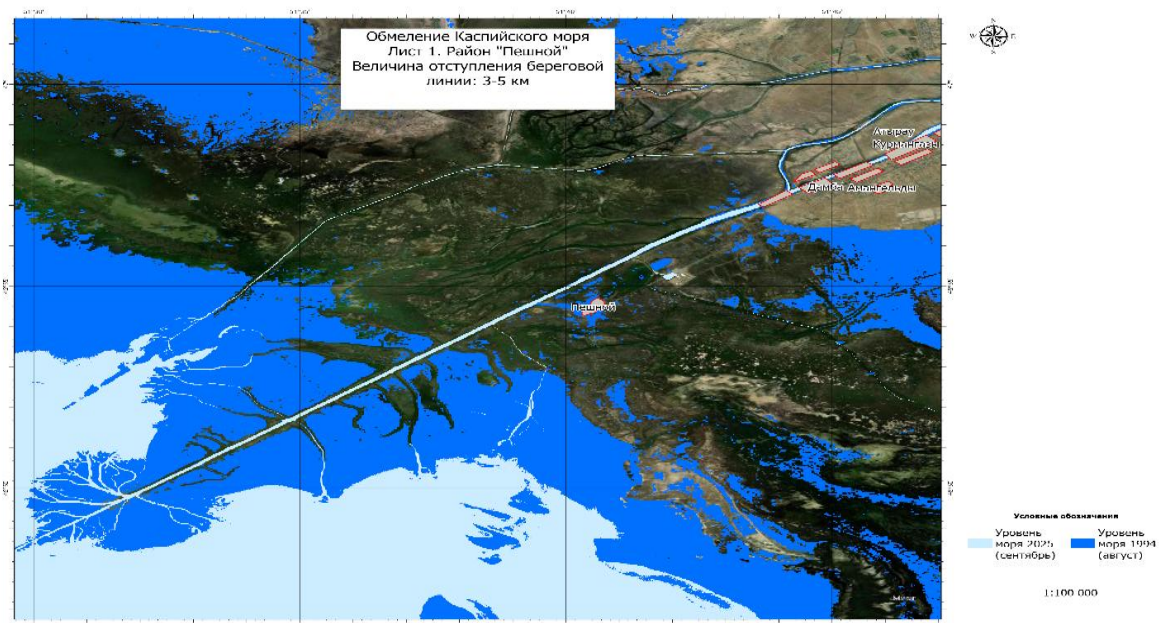


Рисунок 2. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Пешной (на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год))

Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Пешной за 1994 и 2025 годы показывает умеренное, но устойчивое отступление береговой линии. Величина отступления варьируется от 3 до 5 км. Данный процесс показывает стабильное снижение уровня воды и значительную деградацию экосистем исследуемой территории.

В ходе анализа выявлены ключевые особенности изменений прибрежной зоны в районе Пешной:

1. Скорость отступления моря в районе Пешной относительно умеренна по сравнению с другими исследуемыми районами;
2. Осушенные территории характеризуются расширением мелководных зон и образованием широких полос пустынных ландшафтов;
3. Возможно, в районе Пешной изменилась структура грунта, а также снизилась биопродуктивность региона.

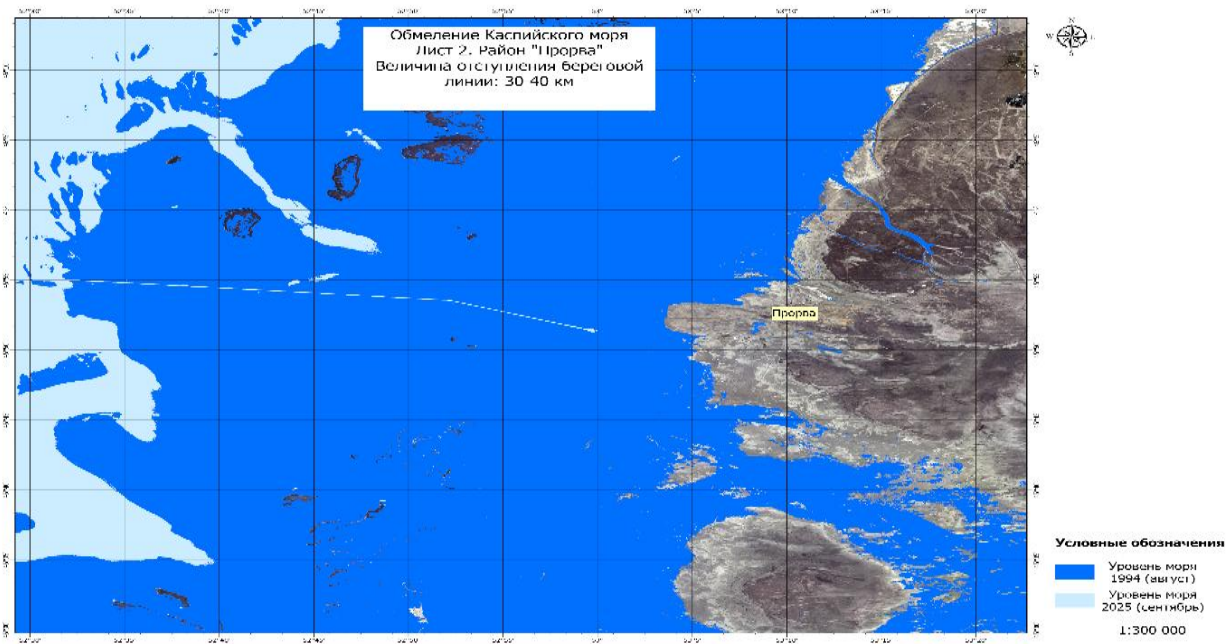


Рисунок 3. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Прорва (на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год))

Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Прорва демонстрирует одно из самых критических значений отступления моря и, следовательно, самые высокие значения площади сдвига береговой линии. Величина отступления береговой линии в районе Прорва составляет от 30 до 40 км, что является самым масштабным сокращением акватории восточной части Каспийского моря.

Были выявлены ключевые особенности изменений прибрежной зоны в районе Прорва:

1. Отступление моря в данном районе носит катастрофический характер;
2. Осушенные территории сильно подвержены ветровой эрозии;
3. Площади солончаков и пустынных ландшафтов в районе Прорва растут в геометрической прогрессии;
4. В случае, если данная тенденция сохранится в районе Прорва, то высока вероятность выпадения или исчезновения ряда биотопов.

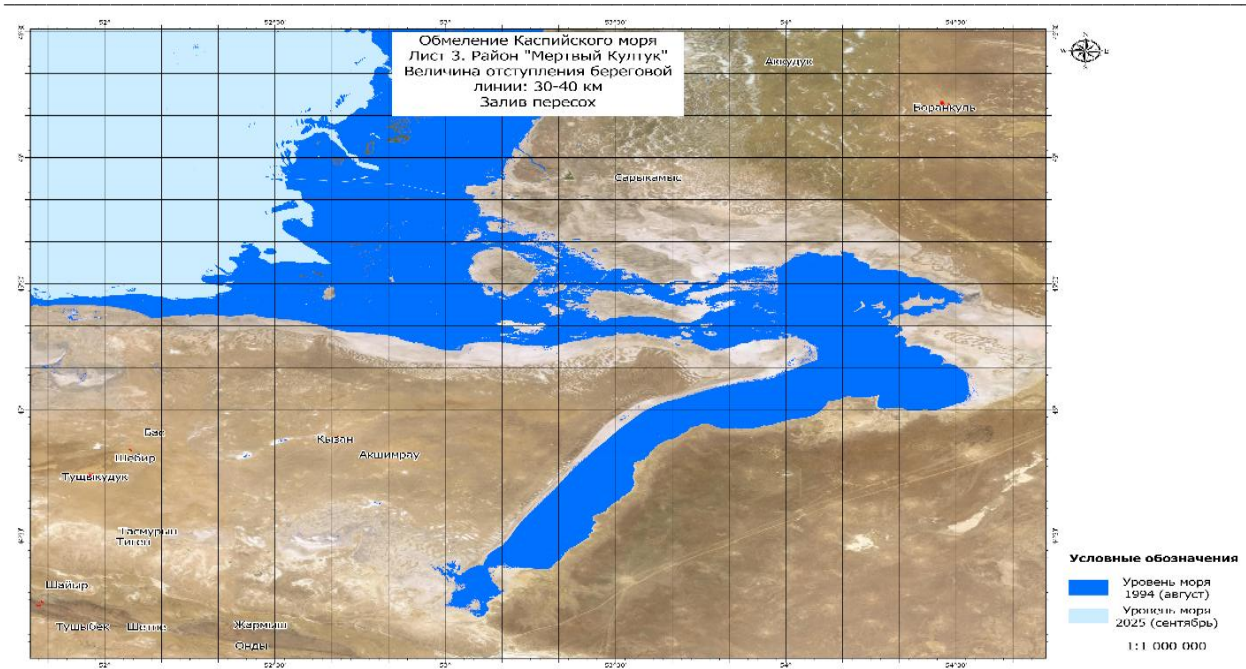


Рисунок 4. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Мёртвый Култук (на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год))

Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Мёртвый Култук показал, что данный район находится в той же критической степени обмеления, что и район Прорва. В районе Мёртвого Култука наблюдается долгосрочное обширное обмеление. Величина отступления береговой линии в данном районе варьируется от 30 до 40 км.

Были выявлены ключевые особенности изменений прибрежной зоны в районе Мёртвый Култук:

1. Визуально можно увидеть, что фактически произошло отступление моря на десятки километров, оставив после отступления обширные пустынные пространства;
2. Осушенные после схода воды территории отличаются высокой соленостью;
3. Вероятно, что в данной местности произошли изменения микроклимата, такие как учащение пыльных бурь и повышение температуры воздуха;
4. Возможно, что вследствие изменения местности среда обитания для большинства водных обитателей исчезла или сильно трансформировалась.

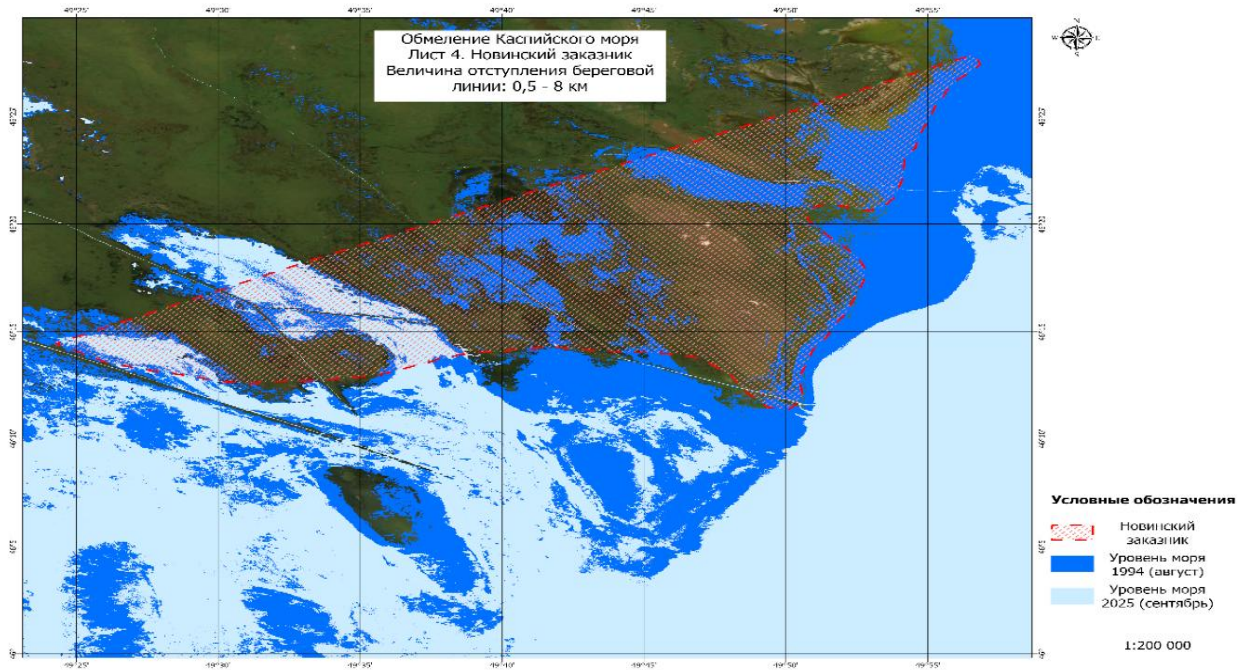


Рисунок 5. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Новинского заказника (на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год))

Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе Новинского заказника показывает, что процесс осушения территории в данной местности происходит неоднородно. Величина отступления берега на отдельных участках составляет 0,5 км, тогда как в других участках может достигать 8 км.

Ниже приведены выявленные ключевые особенности изменений прибрежной зоны в районе Новинского заказника:

1. По данным мониторинга и анализа в определенных участках отступление берега носит незначительный характер, тем самым дает возможность сохранения прибрежных биотопов;
2. Вместе с тем в других соседних участках процесс осушения территории носит более выраженный характер. Вследствие таких изменений прибрежной территории оказывается прямое влияние на места обитания птиц и водно-болотных организмов.

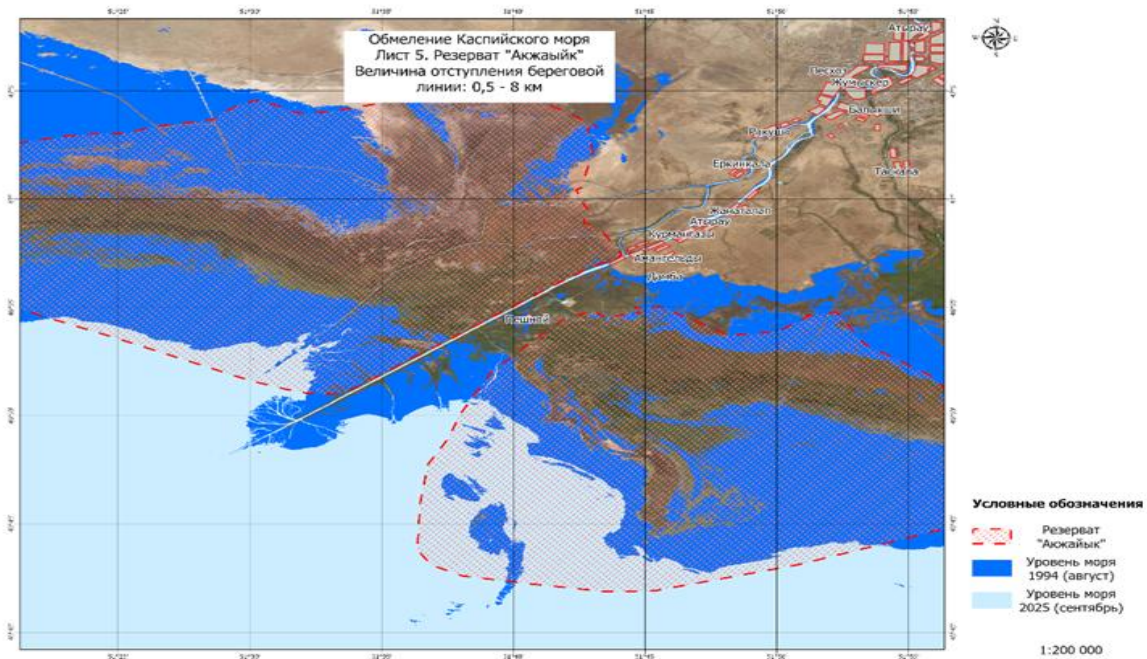


Рисунок 6. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения в районе резервата «Акжайык» (на основе спутниковых данных Landsat (1994 год) и Sentinel-2 (2025 год))

Заповедная территория «Акжайык» является природоохранной территорией, обладающей высокой биологической и природной ценностью. Мониторинг уровня моря на контрольных участках по спутниковым данным высокого разрешения показывает, что в районе резервата «Акжайык» также наблюдается процесс обмеления моря и регрессирующая трансформация прибрежной территории. Вследствие отступа моря на данной территории наблюдается образование новых прибрежных участков. Величина отступления береговой линии на отдельных участках составляет 0,5 км, тогда как на соседних участках достигает 8 км. Данная тенденция осушения представляет прямую угрозу для экосистемы дельты реки Жайык и является тревожным индикатором для существования многих обитателей резервата.

Ниже приведены выявленные ключевые особенности изменений прибрежной зоны в районе резервата «Акжайык»:

1. В результате трансформации прибрежной зоны и сокращения водного зеркала моря в будущем будет оказано негативное воздействие на водоплавающих птиц и других обитателей резервата;
2. Прогрессирование процесса обмеления моря пропорционально увеличивает появление солончаков на бывших плавневых территориях;
3. Низменные участки и дельтовые зоны характеризуются наиболее значимыми изменениями прибрежной территории, так как на этих участках интенсивность осушения максимальна.

В дополнение к работам по дистанционному зондированию Земли, выполненным на ключевых участках - районы Пешной, Прорва, Мёртвый Култук, Новинский заказник и резерват «Акжайык» были организованы полевые исследования для пространственной оценки. Для исследования были использованы дрон-квадрокоптер Dji Mavic 4 pro и GPS-навигатор Garmin etrex 10. Полевые исследования проводились с ноября по декабрь 2025 года. Маршрут охватывал три пункта наблюдений, расположенных вдоль побережья. Были сделаны снимки с дронов, направленные на уточнение состояния береговых процессов.

Первый маршрут проходил вдоль прибрежной зоны Среднего Каспия - на участке между водозаборным каналом №1 и водосбросным каналом №2 Мангистауского энергетического комбината. Данный участок расположен к югу от города Актау. Протяжённость обследованной территории по первому маршруту составила около 5 км (рисунок 7).



Рисунок 7. Снимок береговой зоны участка между водозаборным каналом №1 и водосбросным каналом №2 Мангистауского энергетического комбината (МАЭК) (снимки с дрон-квадрокоптера DJI Mavic 4 Pro)

В рамках второго маршрута исследования проводились на южном побережье залива Мангистау, в районе участка Сарытас на полуострове Тюб-Караган. Базовая станция расположена в 140 км от города Актау (рисунок 8).



Рисунок 8. Снимок береговой зоны участка южного побережье залива Мангистау, в районе участка Сарытас на полуострове Тюб-Караган (снимки с дрон-квадрокоптера DJI Mavic 4 Pro)

Третий маршрут исследования также охватывал территорию северного Каспийского моря, но уже на восточном побережье полуострова Тюб-Караган в районе залива Кошак (рисунок 9).



Рисунок 9. Снимок береговой зоны участка восточного побережье полуострова Тюб-Караган - в районе залива Кошак (снимки с дрон-квадрокоптера DJI Mavic 4 Pro)

По данным проведённых полевых исследований можно визуально заметить, что действительно чётко видны трансформации побережья казахстанского сектора Каспийского моря. Процесс отступления моря прослеживается повсеместно на всех исследуемых участках. Величина отступления береговой линии варьируется от нескольких километров до нескольких десятков километров.

Таким образом, совокупность обработанных данных дистанционного зондирования и полевых наблюдений, выполненных на ключевых участках побережья позволила получить комплексное представление о текущем состоянии береговой линии казахстанского сектора Каспийского моря.

Эти процессы, происходящие на всех исследуемых участках, свидетельствуют о том, что отступление моря и изменения береговой линии приводят к уменьшению площади пригодных местообитаний для представителей прибрежных комплексов, таких как водоплавающие птицы, рыбы и другие животные и растения.

4. Обсуждение

Результаты анализа пространственно-временной динамики береговой линии подтверждают, что в казахстанском секторе Каспийского моря в период с 2000 по 2025 годы наблюдается устойчивое и последовательное расширение территории зон осушения и трансформации прибрежной зоны. С начала XXI века эта тенденция имеет устойчивый характер, однако наиболее интенсивные изменения начинаются во второй половине исследуемого периода. Именно в период с 2005 по 2010 годы данная тенденция имеет ярко выраженный и регрессирующий характер. Изменения площадей акватории моря, ускорение процессов обмеления и изменения береговой линии указывают на то, что началась активная фаза трансформации побережья. В данный период происходящие в море незначимые ранее гидрологические процессы сейчас становятся причиной значительных изменений в положении береговой линии.

По мнению ряда ученых (Ivkina et al., 2015; Yeltay, 2022), длительное снижение уровня Каспийского моря связано с изменением водного баланса под влиянием климатических факторов и антропогенной деятельности. Повышение температуры воздуха усиливает испарение с поверхности водоёма, что приводит к потере значительных объёмов воды, которые не компенсируются притоком речного стока. Также необходимо отметить, что уменьшение объёмов поступления пресной воды из крупных притоков моря, таких как реки Жайык и Волга, усугубляет дефицит водного баланса и способствует процессу регрессии побережья. То есть, сочетание усиленного испарения и сокращения поверхностного притока

в конечном итоге приводит к долгосрочному понижению уровня моря в казахстанском секторе Каспийского моря.

Необходимо отдельно отметить тот факт, что происходящие процессы отступления моря имеют неравномерное пространственное распределение. Наиболее выраженные изменения происходят в северной части казахстанского побережья и именно в этом участке смещение границы береговой линии происходит быстрее, чем в других районах. Наиболее уязвимым к понижениям уровня моря делает этот регион сочетание мелководья, открытой конфигурации береговой зоны и зависимость уровня моря от речного питания рекой Жайык. Процесс стремительного обмеления приводит к образованию новых участков суши, которые приводят к перестройке прибрежных экосистем северной части казахстанского сектора Каспийского моря.

Ситуация в центральной и южной части казахстанского сектора Каспийского моря является схожей с северной частью. Однако данные изменения на данный момент не имеют столь выраженного влияния на прибрежную экосистему. По данным мониторинга выявлено, что в центральной и южной части моря в низменных участках с малой абсолютной высотой рельефа наблюдается существенное увеличение площади осушения, так как в таких участках даже небольшое снижение уровня воды в море вызывает обширное оголение дна. Тогда как в возвышенных и структурно устойчивых участках центральной и южной части казахстанского сектора Каспийского моря данные изменения протекают медленнее. В таких участках наблюдается сохранение общей тенденции регрессии для всей территории побережья. Исходя из этого необходимо подчеркнуть, что современные процессы обмеления обусловлены не только крупномасштабными климатическими и гидрологическими процессами, но также и внутренней неоднородностью геоморфологической структуры рельефа всего побережья моря.

Сравнительный анализ изменения побережья моря за 1994 и 2025 годы свидетельствует о неравномерном характере процесса осушения в северо-восточной части Каспийского моря. Данный процесс можно объяснить совокупностью как региональных, так и локальных факторов.

Сравнительный анализ изменения побережья за 1994 и 2025 годы выявил, что наиболее масштабные изменения процесса отступления моря наблюдаются в районе Мёртвого Култука, где общая площадь осушенных территорий составляет 12 529 км². Процесс обмеления и отступления моря в данном случае выходит за рамки краткосрочных колебаний, что говорит о том, что в данном районе происходит долговременная тенденция снижения уровня моря, что приводит к формированию новых обширных сушиевых территорий. Все эти факторы и процессы приводят к существенной перестройке природных условий. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что в районе Мёртвого Култука происходит глубокая трансформация побережья, сопровождающаяся изменением солевого режима и структуры донных отложений.

В районе Прорвы также зафиксированы высокие значения площади осушения, данное значение равно 3 872 км². Изменение береговой зоны в данном участке отличается от района Мёртвого Култука в первую очередь тем, что осушенные участки распределены более фрагментарно. Это указывает на влияние изменяющейся гидродинамики и на перераспределение объёма воды.

Особо охраняемые территории также подвержены процессу обмеления моря. На особо охраняемых природных территориях таких как резерват «Акжайык» и Новинский заказник площадь осушенных земель относительно меньше по сравнению с предыдущими участками, площадь осушенных территорий в резервате составляет 563 км², в Новинском заказнике 554 км². Вследствие осушения территории площади водно-болотных угодий в данных районах значительно сокращается, что влечет последствия как изменение функционирования экосистемы, условия обитания флоры и фауны.

Наименьшие значения площади осушения (13,8 км²) выявлены в районе Сарытас. Причиной устойчивости данного участка является сочетание морфологических особенностей

рельефа и локальных гидрологических условий, которые снижают воздействие колебаний уровня моря.

Исходя из полученных данных и результатов анализа в целом выявленные изменения свидетельствуют об устойчивой тенденции увеличения площадей осушенных территорий на территории казахстанского сектора Каспийского моря. Данные процессы требуют дальнейшего детального изучения с привлечением гидрологических и климатических данных. Полученные результаты исследования свидетельствуют о целесообразности использования современных методов, таких как дистанционное зондирование Земли, как одного из важных инструментов анализа долгосрочной пространственно-временной динамики Каспийского моря.

Устойчивое сокращение акватории казахстанского сектора Каспийского моря и увеличение осушенных территорий подтверждается данными предыдущих исследований. В северной части моря отмечены наиболее значительные изменения береговой линии, что совпадает с результатами визуализации трансформации побережья. Снижение уровня моря и его влияние на экосистему отражено в спутниковых наблюдениях (Chen et al., 2023; Chen et al., 2024). Фрагментарное распределение осушенных участков в районах Прорвы согласуется с результатами исследований других ученых (Saeidzadeh et al., 2025; Ivkina et al., 2015).

С учётом выявленных тенденций становится очевидным, что трансформация казахстанского сектора Каспийского моря носит системный характер и возможно, эти процессы будут продолжаться, если сохранятся современные климатические условия. В этой связи становится все более актуальной необходимость регулярного мониторинга динамики уровня моря, анализа гидрологического баланса и оценки экологических последствий при условии дальнейшего сокращения акватории моря. Нужно отметить, что будущие исследования Каспийского моря должны быть направлены на уточнение механизмов, оказывающих влияние на отступление моря. Также особую важность сейчас и в будущем имеют разработки подходов к адаптации природных и социально-экономических систем к стремительно меняющимся условиям.

В ранних исследованиях уже было сказано о сокращении водного зеркала моря и формирование мелководных зон, солончаков и пустынных участков ведет к деградации естественных местообитаний водоплавающих птиц, рыб и водно-болотных организмов. Так, популяция каспийских тюленей (*Pusa caspica*) за столетие сократилась примерно на 90 %, что связано с деградацией среды обитания, загрязнением и утратой прибрежных участков (Morozov et al., 2009). Снижение численности верхних хищников, таких как тюлени, приводит к нарушению пищевых сетей и дисбалансу популяций рыб. Дополнительно падение уровня Каспийского моря уменьшает пригодные для размножения тюленей участки на значительные площади, что усиливает угрозу их сохранению (Court et al., 2025). Деградация прибрежных лагун и зарослей тростника также снижает доступные места нереста для рыб и влияет на миграционные маршруты птиц, а также другие биотические компоненты.

На участках Прорва и Мертвый Култук наблюдается потеря значительной части биотопов, что ведет к снижению биоразнообразия и уменьшению численности отдельных видов. В северной части казахстанского сектора, где осушение наблюдается наиболее интенсивное, деградация экосистемы сопровождается изменением солевого режима почв и воды.

В северной части казахстанского сектора также замечены перестройка структуры донных отложений. В центральной и южной части побережья процессы деградации проявляются медленнее, однако даже здесь наблюдается оголения дна и формирования новых сушистых участков. Данные процессы негативно отражаются на условиях обитания местной флоры и фауны. Особо охраняемые территории Новинский заказник и резерват «Акжайык» также испытывают влияние осушения. На данных территориях наблюдается сокращение водно-болотных угодий, трансформация прибрежных биотопов и рост солончаков. Все это в комплексе может оказывать долгосрочное воздействие на водоплавающих птиц, рептилий и мелких водных организмов. Дополнительно нужно отметить, что сокращение площади

мелководий и нерестовых зон оказывает негативное влияние на популяцию осетровых рыб Каспийского моря, численность которых в последние десятилетия существенно сократилась (Murvatova et al., 2025). Среди промысловых видов, таких как килька, фиксируется сокращение популяций под влиянием антропогенных стрессоров, включая изменение уровня моря и загрязнение (Vodini et al., 2024).

Таким образом, пространственно-временные изменения береговой линии приводят к системной трансформации экосистемы казахстанского сектора Каспийского моря. К таким можно отнести: нарушение гидрологического и солевого баланса, снижение биоразнообразия и изменение природных процессов.

5. Заключение

Результаты исследования и выполненный анализ свидетельствуют о том, что с начала XXI века происходит устойчивое и значительное сокращение площади акватории казахстанского сектора Каспийского моря. Независимо от локальных и региональных особенностей, все исследованные участки и районы показывают прогрессирующее увеличение осушенных территорий. Процессы изменения прибрежных зон и осушения территорий ведут к деградации прибрежных зон и исчезновению местообитаний для представителей множества видов обитателей прибрежных экосистем. Особое внимание необходимо уделить тому, что выявленная интенсификация процессов за последние десятилетия свидетельствует о том, что усиление значимых факторов напрямую влияет на общее снижение уровня моря. Сравнительный анализ данных дистанционного зондирования Земли дал возможность определить долгосрочные изменения осушенных территорий казахстанского сектора Каспийского моря в период с 1994 по 2025 годы. По данным мониторинга было выявлено, что наиболее масштабные трансформации береговой линии произошли в районах Мёртвый Култук и Прорва. На территориях природоохранных комплексов резервата «Акжайык» и Новинский заказник площади осушенных территорий идентичны в пределах 500 км². Наиболее стабильная ситуация наблюдается в районе Сарытас, где наблюдается минимальная площадь осушения.

В казахстанском секторе Каспийского моря эти тенденции отражают общие трансграничные процессы: сокращение численности ключевых видов, утрата прибрежных экосистем и рост экологического давления.

Результаты исследования подтверждают эффективность методов дистанционного зондирования Земли для мониторинга пространственной и временной динамики прибрежных экосистем Каспийского моря. Использование в исследовании высокодетальных спутниковых данных позволило не только визуализировать масштаб изменений, но и количественно оценить скорость регрессии моря. Полученные данные исследования в будущем могут стать основой для оценки экологического состояния территории, прогнозирования изменений и планирования природоохранных мероприятий в прикаспийском регионе.

Изменения береговой зоны влекут за собой трансформацию природных условий. Вследствие этого изменения затрагивают функционирование экосистем и тем самым создаёт новые вызовы для природопользования. Сформированные за последние 25 лет осушенные территории и новые береговые границы становятся важным элементом современной структуры побережья, и безусловно, требуют внимания при дальнейших оценках состояния региона. Масштабы произошедших преобразований в прибрежной зоне за последние десятилетия в будущем определяют траекторию будущих исследований, указывая на актуальность и значимость задачи развития изучения осушённых территорий и их влияния на окружающую среду.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация – С.А., Д.М.; методология – С.А.; программное обеспечение – С.А., Д.М.; валидация – С.А., Д.М.; формальный анализ – С.А.; исследование – С.А., Д.М.; ресурсы – С.А., Д.М.; курирование данных – С.А.; написание – подготовка оригинального черновика – С.А., Д.М.; написание – рецензирование и редактирование – С.А., Д.М.; визуализация – С.А.; руководство – С.А.; администрирование проекта – С.А.; получение финансирования – С.А. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторе

Ахметов, Серик - председатель правления, НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря», 4А микрорайон, 19, Актау, Казахстан, 130000; serik.akhmetovkz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0867-7429>

Малахов, Дмитрий - заведующий научно-исследовательским центром ГИС и ДЗЗ, РГП на ПХВ «Институт зоологии» КН МНВО РК, пр. Аль-Фараби, 93, Алматы, Казахстан, 0500003; dmitry.malakhov@zool.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7844-6569>

9. Финансирование: это исследование финансировалось НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря».

10. Благодарности: авторы выражают благодарность Елбасиевой Б.Б. за техническую помощь.

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

12. Список литературы

1. Ashtab, D., Golamalifard, M., Jokar, P., Kostianoy, A. G., & Semenov, A. V. (2024). Spatial planning of marine protected areas in the Southern Caspian Sea: comparison of multi-criteria evaluation and simulated annealing algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 123. <https://doi.org/10.3390/jmse12010123>
2. Badulin, S. I., Kostianoy, A. G., Lebedev, S. A., & Popov, A. P. (2025). The Caspian Sea as a full-scale experimental facility supported by altimetry measurements of wind-driven waves. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 110, 101554. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2025.101554>
3. Bodini, A., Pereira, D., & Scotti, M. (2024). The decline of kilkas, sturgeons and seals in the Caspian Sea: The potential of qualitative loop analysis for the cumulative assessment of multiple drivers of stress. *Marine Pollution Bulletin*, 200, 116091. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116091>
4. Brekke, C., & Solberg, A. H. S. (2005). Oil spill detection by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 95(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.015>
5. Cavalli, R. M. (2024). Remote data for mapping and monitoring coastal phenomena and parameters: a systematic review. *Remote Sensing*, 16(3), 446. <https://doi.org/10.3390/rs16030446>
6. Chen, J., Cazenave, A., Wang, S.-Y., & Li, J. (2023). Caspian Sea level change observed by satellite altimetry. *Remote Sensing*, 15(3), 703. <https://doi.org/10.3390/rs15030703>
7. Chen, J., Li, J., & Cazenave, A. (2024). Multi-decadal changes in Caspian Sea level from satellite altimetry and hydrological models. *Journal of Marine Systems*, 251, 104650. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2024.104650>
8. Court, R., Lattuada, M., Shumeyko, N., Baimukanov, M., Eybatov, T., Kaidarova, A., & Goodman, S. J. (2025). The rapid decline of the Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 261. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02212-5>

9. Dyakonov, G. S., & Ibrayev, R. A. (2019). Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model. *Ocean Science*, 15, 527-541. <https://doi.org/10.5194/os-15-527-2019>
10. Ghorbani Afzal, F., Hasanlou, M., & Rajabi-Kiasari, S. (2023). Monitoring and estimating coastal upwelling using Sentinel-3 satellite imagery (case study: the Caspian Sea). *Continental Shelf Research*, 261, 105010. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.105010>
11. Hofmann, A., Arpe, K., & Leroy, S. (2017). Caspian Sea evaporating as temperatures rise: evidence from climate reanalysis. *Earth's Future*, 5(12), 1260-1274. <https://doi.org/10.1002/2017EF000677>
12. Ivanov, V. A., Kostianoy, A. G., & Lebedev, S. A. (2016). Satellite monitoring of hydrological processes in enclosed and semi-enclosed seas. *Oceanology*, 56(6), 843-852. <https://doi.org/10.1134/S0001437016060105>
13. Ivkina, N. V., Terekhov, A. N., & Naurozbayeva, Zh. A. (2015). Fluctuations of the Caspian Sea level and diagnostics of modern shoreline changes based on Landsat satellite data for 2005-2015 (Kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya i diagnostika sovremennykh izmeneniy polozheniya beregovoy linii po sputnikovym dannym Landsat perioda 2005-2015 godov in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 2, 89-99. <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/259>
14. Ivkina, N. V. (2023). Level fluctuations and their impact on oil pollution in the Kazakh sector of the Caspian Sea (Kolebaniya urovnya i ikh vliyanie na neftyanoye zagryaznenie kazakhstanskogo sektora Kaspiyskogo morya in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 2, 62-72. <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/259>
15. Karbassi, A., & Daryaei, M. (2012). Caspian Sea level change impacts regional seismicity. *Journal of Great Lakes Research*, 38(4), 667-672. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2012.08.005>
16. Kostianoy, A. G., & Lavrova, O. Y. (2018). Satellite monitoring of oil pollution in the Caspian Sea. *Remote Sensing*, 10(11), 1815. <https://doi.org/10.3390/rs10111815>
17. Kostianoy, A. G., Popov, A. P., & Lebedev, S. A. (2022). Remote sensing of Caspian Sea coastal and hydrological processes: recent advances and challenges. *Remote Sensing*, 14(15), 3672. <https://doi.org/10.3390/rs14153672>
18. Lebedev, S. A., & Kostianoy, A. G. (2008). Satellite altimetry of the Caspian Sea level variability. *Marine Geodesy*, 31(4), 285-296. <https://doi.org/10.1080/01490410802466814>
19. Mamaeva, N. (2023). Visualization of Caspian Sea shoreline changes (Vizualizatsiya izmeneniy beregovoy linii Kaspiyskogo morya in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 3, 63-67. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2021-102-3-63-67>
20. Morozov, B. N., & Abdurakhmanov, G. M. (2009). Assessment and enhancement of Caspian biodiversity conservation potential for national and transboundary environmental challenges (Otsenka i narashchivanie potentsiala sokhraneniya biologicheskogo raznoobraziya Kaspiya dlya resheniya natsionalnykh i transgranichnykh ekologicheskikh problem in Russian). *South of Russia: Ecology (Yug Rossii: Ekologiya)*, 4. <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-i-naraschivanie-potentsiala-sohraneniya-biologicheskogo-raznoobraziya-kaspiya-dlya-resheniya-natsionalnyh-i-transgranichnyh>
21. Murvatova, K., & Humbatov, M. (2025). Sturgeons in the Caspian Sea and their conservation measures. *Journal of ENDEMISM: Biodiversity & Environment*, 3(2), 15-19.
22. Nezlin, N. P., Kostianoy, A. G., & Grigoriev, A. V. (2012). Satellite monitoring of ecological conditions in the Caspian Sea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(10), 6101-6114. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2402-4>
23. Saeidzadeh, A., Ghorbani, M., & Kazemi, S. (2025). Spatiotemporal dynamics of Northern Caspian shorelines (1985-2023) and implications for coastal management. *Coastal Studies Journal*, 1-12. <https://doi.org/10.54668/csj.2025.01>

24. Sagatdinova, G., & Nursseitov, D. (2023). Identification of oil spill patterns in the Caspian Sea using SAR Sentinel-1 imagery and Google Earth Engine. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 420. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11315-8>
25. Sagatdinova, G., & Nursseitov, D. (2024). Processing Sentinel-1 radar data for identifying oil spills in the Caspian Sea using GEE (Obrabotka radiolokatsionnykh dannykh sputnika Sentinel-1 dlya identifikatsii neftyanykh razlivov v akvatorii Kaspiyskogo morya v srede GEE in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 1, 100-109. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-100-109>
26. Sergeeva, A. A., Koshim, Ä., & Saparov, Q. (2023). Natural and recreational assessment of the Caspian Sea and its coast (Prirodno-rekreatsionnaya otsenka Kaspiyskogo morya i ego poberezhya in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 2, 174-186. <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/945>
27. Shabanova, N., Lahijani, H., & Pourkerman, M. (2014). Caspian Sea level changes at the end of Little Ice Age and its impacts on the avulsion of the Gorgan River. *Méditerranée*, 145-155. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.4555>
28. Shiklomanov, I. A., Zavialov, P. O., & Arpe, K. (2019). Climate variability and water balance of the Caspian Sea. *Journal of Marine Systems*, 194, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.02.001>
29. Xu, H., 2006. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033.
30. Yeltay, A. (2022). Possibility of using reanalysis data to assess Caspian Sea water temperature (O vozmozhnosti primeneniya dannykh reanaliza dlya otsenki temperatury vody Kaspiyskogo morya in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 4, 45-51. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2022-107-4-45-51>
31. Yeltay, A., Bazarbay, L., Shishkina, G. (2023). Overview of remote sensing data on wave processes in the Kazakh part of the Caspian Sea. *Hydrometeorology and Ecology (Hydrometeorology i ekologiya)*, 3, 52-59. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2023-110-3-52-59>

Каспий теңізінің Қазақстан секторының жағалау сызығының өзгеруін жерді қашықтықтан зондтау деректеріне негізделген талдау және бұл өзгерістердің жағалық аймақ экожүйесіне әсері

Серик Ахметов, Дмитрий Малахов

Аңдатпа. Соңғы онжылдықтарда Қазақстан секторындағы Каспий теңізінің жағалау сызығы теңіз деңгейінің ауытқуларына байланысты барған сайын айтарлықтай өзгерістерге ұшырап отыр. Негізгі әсер ететін факторлар табиғи және антропогендік болып табылады. Барлық осы өзгерістер республиканың батыс аймағының жағалау экожүйесіне елеулі әсер етеді. Теңіз деңгейінің ауытқулары, өзендер ағысының режимі мен көлемінің өзгеруі, сондай-ақ адамның шаруашылық әсері сулы-батпақты жерлердің деградациясына, теңіз су бетінің көлемінің қысқаруына себеп болады. Барлық осы факторлар жағалау рельефінің құрылымын трансформациялауға әсер етеді. Қазақстан секторындағы Каспий теңізінің жағалау сызығының өзгеруін зерттеу үшін MODIS, Landsat және Sentinel-2 қашықтықтан зондтау деректері қолданылды. Қосымша кеңістіктік талдауды жан-жақты жүргізу үшін негізгі учаскелерде дрондарды пайдалану арқылы далалық бақылаулар ұйымдастырылды. Екі зерттеу әдісін кешенді пайдалану экожүйенің кеңістік-уақыттық өзгеру тенденцияларын анықтауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер бойынша 2000 жылдан 2025 жылға дейін

теңіздің жалпы су алаңы 16 834 шаршы км-ге дейін қысқарған деп тұжырым жасауға болады. Қалалық аймақтың өзгерістері Қазақстан секторындағы Каспий теңізінің солтүстік бөлігінде ең қатты байқалады. Бақылау деректері бойынша Пешная, Прорва, Мёртвый Култук, Новинский қорықшасы және «Ақжайық» резерватының учаскелерінде таяз сулы аймақтар, тұзды жазықтар және шөлдік ландшафттар қалыптасатыны айқындалды. Мұндай аумақтардың өзгеруі әртүрлі организмдер түрлерінің табиғи мекендеу орындарының қысқаруына және экожүйенің елеулі деградациясына алып келеді. Талдау және бағалау нәтижелері қазақстандық Каспий теңізінің секторы мен барлық жағалау аймағының экожүйелерінің өзгерісінің жүйелі сипатта екендігін көрсетеді. Осылайша жағалық биотоптарды сақтау және қалпына келтіру стратегияларын жасау, гидрологиялық балансты бағалау және тұрақты бақылаудың қажеттілігінің өзектілігі атап көрсетіледі.

Түйін сөздер: қашықтықтан зондтау; MODIS; Landsat; Sentinel-2; жағалаулық аймақтарды бақылау; экожүйе.

Analysis of shoreline changes in the Kazakh Sector of the Caspian Sea based on remote sensing data in the context of their impact on the coastal zone ecosystem.

Serik Akhmetov, Dmitry Malakhov

Abstract. In recent decades, the coastline of the Kazakh sector of the Caspian Sea has undergone significant changes caused by fluctuations in sea level under the influence of natural and anthropogenic factors. These processes have had a considerable impact on the coastal ecosystems of western Kazakhstan, leading to wetland degradation, reduction of the sea surface area, and transformations of the coastal relief. To analyze changes in the shoreline of the Kazakh sector of the Caspian Sea, remote sensing data from MODIS, Landsat, and Sentinel-2 were used. In addition, field observations were carried out in key areas using drones to obtain detailed spatial information. The combined use of satellite data and field observations made it possible to identify spatial and temporal trends in ecosystem transformation. The results show that between 2000 and 2025, the total sea surface area decreased to 16,834 km², with the most significant coastal changes observed in the northern part of the Kazakh sector of the Caspian Sea. According to the observations, shallow water zones, salt marshes, and desert landscapes are forming in areas such as Peshnoy, Prorva, Mertvyvy Kultuk, the Novinsky Nature Reserve, and the “Akzhayik” State Nature Reserve. These transformations lead to a reduction of natural habitats for many species and noticeable ecosystem degradation. The results highlight the systemic nature of ecosystem transformations in the Kazakh sector of the Caspian Sea and emphasize the importance of regular monitoring, assessment of the hydrological balance, and development of measures for conservation and restoration of coastal ecosystems.

Keywords: remote sensing; MODIS; Landsat; Sentinel-2; coastal zone monitoring; ecosystem.

Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀): current concepts and toxicological assessment

Zhanat Baigazinov¹, Yelena Polivkina^{2*}, Nurlan Mukhamediyarov^{1,3}, Kassym Zhumadilov⁴, Sayan Salmenbayev², Laura Kenzhina²

¹Park of Nuclear Technologies, Kurchatov, Kazakhstan;

e-baygazinov@pnt.kz, mukhamediyarov@pnt.kz, aktaev@mail.ru

²Institute of Radiation Safety and Ecology of RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan; polivkina.elena75@gmail.com, salmenbayev@gmail.com

³Scientific Research Center "EventumLab", Semey, Kazakhstan; mukhamediyarov@pnt.kz

⁴L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; zhumadilovk@gmail.com

*Correspondence: polivkina.elena75@gmail.com

Abstract. One of the current issues of atmospheric pollution is particulate matter (PM). PM can be of both natural and anthropogenic origin. This review summarizes the current concepts of PM, as well as approaches to their classification and toxicological properties. The most significant and dangerous for the environment are particles with aerodynamic sizes of 2.5 and 10 micrometers (PM_{2.5} and PM₁₀). The main sources of PM include construction, mining, fuel and energy enterprises, as well as road transport. The article provides a comparative analysis of the current environmental standards for PM_{2.5-10} in Kazakhstan, the Russian Federation, the EU, China, and the USA. In the EU, China, and the USA, there are no single maximum permissible concentration (MPC) limits for PM_{2.5}, as is the case in the Russian Federation and Kazakhstan. However, the EU and USA have stricter average daily and annual MPC limits for PM_{2.5-10}. Analysis of data on the continuous exposure to PM_{2.5-10} in the EU, China, and the USA has allowed us to identify the main risk groups associated with an increased risk of cardiovascular and respiratory diseases, as well as mortality. The complexity in assessing the toxic effects of PM_{2.5-10} stems from the significant variability and instability in their chemical composition, morphology, and dispersion properties. The main strategy for managing risks and improving public health outcomes is to reduce levels of PM_{2.5-10} pollution. In Kazakhstan, government measures to monitor and control the concentration of PM aim to reduce air pollution, but they have not been sufficiently effective in addressing public health risks.

Citation: Baigazinov, Zh., Polivkina, Ye., Mukhamediyarov, N., Zhumadilov, K., Salmenbayev, S., Kenzhina, L. (2026). Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀): current concepts and toxicological assessment. *Journal of Ecology and Sustainability*, 154(1), 27-41. <https://doi.org/10.32523/78jbd557>

Academic Editor:
A. Zandybay

Received: 26.12.2025
Revised: 24.02.2026
Accepted: 18.03.2026
Published: 31.03.2026



Copyright: © 2026 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: atmospheric air; particulate matter; PM_{2.5}; PM₁₀; toxicological assessment; regulation; health risks.

1. Introduction

Atmospheric air is one of the main and vital components of the environment. Over the past decades, suspended particles (abbreviated as

particulate matter, or PM) have come to the forefront, which are one of the six most significant criteria for air pollutants according to the Environmental Protection Agency (EPA) definition (Particulate Matter (PM) Pollution, 2024). The largest contributors to air pollution by PM are agriculture, energy, transportation, industry, commercial sectors, and waste disposal, as well as burning solid fuels for municipal purposes, and even tobacco smoke (Strelyaeva et al., 2014; Putaud et al., 2010; Li et al., 2015). PM is a widespread air pollutant that includes a mixture of organic and inorganic substances, with a wide range of spatial and temporal variations in their physical and chemical properties (Khan et al., 2010; Jiang et al., 2018; Kumar et al., 2025). The air pollution caused by suspended particles has many complex consequences for the environment and public health. If other pollutants are identified by their chemical composition, PM is a general term for all suspended particles in the air, regardless of their molecular composition. Due to their small size and weight, PM can be carried by wind over considerable distances and deposited on Earth's surface or in reservoirs (Khan et al., 2010; Jiang et al., 2018; Kumar et al., 2025; Finlayson-Pitts et al., 2025; Seinfeld et al., 2006). Adverse effects on public health and biota from suspended particles are associated with their aerodynamic size, which determines their migratory and penetrating abilities (Pavlík et al., 2012; Kim et al., 2015; Magnani et al., 2016; Rajper et al., 2018; Fatkhutdinova et al., 2021; Pu et al., 2022). The greatest danger to the biosphere is represented by PM_{2.5} particles (Khan et al., 2010; Strelyaeva et al., 2014; Kumar et al., 2025).

A significant number of studies have been conducted to investigate the influence of meteorological factors on particle migration (Katsouyanni et al., 2001; Li et al., 2015; Cao et al., 2013; Xu et al., 2017; Jiang et al., 2018) and the influence of PM size on cumulative effects (Valavanidis et al., 2010; Khan et al., 2010; Jiang et al., 2018; Kumar et al., 2025). Also, in literature, there are studies on the impact of particulate matter on urban air pollution and its negative impact on public health, flora, fauna and soil (Xu et al., 2017; Zagorodnov et al., 2018; World health statistics, 2018; Valavanidis et al., 2010; Anderson et al., 2012; Zheng et al., 2015; Bennett et al., 2019; Tokbergenov et al., 2022; Ghobakhloo et al., 2023; Ning et al., 2024; Kumar et al., 2025; Relić et al., 2023; Liu et al., 2019; Liu et al., 2022; Li et al., 2015). Numerous PM studies have been conducted in cities in China, Europe and the United States.

In this aspect, the purpose of the review is to summarize knowledge about PM in terms of its origin, physicochemical and toxicological properties, classification, problems of environmental standards and assessment of public health effects. The review also includes research data from Kazakhstan and other countries of the Commonwealth of Independent States (CIS).

2. Current concepts and toxicological effects of particle matter

The descriptive review was carried out in accordance with the recommendations of PRISMA (Matthew et al., 2021). The research was carried out in the spring and summer of 2025 in English and Russian independently by two people in the databases PubMed, Scopus, Google Scholar, and the library without limitation of the publication period. The search used keywords related to the subject of the study – "suspended particles" or "particulate matter" (PM) and atmospheric air pollution by PM, and morbidity of the population due to air pollution by PM. In addition, the literature lists of publications selected for a descriptive review were also reviewed.

2.1. The concept of "PM" and its classification

The term "suspended particles" refers to solid or liquid substances dispersed in the gas phase. To denote them in short form, the abbreviation "PM" is used – a derivative of the English phrase "particulate matter". As a rule, in meteorology, atmospheric physics and chemical ecology, PM mainly refers to solid particles (Anderson et al., 2012; Putaud et al., 2010; Ghobakhloo et al., 2023). PM is formed as a result of various processes such as grinding, condensation and drying of solutions, for example, marine dust, as well as chemical reactions. These particles become suspended under the influence of air or gas flows and form what we commonly call "particulate matter" (Strelyaeva et al., 2014).

For the purposes of air quality regulation, PM is determined by their degree of dispersion, namely their aerodynamic size. Anthropogenic gas emissions include solid particles ranging in size from 0.5 to 200 microns.

Table 1 shows the main differences between PM in a number of characteristics, for example, origin, size, shape and method of generation.

Table 1. Classifications of PM

Criteria	Name	Examples
By origin (Ghobakhloo et al., 2023)		
Natural	Natural PM	Sandstorms, rock weathering, volcanic activity, evaporation from the surfaces of seas and oceans, soil erosion, forest fires, steppe fires and peat fires, dust-like substances of plant origin, plant pollen, microorganisms and fungal spores
Artificial	Man-made PM	Emissions from fuel combustion, fuel and energy complex, transport, during road and construction work, mining, production of building materials, and smelting
Primary	Primary PM	They directly enter the air from both natural and man-made sources
Secondary	Secondary PM	Already formed in the atmosphere as a result of chemical transformations of gaseous substances: SO ₂ , NO _x , NH ₃ , volatile organic compounds (VOC). Basically, secondary PM is of anthropogenic origin
By size (Seinfeld et al., 2006; Putaud et al., 2010)		
Finely dispersed (d < 0.25 microns)	Finely dispersed, submicron aerosols	smoke particles, soot particles, smog
Medium - dispersed (0.25 microns < d < 10 microns)	Microscopic aerosols	smoke particles, soot particles
Coarse- dispersed (d > 10 microns)	Giant aerosols	dust storms
Isometric	Spherical	soot and silica particles
Fibrous	Chained	asbestos, glass, metal and vegetable dust
By the generation way (Ivlev et al., 2000)		
Dispersional	Dispersional	They are formed as a result of the mechanical dispersion of solids and the subsequent dispersion of fine particles in the air. As a rule, such particles have a relatively large size (> 10 microns) and an irregular shape.
Condensation	Condensation	They are formed during the combustion or sublimation of substances (particles of soot, for example), as well as a result of photochemical reactions in the atmosphere. As a rule, these are fine particles with a diameter of < 0.25 microns.

The most important property of PM is the high specific surface area of the dispersed phase, reaching hundreds of square meters per gram of dispersed substance, and a significant amount of time spent in the air (Spurny et al., 1964). PM with a diameter ranging from 1 to 10 microns can remain airborne for several days. The hover time for particles smaller than 1 micron is 10 to 20 days. PMs smaller than 0.1 micron do not precipitate at all because their speed of Brownian motion is faster than the rate of deposition (Spurny et al., 1964).

When it comes to solid particles, the number to the right of PM indicates the aerodynamic diameter in microns. The concentration of PM is usually determined in weight, i.e., the number of micrograms per cubic meter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). So, depending on aerodynamic size, PM can be conventionally divided into two categories: coarse dust (particles less than $10\ \mu\text{m}$) and fine dust (particles smaller than $2.5\ \mu\text{m}$) (Valavanidis et al., 2010). Also, according to the technical definition, $\text{PM}_{2.5}$ is included in PM_{10} (which covers all particles less than 10 microns in diameter).

To make it clear, these dimensions are much smaller than a human hair (Figure 1).

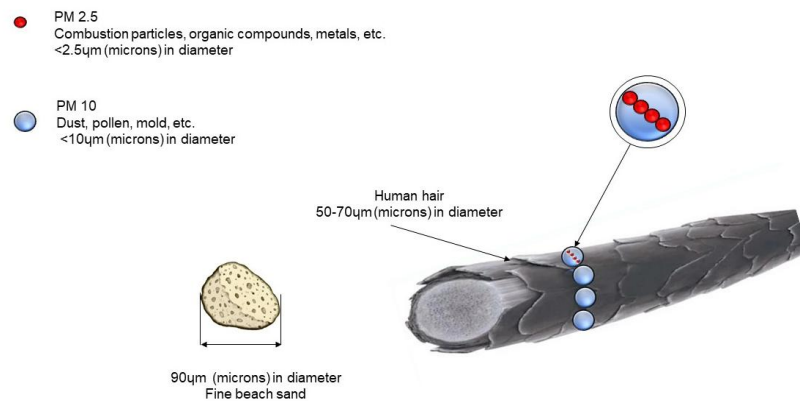


Figure 1. Dimensions of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10}

In addition to coarse and fine dust, when discussing PM, one may encounter references to the smallest ultrafine dust (PM_1 , $\text{PM}_{0.1}$, etc.), which has an aerodynamic diameter of 1 micron or less. $\text{PM}_{0.1}$ is referred to as a nanoparticle. Particles less than 10 microns in size have the greatest environmental significance, as they are virtually not captured by common industrial cyclones. Unlike larger particles, which are captured up to 90-95% (Fatkhutdinova et al., 2021). It is these fine particles that easily penetrate into the lowest parts of the lungs with inhaled air and have a negative impact on human health.

2.2. Sources of PM entering the atmosphere

PM can have both natural and anthropogenic origins (Table 1). There are many natural sources of PM pollution, including dust storms, forest fires, wind erosion, sea spray and even plant pollen (Seinfeld et al., 2006; Ivlev, 1982; Friedlander, 2000; Ivlev, 2013; Brines et al., 2015). Thus, smoke from forest fires contains a lot of solid particles, mainly $\text{PM}_{2.5}$ (Strelyaeva et al., 2014; Ghobakhloo et al., 2023). In large areas of the arid zones of Asia and Africa, droughts and intensive exploitation of pastures lead to a reduction in vegetation cover and the removal of dust particles from it. As a result of sand and dust storms, dust can rise high into the atmosphere and travel long distances, often moving even across oceans. Such storms annually transport an average of half a billion tons of minerals and nutrients to the oceans, which, when coming from the atmosphere, can affect primary production in the ocean, including coastal areas. This process triggers biogeochemical cycles in the oceans, including circulation of carbon, nitrogen, sulfur, phosphorus, and silicon (Ivlev, 1982; Finlayson-Pitts and Pitts, 2000). In some parts of Africa and the Middle East, most of the particle pollution is caused by dust brought in from arid areas (Ivlev, 1982). In Russian cities located in the Asian part of the country, air pollution caused by microparticles comes from transporting air masses from deserts in Africa and Asia (Varenik et al., 2021)

The most significant contribution to the atmospheric pollution of modern cities is made by emissions from motor vehicles and power plants. Also, sources of PM entering the urban atmosphere include the construction industry (production of cement, ceramics, bricks), the metallurgical industry, and the transshipment of bulk cargo (Harrison et al., 2001; Khan et al., 2010; Crilley et al., 2017; Hao

et al., 2019; Ghobakhloo et al., 2023). The machine-building enterprises release significant amounts of dust in areas where materials are mechanically processed, welded and cut. At ferrous metallurgical enterprises, sintering, foundries, blast furnaces, steelmaking, and rolling are the main sources of dust emissions. In mining operations, the most dust is produced during ore transportation, drying, and flotation. The production of building materials such as mortars, concrete, and hollow slabs also emits dust during preparation and storage in open warehouses (Zagorodnov, 2018). In emissions from machine-building enterprises, the content of fine particles of PM_{2.5} and PM₁₀ was 13% and 40%; ferrous metallurgy was 79% and 84%; non-ferrous metallurgy 43% and 98%; mining industry 21% and 59%, respectively (Zagorodnov, 2018).

In 2023, industrial combustion was the main source of PM emissions in the United Kingdom (UK). Emissions from industrial processes and product use accounted for 16% of total PM_{2.5} emissions and 38% of all PM₁₀ emissions. Road transport accounted for 21% and 18%, respectively, of PM_{2.5} (Emissions of air pollutants, 2025).

Studies of the concentration and spatial distribution of PM in Belarus have shown that industrial production, household sector, and road transport are the main contributors to the formation of high concentrations of PM₁₀ halos in atmospheric air (Kakareka et al., 2021). At the same time, the highest concentrations of PM_{2.5} and PM_{0.1} are formed near roads, particularly road sides and traffic intersections (Kumar et al., 2020).

Air pollution in Kazakhstan is caused by various factors and poses a serious threat to public health. The atmospheric air in many cities of Kazakhstan is polluted due to the following main reasons: extraction and processing of mineral resources, oil and gas extraction, operation of motor vehicles, and emissions from industrial enterprises (Kenessary et al., 2019).

Almaty is one of the most polluted cities in Kazakhstan and Central Asia. The average winter concentration of PM_{2.5} in Almaty is 94.0 micrograms per cubic meter (Tursumbayeva et al., 2022). In 2024, in Almaty, the total volume of pollutants emitted into the atmosphere from stationary sources was 189 thousand tons. Of this, 60% was accounted for by motor vehicles, 27.5% by industrial enterprises, and 11% by housing and the private sector. The remaining 0.74%, or 0.076%, was emitted by stationary sources of small and medium-sized businesses and construction facilities. The average annual concentration of PM_{2.5} was 24.1 micrograms per cubic meter, which was 4.8 times higher than the WHO norm (Kurmangazinova, 2025).

In 2016, WHO published a report on the content of PM₁₀ and PM_{2.5} in atmospheric air in 2975 cities around the world. The report WHO indicates that the quality of atmospheric air is dependent on the socio-economic status of a country. Concentrations of suspended particles were significantly higher in cities in the Asian region (India, Pakistan, Afghanistan, China and Mongolia) and in the Eastern Mediterranean region (World health statistics, 2018).

2.3. Toxicological characteristics of PM and their effect on public health

Unlike the well-studied gaseous pollutants of atmospheric air, PM have such special properties that are determined by the course of physicochemical processes in the atmosphere. As for PM_{2.5} and PM₁₀, primary and secondary particles are isolated. Primary particles enter the air ready-made, and secondary particles form directly in the air as a result of various chemical reactions. Most PM_{2.5} and PM₁₀ particles are sorbents that can adsorb toxic compounds, leading to particles with harmful additives. The World Health Organization (WHO) classified PM as a priority air pollutant, along with nitrogen oxides, ozone, sulfur oxides, formaldehyde, and polycyclic aromatic hydrocarbon (World health statistics, 2018).

The suspended particles have a high specific surface area. The most common chemical components of particulate matter (PM) include inorganic anions (such as sulfates, nitrates, and chlorides), cations (like sodium, potassium, calcium, and magnesium), organic and elemental carbon, ammonia, minerals from the Earth's crust, soot particles, rubber, sand, asphalt, water particles, the smallest droplets of liquid (also known as aerosol pollution), and heavy metals and their compounds (Crilley et al., 2017; Kumar et al., 2020). PM may also contain biological components such as

microorganisms (mold spores, bacteria, and dust mites), microbial waste products, and pollen. It is worth noting that most of these components are allergens (Kumar et al., 2020; Khan et al., 2010).

The diversity of the chemical composition and size of PM, as well as the unpredictability of physicochemical processes on their surfaces, is the reason for difficulties encountered in assessing toxicity of suspended particles. The toxicological assessment of PM_{2.5} and PM₁₀ involves numerous mechanisms, such as inflammatory processes and oxidative stress. This condition is a problem in the study of the effects of PM_{2.5} and PM₁₀ on humans and the environment. Besides, it is due to the considerable time spent in the air, which can be from several hours to several days or more. As for PM₁ and PM_{0.1}, there is still no clear understanding of their short- and long-term effects on public health.

As a result of numerous studies conducted over the past decades worldwide on the negative effects of suspended particles on public health, it has been statistically reliably established that their toxicity is determined by both their chemical composition and aerodynamic dimensions (Anderson et al., 2012; Fatkhutdinova et al., 2021; Xu et al., 2017). PM₁₀ and PM_{2.5} particles are considered to be respiratory, as their diameter allows them to enter the thoracic part of the human respiratory system and then the bloodstream (Pope, 2000; Pope et al., 2006). The depth of penetration of PM into the lungs depends on the aerodynamic size of particles (Anderson et al., 2012; Kumar et al., 2025). Thus, PM₁₀ and PM_{2.5} are the most important health risk factors for respiratory and cardiovascular diseases and exhibit the highest biological activity. However, obtaining sufficient material for *in vitro* and *in vivo* toxicological studies is a difficult task.

Due to their extremely small size, PM₁₀ and PM_{2.5} not only are not retained by natural biological barriers when inhaled, and pass into the bloodstream, but they can also accumulate in the body, triggering various unpleasant health-related consequences (Feng et al., 2016). In 2013, WHO classified fine particulate matter, PM₁₀ and PM_{2.5}, as carcinogens in the first group (World health statistics, 2018). According to the results of epidemiological, clinical and experimental studies, air pollution with PM, especially those containing metals, has been confirmed to be a risk factor for cancer of the trachea, bronchi, and lungs. Damage to the epithelial cell genome and epigenetic changes caused by PM₁₀ and PM_{2.5} play an important role in the pathogenesis of cancer.

The negative effects of respiratory particulate matter (PM) are manifested both in short-term exposure (from a few hours to a few days) and in long-term or chronic exposure (over several months to years). According to WHO estimates (World health statistics, 2018), an increase in PM₁₀ concentration by 10 µg/m³ leads to an increase in daily mortality by 0.2-0.6%. Each increase in PM_{2.5} concentration by 1 µg/m³ is associated with a 6-13% increase in cardiopulmonary mortality risk. Daily studies in 29 European cities have shown that, with an increase in daily concentrations of PM₁₀ or black smoke of 10 g/m³, there is an increase in the daily number of deaths across all ages of 0.6%. This figure is even slightly higher for the elderly (Katsouyanni et al., 2001). Under conditions of long-term exposure to PM_{2.5}, each increase in the concentration of suspended particles by 10 µg/m³ was accompanied by a 6-13% increase in long-term cardiopulmonary mortality risk.

In the atmospheric air of Russian cities, using calculated coefficients for PM₁₀ and PM_{2.5}, indicators of additional mortality of the population were determined in 219 cities, amounting to 67.9 thousand cases/year under the influence of PM₁₀, and 88.2 thousand cases per year taking into account the effects of PM_{2.5}.

Studies in Semnan (Iran) during the COVID-19 pandemic and after quarantine showed that mortality rates from chronic obstructive pulmonary disease (COPD) related to PM_{2.5} were 25.18% in 2019, 22.55% in 2020, and 22.12% in 2021. During the quarantine, mortality and hospitalization rates due to cardiovascular and respiratory diseases also decreased (Aga et al., 2003).

Data have been obtained showing that solid particles of PM_{2.5}, as a quality, cause a certain degree of deterioration in the structure and function of the epidermis of the skin (Liu et al., 2019).

The negative effect of PM_{2.5} on the cognitive functions of the brain and the risk of early dementia are described (Tokbergenov et al., 2022). Even relatively low levels of PM_{2.5} may be an important environmental factor influencing patterns of structural brain development in childhood

(Kim et al., 2015). The negative role of dust particles in the spread of infectious diseases, in particular COVID-19, has also been confirmed (Ghobakhloo et al., 2023).

According to the results of an assessment of the risk of non-traumatic mortality due to exposure to atmospheric air pollution in the city of Ust-Kamenogorsk, suspended particles of PM_{2.5} have unacceptable levels of relative risk (RR: 1.27-1.78) and individual risk for non-trauma ($1.5-2.1 \cdot 10^{-3}$) and cardiopulmonary mortality ($8.3 \cdot 10^{-4}$ to $1 \cdot 10^{-3}$) (Kenessary, et al., 2019).

Analysis of numerous works (Aga et al., 2003; Brook, 2008; Anderson et al., 2012; Katsouyanni et al., 2001; Valavanidis et al., 2010; Zheng et al., 2015; Rajper et al., 2018; Fatkhutdinova et al., 2021; Ning et al., 2024; Pavlík et al., 2012; Pope, 2000; Pope et al., 2006; Feng et al., 2016) allows us to draw the following conclusions:

- Chronic pulmonary obstruction progresses with chronic exposure to PM_{2.5} and PM₁₀.
- Short-term acute exposure to PM_{2.5} and PM₁₀ exacerbates lung diseases;
- Short-term acute exposure to PM_{2.5} and PM₁₀ exacerbates lung disease. The toxic effect of PM_{2.5} and PM₁₀ is manifested in systemic oxidative stress in the lungs, inflammation, and vascular atherosclerosis;
- PM_{2.5} and PM₁₀ cause adverse changes in the autonomic function of the heart;
- PM_{2.5} and PM₁₀ cause changes in vascular tone and endothelial function;
- translocation of PM_{2.5} and PM₁₀ provokes prothrombotic effects;
- PM_{2.5} and PM₁₀ help to reduce the body's defenses and immunity.

Thus, the risk of dangerous exposure to suspended particles is primarily associated with fine aerosol particles of PM_{2.5} and PM₁₀. The effects of PM_{2.5} and PM₁₀ air pollution are characterized by a wide range of diseases, including various allergic reactions of the respiratory system, such as bronchitis, asthma, runny nose, cough, and chronic obstructive pulmonary disease (COPD), etc. Susceptible populations, such as the elderly, children, and those with chronic illnesses.

The WHO estimates that air pollution caused by PM causes about 800 000 deaths annually, putting a huge burden on global public health. PM is in 13th place among the leading causes of death worldwide (Khan et al., 2010). Thus, PM air pollution requires constant monitoring as it has complex consequences for public health.

2.4. Sources of PM entering the atmosphere

There are 3 groups of particles that differ in the degree of negative effect on human health:

1. Coarse particles with an aerodynamic diameter of more than 10 microns, which irritate the mucous membranes of the upper respiratory tract and eyes, provoking cough, sore throat, allergic reactions, itching and redness of the eyes; these particles are not regulated;
2. Medium-dispersed particles have an aerodynamic diameter less than 10 micrometers (PM₁₀); they are regulated;
3. The most toxic fine particles have aerodynamic diameters less than 2.5 micrometers (PM_{2.5}), these particles are also regulated.

Fine suspended particles PM_{2.5} and PM₁₀ are the main indicators of atmospheric air quality. The concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ in atmospheric air in areas affected by enterprises often exceed the established hygienic standards (Kerimray, 2020). Instruments for monitoring the levels of PM_{2.5} and PM₁₀ in the atmosphere are being developed for health risk management purposes. In particular, the mass concentration of PM_{2.5} is a key parameter for assessing air quality and the effects of its pollution on human health. The importance of monitoring atmospheric air quality for fine particles is reflected in the WHO's recommendations on air quality regarding particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide (World health statistics, 2018). In 1999, the EPA introduced the Air Quality Index (AQI) to effectively inform the public about the health risks caused by the concentration of pollutants in the environment. The AQI includes a new sub-index – fine particles (Particulate Matter (PM) Pollution, 2024).

PM emissions from mobile sources with diesel engines are regulated by a number of European vehicle emission directives, supplemented by directives on fuel quality and regulation of emissions

from off-road mobile vehicles, railway locomotives and ships on inland waterways (Fatkhutdinova et al., 2021).

Currently, the quality of urban air is one of the most significant environmental issues. In most large cities around the world, air pollution is reaching critical levels. The air quality in more than 20 of the largest cities in the world is several times worse than the WHO standards.

According to Kazinform International News Agency (Nigmatullina, 2025), over the past five years there have been consistently high levels of atmospheric air pollution recorded in Karaganda, Almaty, Aktobe, Temirtau, Ust-Kamenogorsk, and Astana, due to emissions from industrial enterprises, motor transport, and the improper operation of outdated sewage treatment plants. In Astana, the air is burdened with suspended particles $PM_{2.5}$ and PM_{10} , carbon monoxide and nitrogen dioxide. In Karaganda, Temirtau and Ust-Kamenogorsk, sulfur dioxide, ammonia, hydrogen sulfide, phenol and other harmful compounds are added to them. The list of cities with "very high" pollution levels includes Almaty, Atyrau, Karaganda, Temirtau, Talgar and Satpayev. Astana, Ust-Kamenogorsk, Turkestan, Zhitikara, Kulsary were included in the category of "high level of pollution". And among the settlements with a "high level of pollution" were Aktau, Aktobe, Semey, Petropavlovsk, Shymkent and 16 other cities.

The criteria for atmospheric air quality, in relation to the maximum permissible levels of $PM_{2.5}$ and PM_{10} , in the EU, USA, Russia, China, and Kazakhstan, are somewhat different (table 2).

Table 2. Regulatory standards $PM_{2.5}$ and PM_{10} in air

Indicator, mcg/m^3	WHO (Particulate Matter (PM) Pollution, 2024)	USA (Particulate Matter (PM) Pollution, 2024)	EU (Kerimray, 2020)	China (Nhung et al., 2017)	Russia (Zagorodnov et al., 2018)	Kazakhstan (Kenessary et al., 2019, Tursumbayeva et al., 2022)
MPC $PM_{2.5ms}$	–	–	–	–	160	150
MPC $PM_{2.5ad}$	25	35	25	35	35	35
MPC $PM_{2.5aa}$	10	12	12	15	25	–
MPC PM_{10ms}	–	–	–	–	300	500
MPC PM_{10ad}	50	150	50	50	60	150
MPC PM_{10aa}	20	–	20	40	35	–

¹MPC $PM_{2.5ms}$ and MPC PM_{10ms} – the maximum single permissible concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particles in the air (20-minute averaging);

²MPC $PM_{2.5ad}$ and MPC PM_{10ad} – the average daily permissible concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particles in the air (24-hour averaging);

³MPC $PM_{2.5aa}$ and MPC PM_{10aa} – the average annual permissible concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particles in the air (annual averaging);

⁴ "–" - n/a

The regulatory standards of the European Union, USA and China do not apply to assessing the maximum single concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} within a 20-minute period. Instead, concentrations of suspended particulates are measured on an hourly basis. Thus, risks of acute exposure to $PM_{2.5}$ and PM_{10} to public health are assessed based on the degree of air pollution relative to average daily maximum allowable concentrations (MPC), and chronic exposure is assessed relative to the annual average MPC.

In the countries of the European Union, the maximum permissible suspended particle content of PM_{10} was first established in Directive 1999/30/EU in 1999 (Particulate Matter (PM) Pollution, 2024), and in 2008, MPC (maximum permissible concentration) for PM_{10} (residual mass) and MPC

for PM_{2.5} (particulate matter with a diameter less than 2.5 microns) were clarified in Directive 2008/50/EU on the quality of atmospheric air and clean air in Europe (Kerimray, 2020). In the USA, average daily and annual standard values for the PM₁₀ content were introduced in 1987 at 150 and 50 micrograms per cubic meter, respectively (Pope et al., 2000). In 2006, current standards were revised. The average annual maximum permissible concentration for PM₁₀ was abolished. However, average daily and average annual maximum concentrations for PM_{2.5} were introduced. They are equal to 35 and 15 µg/m³, respectively (Nevmerzhitsky, 2016).

In accordance with WHO recommendations for the safe functioning of humans, the average daily level of PM_{2.5} in surface atmospheric air should not exceed 25 µg/m³, while the recommended average annual level is no more than 10 µg/m³ (World health statistics, 2018). Standards vary markedly from country to country. In the USA, the standard for PM_{2.5} in the atmosphere is 35 micrograms per cubic meter (Bennett et al., 2019) and in EU countries - 25 µg/m³ (Putaud et al., 2010). In Russia, the maximum annual permissible concentration of PM₁₀ is 35 and PM_{2.5} - 20 µg/m³; the daily average concentration is 60 and 40 µg/m³, respectively. The maximum single concentrations for PM₁₀ and PM_{2.5} are 300 and 240 µg/m³, respectively (Zagorodnov et al., 2019). In Kazakhstan, the maximum single-use MPC values are applied, while the WHO applies average daily and annual limits for particles of PM₁₀, PM_{2.5}, and NO₂ to assess air quality. For example, the one-time maximum permissible concentration of PM_{2.5} used in Kazakhstan is 15 times higher than the average WHO annual standard (Kenessary et al., 2019; Tursumbayeva et al., 2022).

3. Conclusion

Currently, PM is present in the surface atmospheric air almost everywhere and continuously. It has a different chemical, morphological, and dispersed composition, as well as different sources of intake and accumulation densities. Analysis of data on PM content in atmospheric air in various cities around the world has revealed a connection between PM and the public health. The risks associated with exposure to PM include growth, exacerbation of disease, and mortality from continuous exposure. All this indicates the critical importance of monitoring small suspended particles (PM) and controlling air pollution levels, particularly in large industrial cities. Regulatory values for safe levels of particulate matter exposure (PM) vary in Kazakhstan, Russia, the EU, China, and the United States.

The instruments for state control of PM_{2.5} and PM₁₀ in the atmosphere in Kazakhstan are not sufficiently used for health risk management purposes. Therefore, it is essential to improve the effectiveness of environmental policies, especially in major industrial cities in Kazakhstan, in order to decrease the level of pollution caused by PM_{2.5} particles and PM₁₀ particles in surface air.

4. Supplementary Materials: no supplementary material

5. Author Contributions

Conceptualisation – Zh.B., N.M., Ye.P.; data curation – Ye.P., Zh.B., S.S., N.M.; formal analysis – S.S., N.M., L.K., Ye.P.; methodology – Ye.Sh., L.K., S.S.; administration – Zh.B., N.M.; visualisation – Ye.P.; writing-original draft preparation – Ye.P., Zh.B., N.M., L.K.; writing-review and editing – N.M., Zh.B., Ye.P.

6. Author Information

Baigazinov, Zhanat – PhD, chairman of the board, JSC Park of Nuclear Technologies, Kurchatov st., 18/1, Kurchatov, Kazakhstan, 180010; e-baygazinov@pnt.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0348-8473>

Mukhamediyarov, Nurlan – director of Research and Development Department, JSC Park of Nuclear Technologies, Kurchatov st., 18/1, Kurchatov, Kazakhstan, 180010, LLP Scientific Research Center EventumLab, Semey, Kazakhstan, 070000; mukhamediyarov@pnt.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5073-5978>

Zhumadilov, Kassym – PhD, head of the department, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; zhumadilovk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0205-4585>

Polivkina, Yelena – candidate of biological sciences, associate professor, head of the department of radioecological and biodosimetric research, branch "IRSE" NNC RK, Beibit Atom st., 2B, Kurchatov, Kazakhstan, 180010; polivkina.elena75@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4411-5868>

Salmenbayev, Sayan – PhD doctoral student, head of the Radiochemical Research Laboratory, branch "IRSE" NNC RK, Beibit Atom st., 2B, Kurchatov, Kazakhstan, 180010; salmenbayev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7338-682X>

Kenzhina, Laura – candidate of medical sciences, associate professor, head of the Laboratory of Biodosimetric Research, branch "IRSE" NNC RK, Beibit Atom st., 2B, Kurchatov, Kazakhstan, 180010; laurakenzhina@nnc.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4553-356X>

7. Funding: this research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant number BR27101493).

8. Conflicts of Interest: authors declare no conflicts of interest.

9. References

1. Aga, E., Samoli, E., Touloumi, G., Anderson, H. R., Cadum, E., Forsberg, B., Goodman, P., Goren, A., Kotesovec, F, Kriz, B., Macarol-Hiti, M., Medina, S., Paldy, A., Schindler, C., Sunyer, J., Tittanen, P., Wojtyniak, B., Zmirou, D., Schwartz, J., & Katsouyanni, K. (2003). Short-term effects of ambient particles on mortality in the elderly: results from 28 cities in the APHEA2 project. *Eur Respir J Suppl*, 40, 28s-33s. <https://doi.org/10.1183/09031936.03.00402803>
2. AQEG (2007). Air quality and climate change. Fine particulate matter (PM_{2.5}) in the United Kingdom. <https://uk-air.defra.gov.uk/research/ageg/publications>
3. Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., & Stolbach, A. (2012). Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *J Med Tox*, 8, 166. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>
4. Bennett, J. E., Tamura-Wicks, H., Parks, R. M., Burnett, R. T., Pope, C. A., Bechle, M. J., Marshall, J. D., Danaei, G., & Ezzati, M. (2019). Particulate matter air pollution and national and county life expectancy loss in the USA: a spatiotemporal analysis. *PLoS Med*, 16 (7), e1002856. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002856>
5. Brines, M., Dall'Osto, M., Beddows, D., Harrison, R., Gómez-Moreno, F., Núñez, L., Artíñano, B., Costabile, F., Gobbi, G., Salimi, F., Morawska, L., & Sioutas, C. (2015). Traffic and nucleation events as main sources of ultrafine particles in high-insolation developed world cities. *Atmos Chem Phys*, 15(10), 5929-5945. <https://doi.org/10.5194/acp-15-5929-2015>
6. Brook, R. D. (2008). Cardiovascular effects of air pollution. *Clinical science*, 115 6, 175-87.
7. Cao, J., Chow, J. C., Lee, F. S., & Watson, J. G. (2013). Evolution of PM_{2.5} measurements and standards in the US and future perspectives for China. *AAQR*, 13, 1197-1211. <http://dx.doi.org/10.4209/aaqr.2012.11.0302>
8. Crilley, L. R., Lucarelli, F., Bloss, W. J., Harrison, R. M., Beddows, D. C., Calzolari, G., Nava, S., Valli, G., Bernardoni, V., & Vecchi, R. (2017). Source apportionment of fine and coarse particles at a roadside and urban background site in London during the 2012 summer ClearfLo campaign. *Environ Pollut*, 220 (Pt B), 766-778. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.002>
9. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe (2008, May 21) from <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>
10. Emissions of air pollutants (2025, March 13). An annual publication covering the emissions of some important air pollutants.

<https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20251119131831/https://www.gov.uk/government/statistics/emissions-of-air-pollutants>

11. Fatkhutdinova, L. M., Tafeeva, E. A., Timerbulatova, G. A., & Zalyalov, R. R. (2021). Risks to public health from atmospheric air pollution by fine suspended particles (Riski zdorov'yu naseleniya ot zagryazneniya atmosfernogo vozduxa melkodispersny`mi vzveshenny`mi chasticzami in Russian). *Kazan Medical Journal (Kazanskij medicinskij zhurnal)*, 21(6), 862-876. <https://doi.org/10.17816/KMJ2021-862>
12. Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F., & Wang, X. (2016). The health effects of ambient PM_{2.5} and potential mechanisms. *Ecotoxicol Environ Saf*, 128, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.030>.
13. Finlayson-Pitts, B., & Pitts, Jr. (2000). Chemistry of upper and lower atmosphere. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012257060-5/50010-1>
14. Friedlander, S. K. (2000). Smoke, dust and haze: fundamental of aerosol behavior. 2nd Ed. New York. John Wiley & Sons.
15. Ghobakhloo, S., Khoshakhlagh, A. H., Mostafaii, G. R., Chuang, K.-J., Gruszecka-Kosowska, A., & Hosseinnia, P. (2023). Critical air pollutant assessments and health effects attributed to PM_{2.5} during and after COVID-19 lockdowns in Iran: application of AirQ+ models. *Front. Public Health*, 11, 1120694. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1120694>
16. Kurmangazinova, N. (2025). In Almaty in 2024, the concentration of PM_{2.5} exceeded the norm by almost five times. *Authority*. <https://vlast.kz/novosti/63909-v-almaty-v-2024-godu-koncentracia-pm-25-prevysila-normu-pocti-v-pat-raz.html>
17. Halonen, J. I., Lanki, T., Yli-Tuomi, T., Tiittanen, P., Kulmala, M., & Pekkanen, J. (2009). Particulate air pollution and acute cardiorespiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *Epidemiol*, 20(1), 143-53. <http://dx.doi.org/10.1097/EDE.0b013e31818c7237>
18. Harrison, R. M., Yin, J., Mark, D., Stedman, J., Appleby, R. S., Booker, J., & Moorcroft, S. (2001) Studies of the coarse particle (2.5–10 µm) component in UK urban atmospheres. *Atmos Environ*, 35(21), 3667–3679. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00526-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00526-4).
19. Hao, Y., Gao, C., Deng, S., Yuan M., Song, W., Lu, Z., & Qui, Z. (2019) Chemical characterization of PM_{2.5} emitted from motor vehicles powered by diesel, gasoline, natural gas and methanol fuel. *Sci. Total Environ*, 674, 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.410>.
20. Ivlev, L. S. (1982). Chemical composition and structure of atmospheric aerosols (Ximicheskij sostav i struktura atmosfery`x ae`rozolej in Russian). Publishing House of Leningrad State University.
21. Ivlev, L. S., & Dovgalyuk, Yu. A. (2000). Physics of atmospheric aerosol systems (Fizika atmosfery`x ae`rozol`ny`x system in Russian). St. Petersburg: NIIH St. Petersburg State University.
22. Ivlev, L. S. (2013). Mechanisms of formation and decay of atmospheric aerosols and clouds and their ecological significance (Mexanizmy` obrazovaniya i raspada atmosfery`x ae`rozolej i oblachnosti i ix e`kologicheskoe znachenie in Russian). *Priroda (Nature)*, 5 (2), 182-210.
23. Jiang, N., Dong, Z., Xu, Y., Yu, F., Yin, S., Zhang, R., & Tang, X. (2018). Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles of fugitive dust in Zhengzhou, China. *Aerosol Air Qua. Res.*, 18, 314-329. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.04.0132>
24. Kakareka, S. V., & Salivonchik, S. V. (2021). Modeling of pollution by finely dispersed suspended particles of atmospheric air in an industrial city (Modelirovanie zagryazneniya tonkodispersny`mi vzveshenny`mi chasticzami atmosfernogo vozduxa promy`shlennogo goroda in Russian). *Meteorology and hydrology (Meteorologiya i gidrologiya)*, 5, 62-75. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-5-62-75>
25. Katsouyanni, K., Touloumi, G., Samoli, E., Gryparis, A., Le Tertre, Monopolis, Y., Rossi, G., Zmirou, D., Ballester, F., Boumghar, A., Anderson, H.R., Wojtyniak, B., Paldy, A., Braunstein, R., Pekkanen, J., Schindler C., & Schwartz, J. (2001). Confounding and effect modification in

- the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project. *Epidemiol*, 12(5), 521-31. <https://doi.org/10.1097/00001648-200109000-00011>
26. Kerimray, A. (2020) Air quality in the cities of Kazakhstan. Health effects of air pollution. [PowerPoint slides] UNECE/UNEP - First regional webinar on “Health-relevant air quality data informing policy and the public”.
27. Kenessary, D., Kenessary, A., Adilgireiuly, Z., Akzholova, N., Erzhanova, A., Dosmukhametov, A., Syzdykov, D., Masoud, A. R., & Saliev, T. (2019). Air pollution in Kazakhstan and its health risk assessment. *Ann Glob Health*, 85(1), 133. <https://doi.org/10.5334/aogh.2535>
28. Khan, Md., F., Shirasuna, Y., Hirano, K., & Masunaga, Sh. (2010). Characterization of PM_{2.5}, PM_{2.5-10} and PM_{>10} in ambient air. *Atmos Res*, 96(1), 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.12.009>
29. Kim, K.-H., Kabir, E., & Kabir, Sh. (2015) A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environ Int*, 74, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>.
30. Kumar, P., Kalaiarasan, G., Porter, A. E., Pinna, A., Kłosowski, M. M., Demokritou, P., Chung, K. F., Pain, C., Arvind, D. K., Arcucci, R., Adcock, I. M., & Dilliwai, C. (2020). An overview of methods of fine and ultrafine particle collection for physicochemical characterization and toxicity assessments. *Sci Total Environ*, 756, 143553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143553>
31. Kumar, N., Hamzah, F. M., Diantoro, M., & Akemal, N. (2025) Physicochemical characterization of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} in an urban environment *Curr Appl Phys*, 71, 57-69. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2024.12.006>
32. Li, H., Tatarko J., Kucharski, M., & Dong, Zh. (2015). PM_{2.5} and PM₁₀ emissions from agricultural soils by wind erosion *Aeolian Res*, 19, 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.011>
33. Liu, J., Zhang, J., Ren, L., Wei, J., Zhu, Y., Duan, J., Jing, L. Sun, Zh., & Zhou, X. (2019). Fine particulate matters induce apoptosis via the ATM/P53/CDK2 and mitochondria apoptosis pathway triggered by oxidative stress in rat and GC-2spd cell. *Ecotoxicol Environ Saf*, 180, 280-287. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.013>
34. Liu, H., Ding, S., Nie, H., Shi, Y., Lai, W., Liu, X., Li, K., Tian, L., Xi, Zh., & Lin, B. (2022). PM_{2.5} exposure at different concentrations and modes induces reproductive toxicity in male rats mediated by oxidative and endoplasmic reticulum stress. *Ecotoxicol Environ Saf*, 244, 114042. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114042>
35. Magnani, N. D., Muresan, X. M., Belmonte, G., Cervellati, F., Sticozzi, C., Pecorelli, A., Miracco, C., Marchini, T., Evelson, P., & Valacchi, G. (2016). Skin damage mechanisms related to airborne particulate matter exposure. *Toxicol Sci*, 149(1), 227-36. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv230>
36. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hrobjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021) The PRISMA 2020 Statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, 71.
37. Nevmerzhitsky, N. V. (2016). Methodology for assessing and predicting extreme air pollution on motorways by fine suspended particles PM₁₀ and PM_{2.5} (Publication No. 006653990) [Doctoral dissertation, Saint-Petersburg University]. *DissertCat*.
38. Nhung, N. T. T., Amini, H., Schindler, C., Kutlar, M. J., Dien, T. M., Probst-Hensch, N., Perez, L., & Künzli, N. (2017). Short-term association between ambient air pollution and pneumonia in children: a systematic review and meta-analysis of time-series and case-crossover studies. *Environ Pollut*, 230, 1000-1008. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.063>

39. Nigmatullina, N. (2025) Air condition: anti-rating of cities in Kazakhstan. <https://www.inform.kz/ru/sostoyanie-vozduha-antireyting-gorodov-kazahstana>
40. Ning, Z., He, S., Liao, X., Ma, C., & Wu, J. (2024). Cold waves and fine particulate matter in high-altitude Chinese cities: assessing their interactive impact on outpatient visits for respiratory disease. *BMC Public Health*, 24(1), 1377. <https://doi.org/10.1186/s12889-024-18896-x>
41. Particulate Matter (PM) Pollution (2024). Effective permitting tools for fine particulate matter under the prevention of significant deterioration permitting program. <https://www.epa.gov/pm-pollution>
42. Pavlík, M., Pavlíková, D., Zemanová, V., Hnilička, F., Urbanová, V., & Száková, J. (2012). Trace elements present in airborne particulate matter – stressors of plant metabolism. *Ecotoxicol Environ Saf*, 79, 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.12.009>
43. Pope, C. A. (2000). III Review: epidemiological basis for particulate air pollution health standards *Aerosol Sci Tech*, 32, 4–14. <https://doi.org/10.1080/027868200303885>
44. Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
45. Pu, S., Peng, S., Zhu, J., Liu, Z., Long, D., & Lim, T. (2022). Characteristics of PM_{2.5} and its correlation with feed, nature and NH₃ in a pig-fattening house. *Toxics*, 10(3), 145. <https://doi.org/10.3390/toxics10030145>
46. Putaud, J.-P., Van Dingenen, R., Alastuey, A., Bauer, H., Birmili, W., Cyrys, J., Flentje, H., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H. C., Harrison, R. M., Herrmann, H., Hitznerberger, R., Hüglin, A. C., Jones, M., Kasper-Giebl, A., Kiss, G., Kousa, A., Kuhlbusch, T. A. J., Löschau, G., Maenhaut, W., Molnar, A., Moreno, T., Pekkanen, J., Perrino, C., Pitz, M., Puxbaum, H., Querol, X., Rodriguez, S., Salma, I., Schwarz, J., Smolik, J., Schneider, J., Spindler, G., ten Brink, H., Tursic, J., Viana, M., Wiedensohler, A., & Raes, F. (2010). A European aerosol phenomenology – 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe. *Atmos Environ*, 44 (10), 1308-1320. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.011>
47. Relić, R., & Đukić-Stojić, M. (2023). Influence of environmental pollution on animal behavior. *Contem Agric*, 72 (4), 216-223. <https://doi.org/10.2478/contagri-2023-0029>
48. Seinfeld, J., & Pandis, S. N. (2006). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. Wiley, New York.
49. Spurny, K., & Iech, Ch. (1964). Aerosols (Ae`rozoli in Russian). Moscow. Atomizdat.
50. Strelyaeva, A. B., Barikaeva, N. S., Kalyuzhina, E. A., & Nikolenko, D. A. (2014). Analysis of sources of atmospheric air pollution by fine dust (Analiz istochnikov zagryazneniya atmosfernogo vozduha melkodispersnoj pyl'yu in Russian). *Online bulletin of VolgGASU. Ser. Polythematic (Internet-vestnik VolgGASU. Ser. Politematicheskaya)*, 3(34), 11.
51. Tokbergenov, E. T., Dosmukhametov, A. T., Askarov, A. K., Amrin, M. K., Askarov, D. M., & Beisenbinova, J. B. (2022) Assessment of the aerogenic risk to the health of the population living in the region of the Ulba Metallurgical Plant location (Ocenka ae`rogennogo riska dlya zdorov`ya naseleniya, prozhivayushhego v regione raspolozheniya Ul`binskogo metallurgicheskogo zavoda in Russian). *Health risk analysis (Analiz riska zdorov`yu)*, 4, 45-55. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.4.04>.
52. Tursumbayeva, M., Kerimray, A., Karaca, F., & Permadi, D. A. (2022). Planetary boundary layer and its relationship with PM_{2.5} concentrations in Almaty, Kazakhstan. *Aerosol Air Qual Res*, 22, 210294. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210294>
53. Varenik, A. V., Kalinskaya, D. V., & Myslina, M. A. (2021). Investigation of suspended microparticles in the atmosphere of the coastal zone of the Black Sea based on natural and satellite data (Issledovanie vzveshenny`x mikrochasticz v atmosfere beregovoj zony` Chernogo morya po naturny`m i sputnikovym dannym in Russian). *Marine Hydrophysical Journal*

(*Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*), 37(3), 350-361. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-350-361>

54. Valavanidis, A., Fiotakis, K., & Vlachogianni, T. (2010). The role of stable free radicals, metals and parts of airborne particulate matter in mechanisms of oxidative stress and carcinogenicity. In: Zereini, F., Wiseman, C. (eds) *Urban airborne particulate matter*. Environmental Science and Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12278-1_21
55. World health statistics 2018: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals. Geneva: World Health Organization (2018).
56. Xu, G., Jiao, L., Zhang, B., Zhao, S., Yuan, M., Gu, Y., Liu, J., & Tang, X. (2017). Spatial and Temporal Variability of the PM_{2.5}/PM₁₀ Ratio in Wuhan, Central China. *Aerosol Air Qual Res*, 17, 741-751. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.09.0406>
57. Zagorodnov, S. Y. (2018). Dust pollution of the city's atmospheric air as an underestimated risk factor for human health (Py'levoe zagryaznenie atmosfernogo vozduxa goroda kak nedoocenennyj faktor riska zdorov'yu cheloveka in Russian). *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanistics (Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politexnicheskogo universiteta. Prikladnaya e'kologiya. Urbanistika)*, 2 (30), 124–33.
58. Zagorodnov, S. Y., Mai, I. V., & Kokoulina A. A. (2019). Fine particles (PM_{2.5} and PM₁₀) in the atmospheric air of a large industrial region: problems of monitoring and rationing of industrial emissions (Melkodispersny'e chasticy (PM_{2.5} i PM₁₀) v atmosfernom vozduxe krupnogo promy'shennogo regiona: problemy` monitoringa i normirovaniya v sostave proizvodstvenny`x vy`brosov in Russian). *Hygiene and sanitation (Gigiena i sanitariya)*, 98(2), 142-147. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-2-142-147>
59. Zheng, S., Pozzer, A., Cao, C. X., & Lelieveld, J. (2015). Long-term (2001–2012) concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}) and the impact on human health in Beijing, China. *Atmos. Chem. Phys*, 15, 5715–5725. <https://doi.org/10.5194/acp-15-5715-2015>

Қалқымалы бөлшектер (PM_{2.5} және PM₁₀): заманауи түсініктер және токсикологиялық бағалау

Жанат Байгазинов, Елена Поливкина, Нурлан Мухамедияров, Касым Жумадилов, Саян Сальменбаев, Лаура Кенжина

Аңдатпа. Атмосфералық ластанудың өзекті мәселелерінің бірі - қалқымалы бөлшектер ("particulate matter" – PM). Бұл бөлшектер табиғи және антропогендік шығу тегімен сипатталады. Бұл шолуда қалқымалы бөлшектер туралы заманауи түсініктер, сондай-ақ оларды классификациялау тәсілдері мен токсикологиялық қасиеттері жинақталған. Аэродинамикалық өлшемі 2,5 және 10 мкм (PM_{2.5} және PM₁₀) болатын бөлшектер экологиялық тұрғыдан ең маңызды әрі қауіпті топқа жатқызылады. Антропогендік текті PM_{2.5-10} атмосфералық ауада барлық жерде және тұрақты түрде кездеседі. Жерге жақын атмосфера қабатындағы PM_{2.5-10} бөлшектерінің негізгі көздері - құрылыс, тау-кен өндірісі, отын-энергетика салаларының кәсіпорындары және автокөлік құралдары. Мақалада Қазақстан, Ресей Федерациясы, Еуропа Одағы елдері, Қытай және АҚШ-тағы PM_{2.5-10} үшін қолданыстағы экологиялық нормативтерге салыстырмалы сипаттама берілген. Еуропа Одағы елдерінде, Қытай мен АҚШ-та, Ресей мен Қазақстанда қолданылатын PM_{2.5} үшін максималды біржолғы шекті рұқсат етілген концентрациялар (ШЕК) бекітілмеген. Сонымен қатар, Еуропа Одағы елдері мен АҚШ-та PM_{2.5-10} үшін орташа тәуліктік және жылдық ШЕК көрсеткіштері Ресей мен Қазақстанға қарағанда әлдеқайда қатаң. Еуропа Одағы елдері, Қытай және АҚШ-тағы PM_{2.5-10} бөлшектерінің тұрақты әсері туралы деректерді талдау негізгі қауіп топтарын анықтауға мүмкіндік берді. Бұл қауіптер жүрек-қантамыр және тыныс алу жүйесі

ауруларының өсуімен, сондай-ақ осы аурулардың созылмалы түрлерінің асқынуы салдарынан халық өлім-жітімінің артуымен байланысты. $PM_{2.5-10}$ токсикологиялық әсерін бағалаудың күрделілігі олардың химиялық құрамы мен морфологиясының айтарлықтай біртекті еместігімен және тұрақсыздығымен, сондай-ақ дисперсиялық қасиеттерімен түсіндіріледі. Тәуекелдерді басқарудың және халық денсаулығының көрсеткіштерін жақсартудың негізгі құралы - $PM_{2.5-10}$ ластану деңгейін төмендету. Қазақстанда $PM_{2.5-10}$ мөлшерін мемлекеттік бақылау құралдары да атмосфералық ауаның ластануын азайтуға бағытталған, бірақ олар халық денсаулығына төнетін қауіптерді басқару міндеттерін шешуде жеткілікті деңгейде қолданылмай отыр.

Түйін сөздер: атмосфералық ауа; қатты бөлшектер; PM_{10} ; $PM_{2.5}$; токсикологиялық бақылау; нормалау; денсаулыққа қауіптер.

Взвешенные частицы ($PM_{2.5}$ и PM_{10}): современные представления и токсикологическая оценка

Жанат Байгазинов, Елена Поливкина, Нурлан Мухамедияров, Касым Жумадилов, Саян Сальменбаев, Лаура Кенжина

Аннотация. Одной из современных проблем атмосферного загрязнения являются твердые частицы ("particulate matter" – PM). PM имеют как природное, так и антропогенное происхождение. В обзоре обобщены современные представления о твердых частицах (PM), а также о подходах к их классификации и токсикологических свойствах. К наиболее экологически значимым и опасным относят частицы с аэродинамическим размером 2,5 и 10 ($PM_{2.5}$ и PM_{10}). $PM_{2.5}$ и PM_{10} антропогенного происхождения присутствуют в атмосферном воздухе практически повсеместно и постоянно. Основными источниками $PM_{2.5}$ и PM_{10} в приземной атмосфере являются предприятия строительной, горнодобывающей, топливно-энергетической отраслей и автомобильный транспорт.

В статье дана сравнительная характеристика существующих экологических нормативов для $PM_{2.5}$ и PM_{10} в Казахстане, Российской Федерации, странах Евросоюза, Китае и США. В странах Евросоюза, Китае и США отсутствуют максимально разовые предельно допустимые концентрации (ПДК) для $PM_{2.5}$, применяемые в Российской Федерации и Казахстане. При этом страны Европейского Союза и США используют более строгие нормативы среднесуточной и среднегодовой ПДК $PM_{2.5-10}$, чем в Российской Федерации и Казахстане.

Анализ данных о постоянном воздействии $PM_{2.5-10}$ в странах Европейского Союза, Китая, США позволил выделить основные группы рисков, которые связаны с ростом целого ряда заболеваний сердечно-сосудистой и дыхательной систем, а также смертностью населения на фоне обострения хронической формы данных заболеваний. Сложность оценки токсикологического влияния $PM_{2.5-10}$ обусловлена значительной неоднородностью и нестабильностью их химического состава и морфологии, а также дисперсионными свойствами. Основным инструментом управления рисками и улучшения показателей здоровья населения является снижение уровней загрязнения $PM_{2.5-10}$. В Казахстане инструменты государственного контроля за содержанием $PM_{2.5-10}$ тоже нацелены на снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха, однако они недостаточно используются для решения задач управления рисками для здоровья населения.

Ключевые слова: атмосферный воздух; взвешенные частицы; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; токсикологическая оценка; нормирование; риски для здоровья.

Comprehensive assessment of the quality and safety of domestic and drinking water in the Almalinsky district of Almaty

Gulnar Bugubaeva, Sandugash Abilkasova*, Mariya Suleimenova, Zhanat Shaikhova, Zhamila Alimkulova

Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan;
bugubaevagulnar@gmail.com, sandugash.abilkasovaa@gmail.com,
suleimenova.mariya@gmail.com, zh.shaikhova1965@gmail.com,
zhamilya25091982@gmail.com

*Correspondence: sandugash.abilkasovaa@gmail.com

Citation: Bugubaeva, G., Abilkasova, S., Suleimenova, M., Shaikhova, Zh., Alimkulova, Zh. (2026). Comprehensive assessment of the quality and safety of domestic and drinking water in the Almalinsky district of Almaty. *Journal of Ecology and Sustainability*, 154(1), 42-54.
<https://doi.org/10.32523/4ap9mf35>

Academic Editor:
A. Zandybay

Received: 09.01.2026
Revised: 05.02.2026
Accepted: 16.03.2026
Published: 31.03.2026



Copyright: © 2026 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 study presents a comprehensive assessment of household and drinking water quality within the centralized water supply system of the Almalinsky district of Almaty. The primary objective was to perform an integrated multi-parameter evaluation of drinking water safety and quality by combining organoleptic, physicochemical, toxicological, and microbiological indicators within a unified analytical framework.

Organoleptic characteristics were determined in accordance with current sanitary standards. Physicochemical parameters, including total mineralization, hardness, chloride, nitrate and nitrite content, alkalinity, pH, and permanganate oxidizability, were analyzed using gravimetric, titrimetric, and complexometric methods. Toxicological indicators were determined by atomic absorption spectrometry following acid mineralization. Microbiological safety was evaluated by determining total viable count and the presence of indicator organisms (*Escherichia coli*, total coliform bacteria, and *Pseudomonas aeruginosa*).

The results demonstrated compliance of most parameters with established sanitary and hygienic standards. Concentrations of chlorides (29.35–35.75 mg/l), nitrates (5.0–5.7 mg/l), and nitrites (2.7–3.0 mg/l) were significantly below maximum permissible levels. Heavy metal concentrations were within regulatory limits. Water oxidizability ranged from 3.2 to 5.2 mg O₂ /l, indicating a low content of oxidizable organic substances. An elevated chromium concentration (0.8 mg/l) was identified, slightly exceeding permissible values and requiring periodic monitoring.

Overall, the integrated assessment confirms that drinking water in the Almalinsky district is characterized by satisfactory physicochemical and microbiological quality and is suitable for domestic and drinking use without additional treatment.

Keywords: domestic and drinking water; water quality; sanitary and hygienic indicators; oxidizability; hardness; toxic elements; microbiological safety.

1. Introduction

The current imperfection of social and living conditions, the economy, and the environment causes a number of acute and complex problems with water.

Water resources are abundant and renewable, but the scale of water consumption for domestic and drinking needs exceeds them by almost two orders of magnitude. The problem of providing the population with good-quality water remains relevant in a number of regions. High pollution of water sources and inefficient water treatment technologies are the main reasons for the unsatisfactory quality of drinking water (Wei et al., 2025; Madhav et al., 2019; Khan et al., 2022; Azat et al., 2023).

Maintaining and improving the safety of drinking water for domestic use requires flexible control aimed at reducing risks (Gunnarsdottir et al., 2020; Toguzbaeva et al., 2014).

In addition, more information needs to be provided to consumers, who are beginning to understand that absolute safety is impossible. In this regard, testing drinking water for safety and quality is a pressing issue. To ensure water quality in water sources and water consumption systems, a number of regulatory documents based on MPC values are used, the main ones being the following: GOST 2874-82 “Drinking water. Hygienic requirements and quality control”; GOST 2761-84 “Sources of centralized domestic and drinking water supply. Hygienic and technical requirements and selection rules”; “Sanitary standards for the maximum permissible content of harmful substances in water in water bodies used for domestic, drinking, and cultural and domestic purposes” SanPiN 42-121-4130-88; “Sanitary rules and standards for the protection of surface waters from pollution” SanPiN 4630-88 (Jumagulov et al., 2009).

Water quality is characterized by its physical, chemical, and bacteriological properties. There are basic indicators of drinking water quality (Li et al., 2019; Rocha et al., 2015; Manna et al., 2023). They can be divided into the following groups:

- Organoleptic indicators (smell, taste, color, turbidity) (Gutiérrez-Capitán et al., 2019; Isaev et al., 2025);
- Toxicological indicators (aluminum, lead, arsenic, phenols, pesticides) (Wollin et al., 2005; Villaescusa et al., 2008);
- Indicators affecting the organoleptic properties of water (pH, total hardness, petroleum products, iron, manganese, nitrates, calcium, magnesium, permanganate oxidizability, sulfides) (Lou et al., 2007; Veríssimo et al., 2007);
- Chemicals formed during water treatment (free residual chlorine, chloroform, silver) (Sultangazieva et al., 2024; Clark et al., 2002; Deborde et al., 2008);
- Microbiological indicators (thermotolerant coliforms or *E. coli*), Total Microbial Count (TMC) (Wen et al., 2020; Holcomb et al., 2020).

The group of salt compounds includes chlorides and nitrates, which are present in water in the form of free chlorine (hypochlorous acid, hyperchlorite ions, or dissolved elemental chlorine), bound chlorine, and nitrates contained in drinking water. Nitrites, which appear in the human diet due to their prevalence in nature or deliberate addition under certain conditions, can react with secondary amines to form nitrosamines. Amines necessary for nitrosation are widespread in human nutrition, as well as in some cosmetics and medicines. Nitrosation also occurs in the digestive tract (Bologan et al., 2025; Osipenko et al., 2014).

A direct criterion for the safety of drinking water in terms of epidemics is the absence of pathogenic microorganisms in it. However, the direct determination of pathogenic flora in water is a technically difficult task. Therefore, indirect indicators of its quality are used (Richiardi et al., 2023; Kristanti et al., 2022; Yuan et al., 2023).

High contamination of water sources and ineffective water treatment technologies are the main reasons for the unsatisfactory quality of drinking water.

2. Materials and methods

Samples for safety and quality testing were taken from a centralized domestic and drinking water supply in the Almalinsky district of Almaty. Sampling was carried out in accordance with current regulatory requirements.

Sampling was carried out during the spring–summer period (April–June) at five points of the centralized water supply system in the Almalinsky district. The study was conducted as a single-stage assessment; seasonal variability of water quality indicators was not analyzed.

The sample size (five sampling points) was defined according to the territorial coverage of the centralized water supply system and the monitoring design of the study. The objective was to assess compliance with regulatory standards at representative locations within the district; therefore, the selected number of samples was considered sufficient for sanitary-hygienic evaluation.

The following parameters were studied: organoleptic indicators, salt composition, total hardness of domestic and drinking water, oxidizability of domestic and drinking water, physical and chemical characteristics of domestic and drinking water, content of toxic elements in domestic and drinking water, and the microbiological indicators of domestic drinking water (Regulation).

The organoleptic assessment of drinking water quality was carried out in accordance with the requirements of SanPiN RK “Hygienic requirements for the quality of water in centralized drinking water supply systems” and current GOST standards. The main sanitary and hygienic indicators were determined: smell, taste, color, and turbidity (SanPiN 2.1.4.1116-02).

Water turbidity was determined using a standard scale and expressed in mg/l. Transparency was assessed visually using a point scale. Color was determined by comparison with a reference scale and expressed in color degrees. Odor and taste were determined organoleptically at a temperature of 20 °C and after heating the sample to 60 °C. In addition, a visual assessment of the colored water column was carried out to check for the absence of aquatic organisms and surface film. The results obtained were compared with the standard values established for drinking water.

To determine the salt content, samples of drinking water from the Almalinsky district were examined to determine the salt composition indicators. The salt composition of the water was determined by the gravimetric method based on the dry residue after evaporation of the filtered sample at a temperature of 105 – 110 °C to a constant mass. Total mineralization was expressed in mg/dm³.

The content of individual components of the salt composition was determined by titrimetric methods: chloride ions – by the argentometric method (Mora method), total hardness–by the complexometric method using trilon B, hydrocarbonate ions – by the acid-base titration method. The analyses were performed in triplicate. The results obtained were compared with the standard values for drinking water (Moskvichev et al., 2013).

The total and temporary water hardness was determined by the titrimetric method in accordance with GOST 2874-82 “Drinking Water”. Hygienic requirements and control methods” and SanPiN RK 2.1.4.1078-01.

Temporary hardness was determined in 100-ml water sample with the addition of 2-3 drops of methyl orange. Titration with 0.1 N HCl was carried out until the color of the solution changed from yellow to orange. Calculated using the formula:

$$H_{temp.} = \frac{V_A \cdot C_A \cdot 1000}{V_W} \text{mg/eq} \quad (1)$$

where V_A is the volume of consumed acid, ml; C_A is the normal HCl concentration; V_W is the volume of water, ml.

Total hardness was determined after boiling 100 ml of the sample with 20 ml of an alkaline mixture (10 ml of 0.1 N NaOH + 10 ml of 0.1 N Na₂CO₃). After cooling, the sample was filtered and titrated with 0.1 N HCl until it turned orange. Calculated using the formula:

$$H_{total} = \frac{(V_{al} \cdot C_{al} - V_A \cdot C_A) \cdot 1000}{V_W} \text{ mg/eq} \quad (2)$$

where V_{al} is the volume of the alkaline mixture, ml; C_{al} is its normal concentration; the remaining symbols are the same.

The oxidizability of domestic and drinking water was determined in accordance with GOST 33087-2014 “Water. Method for determining chemical oxidizability” and SanPiN RK 2.1.4.1078-01. The method is based on the oxidation of organic substances with potassium permanganate (KMnO_4) in acidic and alkaline environments, followed by the titration of the excess KMnO_4 with oxalic acid ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) solution. Acidic environment: 100 ml of water sample, 5 ml of diluted H_2SO_4 (1:3) and 10–15 ml of 0.1 N KMnO_4 are added to a 250 ml conical flask. The sample is boiled for 10 minutes under a watch glass, then 10 ml of 0.1 N $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ is added and titrated with 0.01 N KMnO_4 until a pale pink color persists for ≥ 1 minute. Alkaline medium: 100 ml of the water sample is boiled with 0.5 ml of 50% NaOH , 10–15 ml of 0.1 N KMnO_4 is added, and boiled for 10 minutes. After cooling, add 5 ml of H_2SO_4 (1:3) and 10 ml of 0.1 N $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, titrate with 0.1 N KMnO_4 until a stable pink color is obtained.

The oxidability (Q , mg O_2 /l) is calculated by the formula:

$$Q = \frac{[(V_1 + V_2)N_1 - V_3N_2] \cdot E \cdot 100}{\alpha} \quad (3)$$

V_1 – volume of KMnO_4 added at the start of boiling, ml; V_2 – volume of KMnO_4 consumed for titration of excess $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, ml; V_3 – volume of $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, ml; N_1 , N_2 – normality of KMnO_4 and $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, N; α – sample volume, ml; $E = 8$ oxygen equivalents.

The results are expressed in mg O_2 /l and compared with the standard values for drinking water.

Tests of domestic drinking water for mercury (GOST 26927), lead (GOST 26932), cadmium (GOST 26933), and arsenic (GOST 26930) content were carried out in accordance with current GOST standards. The concentrations of heavy metals were determined by atomic absorption spectrometry (AAS) after preliminary acid mineralization of the samples.

The essence of the method is to measure the absorption of resonant radiation by the atoms of the elements under study in the gas phase. The cold vapor method was used to determine mercury, while flame or electrothermal atomization was used for lead, cadmium, and arsenic. Metal concentrations were expressed in mg/dm^3 and compared with the standard values established for domestic drinking water.

Microbiological testing of drinking water was carried out in accordance with the requirements of GOST 18963–73 “Drinking water. Methods of sanitary and bacteriological analysis” and SanPiN RK 2.1.4.1074-01 “Hygienic requirements for the quality of water in centralized drinking water supply systems.”

The total microbial count (TMCA) was determined by sowing on solid nutrient media with incubation at $(36 \pm 1)^\circ\text{C}$; The results were expressed in CFU/g. *Escherichia coli* group bacteria (fecal coliforms (FC), coliforms) were detected by membrane filtration followed by cultivation on selective media; the result was expressed in 100 g of water. *Pseudomonas aeruginosa* was determined by sowing on selective media with confirmation of typical colonies; the result was evaluated in 100 g of water.

Measurement uncertainty was evaluated based on repeatability of analyses and the performance characteristics of the analytical instruments used. Confidence level for the reported results corresponds to 95% ($k = 2$). The obtained values were within acceptable analytical error limits established by the relevant GOST and SanPiN standards.

No artificial intelligence tools were used in the data analysis or manuscript preparation.

All analyses were conducted in triplicate, and the results are presented as mean \pm standard deviation. Statistical processing was performed using standard descriptive statistical methods.

Inferential statistical analysis was not applied, as the study was aimed at assessing compliance with regulatory standards rather than comparing experimental groups.

3. Results

3.1. Organoleptic Assessment of Drinking Water

The results of tests conducted on the organoleptic properties of domestic and drinking water in the Almalinsky District are presented in Table 1, "Study of the organoleptic properties" of domestic and drinking water samples.

The results of the study show that the organoleptic characteristics of the samples taken comply with the sanitary and hygienic requirements set forth in the regulatory documentation: San PiN 2.1.4.559-96 Drinking water. Hygienic requirements for the quality of drinking water in centralized drinking water supply systems. Quality control; San PiN 2.1.4.107-0.1 Drinking water. Hygienic requirements for the quality of water in centralized drinking water supply systems. Quality control.

Table 1. Study of organoleptic indicators of domestic drinking water

Organoleptic characteristics	Characteristics of indicators				
	Name of test samples				
	№1	№2	№3	№4	№5
Turbidity mg/l	10	1.2	1.1	1.2	1.3
Colorfulness C	15	15	14	13	15
Odor (at 20 °C)	The smell of chlorine	Pleasant smell	The sensation of a spoiling smell	The smell characteristic of clear water	The smell of high-quality water, pleasant
Aftertaste (at 20°C)	Pleasant, but slightly salty	Pleasant (without a cloudy aftertaste)	No foreign taste	The water tastes pleasant	The water is good without any unpleasant taste
Water transparency	Transparent	No cloudy sediment	Transparent	Clear without sediment	Slight cloudiness
Coloring the painted column	No coloring film	Slightly yellowish	No coloring on the coloring column	No coloring film	No coloring

The results of actual data on organoleptic characteristics (smell, taste, color, turbidity, appearance) comply with the approved standards of acceptability, which is especially important for maintaining the water-salt balance in the human body.

3.2. Chemical Analysis of Drinking Water

The analysis of the results showed that all tested samples meet the requirements of the regulatory document SanPiN 2.1.4.559-96 "Drinking Water" The test results are presented in Table 2, "Analysis of drinking water for salt content." Analysis of the results shows that all samples taken for testing meet the requirements of regulatory documentation: SanPiN 2.1.4 559-96 "Drinking water. Hygienic requirements for the quality of water in centralized drinking water supply systems. Quality control" and ST RK 1432-2005.

Table 2. Analysis of drinking water for salt composition indicators

Name of indicators unit of measurement	Actual results					Standard for RD (no more than)	Regulatory documentation (RD) for testing methods
	Sample №1	Sample №2	Sample №3	Sample №4	Sample №5		
Chlorides mg/l	35.75	30.14	29.35	29.15	32.78	35.0	GOST 23268.17-78 GOST 18826 73 p. 2.3 San PiN 2.1.4559-9624.08.2010
Nitrates mg/l	5.7	5.5	5.0	5.0	5.6	45	
Nitrites mg/l	2.9	2.7	3.0	2.7	2.9	3.3	

All water samples tested for chloride, nitrate, and nitrite content meet regulatory requirements. The concentrations of these ions are significantly below the maximum permissible values, confirming their safety for domestic and drinking use.

The drinking water samples were tested to determine their aluminum, chromium, and nickel content (Table 3).

Table 3. Determinations of inorganic substances (aluminum, chlorine, nickel) in test samples

Name of indicator	Units of measurement	Actual values	Standard for RD
Aluminum	mg/l	0.25 – 0.40	0.5
Chrome	mg/l	0.8	0.5
Nickel	mg/l	0.05 – 0.08	0.1

Analysis of the data in Table 3 shows that the aluminum and nickel concentrations in the drinking water samples meet the RD requirements. The exception is the chromium content: its amount reaches 0.8 mg/l, which exceeds the standards.

3.3. Hardness and Oxidizability of Drinking Water

The results of the study of the hardness and oxidizing capacity of drinking water show that, despite the unified water supply system, the water consumed by residents of the city of Almaty is characterized by different values of total hardness in individual areas of the southern capital (Tables 4 and 5).

Table 4. Characteristics of the softness of domestic and drinking water based on the total hardness of water in the Almalinsky district, Almaty

Name of indicator	Units of measurement	Actual values	Permissible norms for RD	Testing method
Total mineralization	mg/dm ³	210 – 480	200–500	GOST 18164-72
Hydrogen index (pH)	unit	6.5 – 7.8	6.0–8.0	GOST 26449.1-85
Oxidizable permanganate	mg O ₂ /l	3.2 – 5.2	≤ 2.0	GOST 23268.12-78

Surfactants, anionic	mg/dm ³	0.01 – 0.04	≤ 0.05	GOST 51211-98
Total alkalinity	mg-eq/dm ³	1.2 – 5.5	0.5–6.5	GOST 26449.1-85

Table 5. Results of determining the hardness of domestic and drinking water

Indicator	Units of measurement	Sample №1	Sample №2	Sample №3	Sample №4	Sample №5	Standard for RD	Test method
Temporary hardness (H _{temp})	mg-eq/dm ³	2.1	2.3	2.0	2.2	2.1	7.0	GOST 33087-2014, titrimetric method
Overall hardness (H _o)	mg-eq/dm ³	3.5	3.8	3.6	3.7	3.5	10.0	GOST 33087-2014, titrimetric method

The oxidizability (Q) in an acidic environment ranges from 3.2 to 4.5 mg O₂/l, which complies with drinking water standards (no more than 5 mg O₂/l). In an alkaline environment, the oxidizability values were slightly higher – 4.0–5.2 mg O₂ /l, which is due to the oxidation of hard-to-oxidize organic compounds.

The results show that the oxidizability of drinking water in the Almalinsky district is within the regulatory limits, which indicates a low content of easily and difficultly oxidizable organic substances and satisfactory water quality for domestic and drinking purposes.

3.4. Heavy Metal and Microbiological Indicators of Drinking Water Quality

Analysis of the data presented (Table 6) indicates that the drinking water samples taken meet the requirements for heavy metals (mercury, lead, cadmium, arsenic) (Zamora-Ledezma 2021) in domestic drinking water from centralized water supply systems. (GOST 2692786, GOST 26932-86, GOST 26933-86, GOST 4152-89, and SanPiN 42-121-4130-88).

Table 6. Testing drinking water for heavy metal content (mg/l)

Name of indicators, unit of measurement	Standard for RD	RD on testing methods	HM content
Mercury, mg/l	0.0005	GOST 26927-86	0.0002
Lead, mg/l	0.03	GOST 18293-72	0.009
Cadmium, mg/l	0.001	GOST 26933-86	0.0003
Arsenic, mg/l	0.05	GOST 4152-89	0.001

It was found that, according to microbiological indicators, the water samples studied comply with medical and biological requirements and sanitary standards for water quality, which are reflected in Table 7. Thus, from the point of view of microbiological indicators, drinking water is safe.

Table 7. Study of microbiological indicators of domestic and drinking water

Name of indicator	Units of measurement	Actual values	Norm according to RD	Test method
Total viable count (TVC), CFU/g	CFU/g	15 – 80	≤100	GOST 18963-73, SanPiN 4.01.004-97
Total coliform bacteria, per 100 g	CFU /100 g	Not found	Not allowed	GOST 18963-73, SanPiN 2.1.4.559-96
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , per 100 g	CFU /100 g	Not found	Not allowed	GOST 18963-73, SanPiN 4.01.004-97

Analysis of the results obtained from testing drinking water samples is presented in Table 7. It allows us to conclude that the drinking water samples fully comply with all requirements of regulatory documentation.

4. Discussion

The analysis of the obtained data indicates that the drinking water in the Almalinsky district generally complies with established sanitary and hygienic requirements. The results of organoleptic assessment confirm acceptable sensory characteristics of the water, which indirectly indicate the effectiveness of water treatment and the stability of water quality during distribution through centralized supply systems.

The chemical composition of the studied water samples is characterized by concentrations of major ions that do not exceed permissible values. This suggests the absence of significant anthropogenic pollution and indicates satisfactory protection of water sources. Variations in water hardness observed at different sampling points, despite a unified water supply system, may be associated with local conditions of the distribution network and the physicochemical interaction of water with pipeline materials. These spatial variations highlight the importance of representative monitoring within different sections of centralized supply networks.

The values of oxidizability in acidic and alkaline media remained within regulatory limits, indicating a low content of organic substances subject to oxidation. Slight differences between acidic and alkaline oxidizability can be attributed to the presence of stable organic compounds of natural origin and do not indicate deterioration of water quality.

The assessment of inorganic elements showed compliance with regulatory requirements for aluminum and nickel. At the same time, an increased chromium content was identified, which requires particular attention in the context of long-term water quality control. Chromium contamination in drinking water is toxicologically significant, especially considering potential risks associated with certain chromium species. The observed elevated chromium concentration may reflect local hydrogeochemical characteristics or anthropogenic influences within the distribution system. Even isolated exceedances may serve as early indicators of emerging risk factors, emphasizing the need for systematic trace element monitoring and, if necessary, further speciation analysis.

The concentrations of priority toxic elements, including mercury, lead, cadmium, and arsenic, were within permissible limits, confirming the safety of drinking water in terms of toxicological indicators. This reflects the effectiveness of both source water protection and applied treatment technologies.

Microbiological analysis demonstrated compliance with sanitary and epidemiological standards. The absence of indicators and opportunistic microorganisms indicates adequate disinfection and sanitary protection throughout the water supply system, ensuring epidemiological safety for the population.

Importantly, the present study establishes baseline integrated data on organoleptic, physicochemical, toxicological, and microbiological parameters of drinking water in the Almalinsky district. The formation of such baseline datasets is essential for long-term environmental and sanitary monitoring, as it enables the detection of temporal trends, gradual changes in water composition, and early identification of potential risk factors.

Overall, the discussion of the results confirms that the drinking water in the Almalinsky district meets regulatory requirements and is suitable for domestic and drinking use. Regular comprehensive monitoring of organoleptic, chemical, toxicological, and microbiological parameters remains a key prerequisite for maintaining the sanitary reliability of centralized drinking water supply systems.

5. Conclusion

The analysis of domestic drinking water in the Almalinsky district demonstrates that the studied samples comply with the organoleptic requirements - turbidity, color, odor, taste, transparency, and column color - established by SanPiN 2.1.4.559-96 "Drinking Water." Hygienic requirements for the quality of drinking water in centralized drinking water supply systems. Quality control."

The results of testing the salt composition of domestic drinking water samples show that the samples contain chlorides in the range of 29.35-35.75 mg/l (standard 350 mg/l); nitrates – 5.0-5.7 mg/l (standard 45); nitrites – 2.7-3.0 mg/l (standard 3.3).

The physical and chemical parameters of the water (total mineralization, hardness, oxidizability, chloride, nitrate, nitrite, aluminum, chromium, and nickel content) comply with established standards, with the exception of a slight excess of chromium (0.8 mg/l), which requires periodic monitoring. The oxidizability of water in acidic and alkaline environments ranged from 3.2 to 5.2 mg O₂ /l, which is within sanitary standards.

The content of heavy metals (mercury, lead, cadmium, arsenic) does not exceed permissible concentrations, which confirms the safety of water in terms of toxic parameters.

The content of heavy elements in drinking water is mercury 0.0002 mg/l (standard 0.0005), lead 0.009 (standard 0.1-0.3 mg/l); cadmium 0.0003 (standard 0.001 mg/l); arsenic 0.001 (standard 0.05 mg/l).

The physiological adequacy of drinking water meets regulatory requirements.

Microbiological indicators (Total viable count (TVC), Total coliform bacteria, *Pseudomonas aeruginosa*) are also within regulatory limits, which indicates the high sanitary safety of drinking water for the population.

Thus, the results of a comprehensive study confirm that drinking water in the Almalinsky district meets sanitary and hygienic requirements and can be used for domestic and drinking purposes without additional treatment.

6. Supplementary Materials: no supplementary materials.

7. Author Contributions

Conceptualization – G.B., M.S., S.A.; methodology – Zh.Sh.; investigation – G.B., S.A.; resources – Zh.A., Zh.Sh.; data curation – G.B., M.S.; writing - original draft preparation – S.A., Zh.Sh.; writing - review and editing – G.B., S.A., M.S.; visualization – Zh.A.; supervision – M.S.

8. Author Information

Bugubaeva, Gulnar – candidate of chemical sciences, assistant professor, Almaty Technological University, Tole bi st., 100, Almaty, Kazakhstan, 050012; bugubaevagulnar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6550-5275>

Abilkasova, Sandugash – candidate of technical science, associate professor, Almaty Technological University, Tole bi st., 100, Almaty, Kazakhstan, 050012; sandugash.abilkasovaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8322-4592>

Suleimenova, Mariya – candidate of chemical sciences, associate professor, Almaty Technological University, Tole bi st., 100, Almaty, Kazakhstan, 050012; suleimenova.mariya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5455-6475>

Shaikhova, Zhanat – master of technical sciences, senior-lecturer, Almaty Technological University, Tole bi st., 100, Almaty, Kazakhstan, 050012; zh.shaikhova1965@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5909-4182>

Alimkulova, Zhamila – master of technical sciences, senior-lecturer, Almaty Technological University, Tole bi st., 100, Almaty, Kazakhstan, 050012; zhamilya25091982@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9938-6710>

9. Funding: this research received no external funding.

10. Acknowledgements: the authors declare that there are no acknowledgements.

11. Conflicts of Interest: the authors declare no conflicts of interest.

12. References

1. Azat, S., Kabdrakhmanova, S., Kabdrakhmanova, A., Abdiev, K., Aryp, K., Kuldeev, E., Khalkhabay, B., Sultakhan, Sh., & Rush, A. (2023). Quality indicators of drinking water of the Maisky district of the Pavlodar region of the Republic of Kazakhstan (Kachestvennye pokazateli pit'evoy vody Majskogo rajona Pavlodarskoj oblasti Respubliki Kazahstan in Russian). *Bulletin of the NNC RK*, 2, 25-32. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-25-32>
2. Bologan, V., Scurtu, R., Curteanu, M., Ciobanu, V., Trafail, S., & Ciobanu, E. (2025). Evaluation of the chemical composition of drinking water from different sources. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*, 13(2), 58-74. <https://doi.org/10.17721/fujcV13I2P58-74>
3. Clark, R. M., & Sivaganesan, M. (2002). Predicting chlorine residuals in drinking water: Second order model. *Journal of water resources planning and management*, 128(2), 152-161. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2002\)128:2\(152\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128:2(152))
4. Deborde, M., & Von Gunten, U. R. S. (2008). Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment - kinetics and mechanisms: a critical review. *Water research*, 42(1-2), 13-51. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.025>
5. Gunnarsdottir, M. J., Gardarsson, S. M., Figueras, M. J., Puigdomènech, C., Juárez, R., Saucedo, G., Arnedo J., Santos J., Monterio S., Avery L., Pagaling E., Allan R., Abel L., Eglitis J., Hamsch B., Hügler M., Rajkovic A., Smigic N., Udovicki B., Albrechtse H., & Hunter, P. (2020). Water safety plan enhancements with improved drinking water quality detection techniques. *Science of the total environment*, 698, 134185. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134185>
6. Gutiérrez-Capitán, M., Brull-Fontserè, M., & Jiménez-Jorquera, C. (2019). Organoleptic analysis of drinking water using an electronic tongue based on electrochemical microsensors. *Sensors*, 19(6), 1435. <https://doi.org/10.3390/s19061435>
7. Holcomb, D. A., & Stewart, J. R. (2020). Microbial indicators of fecal pollution: recent progress and challenges in assessing water quality. *Current environmental health reports*, 7(3), 311-324. <https://doi.org/10.1007/s40572-020-00278-1>
8. Drinking water. Hygienic requirements for the quality of bottled water. Quality control. SanPiN 2.1.4.1116-02. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30175838&pos=4;-106#pos=4;-106
9. Isaev, A., Sadigova, S., Nagiyeva, I., & Bakhtiyarova, S. (2025). Bu assessment of organoleptic and chemical parameters of drinking water. *Norwegian Journal of development of the International Science No*, 156, 63. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15397799>

10. Jumagulov, A., Nikolayenko, A., & Mirkhashimov, I. (2009). Water quality standards and norms in the Republic of Kazakhstan. The regional environmental center for Central Asia (CAREC), Almaty, KZ. https://www.cawater-info.net/water_quality_in_ca/files/kazakhstan_en.pdf
11. Villaescusa, I., & Bollinger, J. C. (2008). Arsenic in drinking water: sources, occurrence and health effects (a review). *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(4), 307-323. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9138-7>
12. Khan, W. A., Ali, S., & Shah, S. A. (2022). Water pollution: sources and its impact on human health, control and managing. *J. Int. Coop. Dev*, 5(1), 69. <https://doi.org/10.36941/jicd-2022-0005>
13. Kristanti, R. A., Hadibarata, T., Syafrudin, M., Yılmaz, M., & Abdullah, S. (2022). Microbiological contaminants in drinking water: current status and challenges. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(8), 299. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05698-3>
14. Lou, J. C., Lee, W. L., & Han, J. Y. (2007). Influence of alkalinity, hardness and dissolved solids on drinking water taste: a case study of consumer satisfaction. *Journal of environmental management*, 82(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.11.017>
15. Li, P., & Wu, J. (2019). Drinking water quality and public health. *Exposure and Health*, 11(2), 73-79. <https://doi.org/10.1007/s12403-019-00299-8>
16. Madhav, S., Ahamad, A., Singh, A. K., Kushawaha, J., Chauhan, J. S., Sharma, S., & Singh, P. (2019). Water pollutants: sources and impact on the environment and human health. *Sensors in water pollutants monitoring: role of material*, 43-62. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0671-0_4
17. Moskvichev E. V., Moskvichev A. V., & Shevtsov I. M. (2013). Water chemistry and microbiology: guidelines for laboratory work (laboratory practical training) (Himiya vody i mikrobiologiya: metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam (laboratornomu praktikumu) in Russian). Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. <https://vgasu.ru/attachments/oi-moskvicheva-01.pdf>
18. Manna, A., & Biswas, D. (2023). Assessment of drinking water quality using water quality index: a review. *Water conservation science and engineering*, 8(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s41101-023-00185-0>
19. Osipenko, V. O., Balakina, M. N., Kucheruk, D. D., & Goncharuk, V. V. (2014). Water purification of nitrates with their deep concentration by the method of electro dialysis. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 36(2), 75-79. <https://doi.org/10.3103/S1063455X14020052>
20. Regulation. On approval of the hygienic standards for safety indicators of domestic, drinking, and cultural and household water use (Ob utverzhenii gigienicheskikh normativov pokazatelej bezopasnosti hozyajstvenno-pit'evogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya in Russian) <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200030713>
21. Richiardi, L., Pignata, C., Fea, E., Bonetta, S., & Carraro, E. (2023). Are indicator microorganisms predictive of pathogens in water? *Water*, 15(16), 2964. <https://doi.org/10.3390/w15162964>
22. Rocha, F. C., Andrade, E. M., & Lopes, F. B. (2015). Water quality index calculated from biological, physical and chemical attributes. *Environmental monitoring and assessment*, 187(1), 4163. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4163-1>
23. Wei, H., Qiu, H., Liu, J., Li, W., Zhao, C., & Xu, H. (2025). Evaluation and source identification of water pollution. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 289, 117499. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117499>
24. Sultangazieva, G. (2024). Study on the level of chemical pollution of water resources in Almaty (Issledovanie urovnya zagryazneniya himicheskimi veshchestvami vodnyh resursov goroda Almaty in Russian). *Bulletin of the NAS RK. Series of Chemistry and Technology*, 1, 54-69. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1491.207>

25. Toguzbaeva, K. K., Myrzakhmetova, Sh. K., Niyazbekova, L. Zh. Orakbay, L. S., Zhunistayev, D. D., Seiduanova, L. B., Saylybekova, A. K., Smagulov, A. B., Sumenova, K. A., & Sabirova, G. R. (2014). Hygienic assessment of the impact of the quality of household and drinking water supply on the health of the rural population of the Almaty region (Gigienicheskaya ocenka vliyaniya kachestva hozyajstvenno-pit'evogo vodosnabzheniya na zdorov'e sel'skogo naseleniya Almatinskoy oblasti in Russian). *Bulletin of the Kazakh National Medical University*, 3-3, 33-38.
26. Veríssimo, M. I., Oliveira, J. A., & Gomes, M. T. S. (2007). Determination of the total hardness in tap water using acoustic wave sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 127(1), 102-106. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.07.006>
27. Wen, X., Chen, F., Lin, Y., Zhu, H., Yuan, F., Kuang, D., Jia, Z., & Yuan, Z. (2020). Microbial indicators and their use for monitoring drinking water quality-A review. *Sustainability*, 12(6), 2249. <https://doi.org/10.3390/su12062249>
28. Wollin, K. M., & Dieter, H. H. (2005). Toxicological guidelines for monocyclic nitro-, amino- and aminonitroaromatics, nitramines, and nitrate esters in drinking water. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 49(1), 18-26. <https://doi.org/10.1007/s00244-004-0112-2>
29. Yuan, T., & Pian, Y. (2023). Hospital wastewater as hotspots for pathogenic microorganisms spread into aquatic environment: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1091734. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1091734>
30. Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F., Victor, H., & Guerrero, H. (2021). Heavy metal water pollution: a fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 01504. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>

Алматы қаласының Алмалы ауданындағы тұрмыстық және ауыз судың сапасы мен қауіпсіздігін кешенді бағалау

Гульнар Бугубаева, Сандуғаш Әбілқасова, Мария Сүлейменова, Жанат Шаихова, Жамила Әлімқұлова

Аңдатпа. Бұл зерттеу Алматы қаласының Алмалы ауданының үй шаруашылықтарындағы және орталықтандырылған сумен жабдықтау жүйесіндегі ауыз су сапасын кешенді бағалаудың нәтижелерін ұсынады. Негізгі мақсат органолептикалық, физика-химиялық, токсикологиялық және микробиологиялық параметрлерді бірыңғай аналитикалық шеңберде біріктіру арқылы ауыз судың қауіпсіздігі мен сапасын кешенді көппараметрлі бағалауды жүргізу болды. Органолептикалық сипаттамалары қолданыстағы санитарлық стандарттарға сәйкес анықталды. Жалпы минералдануы, қаттылығы, хлорид, нитрат және нитрит мөлшері, сілтілігі, рН және перманганаттың тотығу қабілеті сияқты физикалық-химиялық параметрлер гравиметриялық, титриметриялық және комплексометриялық әдістерді қолдану арқылы талданды. Токсикологиялық параметрлер қышқыл минералданғаннан кейін атомдық абсорбциялық спекторметрия арқылы анықталды. Микробиологиялық қауіпсіздік жалпы тіршілік ету санын және индикаторлық организмдердің (*Escherichia coli*, жалпы колиформ бактериялары және *Pseudomonas aeruginosa*) болуын анықтау арқылы бағаланды. Нәтижелер көптеген параметрлер белгіленген санитарлық-гигиеналық стандарттарға сәйкес келетінін көрсетті. Хлоридтердің (29,35–35,75 мг/л), нитраттардың (5,0–5,7 мг/л) және нитриттердің (2,7–3,0 мг/л) концентрациясы рұқсат етілген ең жоғары деңгейден айтарлықтай төмен болды. Ауыр металдардың концентрациясы белгіленген стандарттар шегінде болды. Судың тотығу қабілеті 3,2-ден 5,2 мг О₂ /л-ге дейін болды, бұл тотығатын органикалық заттардың төмен

құрамын көрсетеді. Хромның жоғары концентрациясы (0,8 мг/л) анықталды, бұл рұқсат етілген мәндерден сәл асып түсті және мерзімді бақылауды қажет етеді.

Жалпы алғанда, кешенді бағалау Алмалы ауданындағы ауыз судың қанағаттанарлық физика-химиялық және микробиологиялық сапасымен сипатталатынын және қосымша өндеусіз тұрмыстық және ауыз суға жарамды екенін растайды.

Түйін сөздер: тұрмыстық-ауыз су; судың сапасы; санитарлық-гигиеналық көрсеткіштер; тотығуы; судың кермектілігі; ауыр металдар; микробиологиялық қауіпсіздік.

Комплексная оценка качества и безопасности хозяйственно-питьевой воды Алмалинского района г. Алматы

Гульнар Бугубаева, Сандугаш Абилкасова, Мария Сулейменова, Жанат Шаихова, Жамила Алимкулова

Аннотация. В данном исследовании представлена комплексная оценка качества питьевой воды в домохозяйствах и в централизованной системе водоснабжения Алмалинского района Алматы. Основная цель заключалась в проведении интегрированной многопараметрической оценки безопасности и качества питьевой воды путем объединения органолептических, физико-химических, токсикологических и микробиологических показателей в рамках единой аналитической структуры. Органолептические характеристики определялись в соответствии с действующими санитарными нормами. Физико-химические параметры, включая общую минерализацию, жесткость, содержание хлоридов, нитратов и нитритов, щелочность, рН и перманганатную окислительную способность, анализировались гравиметрическим, титриметрическим и комплексометрическим методами. Токсикологические показатели определялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии после кислотной минерализации. Микробиологическая безопасность оценивалась путем определения общего количества жизнеспособных микроорганизмов и наличия индикаторных организмов (*Escherichia coli*, общие колиформные бактерии и *Pseudomonas aeruginosa*). Результаты показали соответствие большинства параметров установленным санитарно-гигиеническим нормам. Концентрации хлоридов (29,35–35,75 мг/л), нитратов (5,0–5,7 мг/л) и нитритов (2,7–3,0 мг/л) были значительно ниже максимально допустимых уровней. Концентрации тяжелых металлов находились в пределах установленных норм. Окисляемость воды составляла от 3,2 до 5,2 мг O₂/л, что указывает на низкое содержание окисляемых органических веществ. Была выявлена повышенная концентрация хрома (0,8 мг/л), незначительно превышающая допустимые значения и требующая периодического мониторинга. В целом, комплексная оценка подтверждает, что питьевая вода в Алмалинском районе характеризуется удовлетворительным физико-химическим и микробиологическим качеством и пригодна для бытового и питьевого использования без дополнительной обработки.

Ключевые слова: хозяйственно-питьевая вода; качество воды; санитарно-гигиенические показатели; окисляемость; жесткость; тяжелые металлы; микробиологическая безопасность.

О вариабельности показателей системы гемокоагуляции при раздельном и комбинированном действии токсических веществ

Кульзипа Дакиева¹, Гульфат Калелова^{1*}, Санат Кумарбекулы², Серик Бакин¹, Светлана Гармашова¹, Валерий Седелев¹, Роза Бейсембаева¹, Анатолий Цыганов¹

¹Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан; ecology-2014@mail.ru, gkalelova@bk.ru, bakinserik@mail.ru, tootex@rambler.ru, valeriysedelelev@mail.ru, roza.beysembaeva@mail.ru, tsap_ecobio@list.ru

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан; sanat_kv@mail.ru

*Корреспонденция: gkalelova@bk.ru

Аннотация. Восточно-Казахстанский медно-химический комбинат расположен в Восточно-Казахстанской области посёлке Усть-Таловка, структурными единицами комбината являются три карьера (Шемонаихинский, Николаевский, Камышинский) и Николаевская обогатительная фабрика. При открытом способе добычи полезных ископаемых все основные процессы сопровождаются выделением пыли. При бурении выделение пыли происходит за счёт разрушения породы или руды и поступления в воздух буровой мелочи, выделяемой из скважин. С точки зрения опасности и токсичности полиметаллической пыли, витающей в воздушной среде карьеров и кабин горнотранспортных машин, особый интерес и внимание представляет химический состав пыли. Работами А.А. Мамырбаева показано наличие пыли большого количества потенциально опасных микроэлементов – нитрат свинца, селенат натрия, окись мышьяка, окись сурьмы. Характер общетоксического действия этих токсических веществ детально изучен и обобщён в многочисленных трудах, в то же время особенности специфического действия этих веществ на деятельность коагуляционной системы крови остаются неизученными.

Целью исследования явилось изучение влияния токсических веществ (нитрата свинца, селената натрия, окиси сурьмы и окиси мышьяка) в модельных экспериментах на животных.

Исследования системы гемокоагуляции проводились в условиях эксперимента на белых половозрелых крысах-самцах линии Wister массой 150–160 граммов.

Для оценки функционального состояния системы гемокоагуляции крови крыс проводилось определение следующих тестов коагулограммы: концентрация фибриногена, протромбиновый индекс, время рекальцификации, каолиновое время, толерантность плазмы к гепарину, этаноловый тест, характеризующий первую, вторую и третью фазы процесса коагуляции крови.

Ценность исследования заключается в том, что изучение неблагоприятного влияния производственных факторов, а именно токсических веществ на различные компоненты коагуляционной

Цитирование: Дакиева, К., Калелова, Г., Камарбекулы, С., Бакин, С., Гармашова, С., Седелев, В., Бейсембаева, Р., Цыганов, А. (2026). О вариабельности показателей системы гемокоагуляции при раздельном и комбинированном действии токсических веществ. *Journal of Ecology and Sustainability*, 154(1), 55-76. https://doi.org/10.32523/hhx5y_d59

Академический редактор:
А. Зандыбай

Поступила: 18.01.2026
Исправлена: 09.03.2026
Принята: 27.03.2026
Опубликована: 31.03.2026



Copyright: © 2026 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/>)

системы крови ранее не проводилось, исследовалось как раздельное, так и комбинированное воздействие.

Ключевые слова: экспериментальные животные; показатели системы гемокоагуляции; комплекс токсических веществ.

1. Введение

В нормально функционирующем организме жидкое состояние крови в значительной степени объясняется взаимной резистентностью сосудистой стенки, тромбоцитов и коагулирующих белков плазмы крови, представленных предшественниками сериновых протеолитических ферментов или неактивными комплексами ферментов с ингибиторами. Эта взаимная резистентность трёх компонентов обеспечивается многообразными регуляторными механизмами, которые препятствуют постоянно действующим экзогенным и эндогенным факторам, способным её нарушить. Одним из экзогенных факторов, влияющих на гемокоагуляционную систему крови, являются химические вещества.

В имеющейся литературе есть несколько работ, касающихся влияния химических веществ на систему гемостаза лабораторных животных. Так, например, М.С. Мартиросов (Martirosov, 2018) изучал влияние азотнокислого серебра в дозах, вызывающих отёк лёгких, на газообмен и коагуляцию крови в эксперименте. При изучении коагуляции крови в начальном периоде отёка лёгких отмечалось снижение времени рекальцификации плазмы, возрастала толерантность плазмы к гепарину и уменьшался свободный гепарин. Подобные изменения наблюдались и в период разгара отёка лёгких, что свидетельствовало о значительном повышении коагуляции крови. А в терминальном периоде отека легких, наоборот, отмечалось резкое уменьшение коагуляционной способности крови. Проведённые эксперименты позволили выявить при отёке лёгких, вызванном введением больших доз азотнокислого серебра, ряд особенностей в изменениях транспорта газов кровью, газообмена и коагуляции крови.

Также М.С. Мартиросовым установлено (Martirosov, 2018), что гальбановая кислота оказывает тормозящее действие на первую фазу коагуляции крови, что подтверждается удлинением времени рекальцификации оксалатной плазмы, тромбинового и тромбопластинового времени в эксперименте (Martirosov, 2018). Тромбоэластография считается для исследования коагуляционных свойств крови самым прогрессивным и надёжным современным методом. И не случайно он использовал тромбоэластографию для изучения коагуляционной способности крови при остром и подостром ингаляционном поражении азотнокислыми солями (амерция-241, плутония-239) в эксперименте. Автором выявлены разнообразные изменения тромбоэластографии, указывающие как на тенденцию к гиперкоагуляции, обусловленной развитием воспалительного процесса в лёгких вследствие поражения, так и на наличие гипокоагуляции, связанной с радиационным воздействием на кроветворную систему и печень. При этом направленность в сторону гиперкоагуляции больше выражена у собак, вдыхающих плутоний, а тенденция к гиперкоагуляции – у животных, затравленных амерцием.

Тромбоэластографические исследования коагуляции крови при хронической затравке животных альфаметилстиролом были изучены В.А. Нетеса (Netesa, 2018). Выявлено, что в ранние сроки затравки независимо от концентрации происходит резкое повышение коагуляции крови. Эти изменения происходили в основном в первую и вторую фазы, то есть период образования тромбокиназы и тромбина. Время образования фибрина (собственное время коагуляции) также значительно уменьшено, что способствует началу третьей фазы. Степень выраженности этих изменений зависит от дозы препарата (Agabaljan et al., 2016).

Как известно, регуляция жидкого состояния крови и её коагуляция осуществляется в организме при непосредственном участии двух взаимосвязанных систем – коагуляции и антикоагуляции (Kudrjashov, 2017). При возбуждении антикоагуляционной системы крови в кровотоке выделяется гепарин.

Важнейшим механизмом антикоагуляционной системы крови, предупреждающей внутрисосудистое тромбообразование, является способность гепарина вступить в комплексные соединения с белками крови. Этот механизм антикоагуляционной системы крови был подтверждён в исследованиях, проводимых рядом авторов (Shelkova et al., 2016). На крысах-самцах было показано, что кремнийорганические соединения способствуют повышению уровня гепарина в крови, образованию с рядом белков, комплексных соединений, характерных для возбуждения антикоагуляционной (противотромбической) системы организма и выявлению неферментативного фибринолиза, по-видимому, имеющего ведущее значение в естественной профилактике внутрисосудистой коагуляции,

С.Е. Мочкина и В.Л. Богун изучили функциональное состояние системы коагуляции крови в эксперименте на крысах и морских свинках после подострой семидневной затравки, их парами альфаметилстирола при концентрации 3–5 мг/л и трехчасовой экспозиции, у морских свинок и у крыс общий характер реакции коагуляции системы крови в сторону гиперкоагуляции: увеличивается потребление протромбина и снижается содержание свободного гепарина (Mochkina et al., 2019). Фибринолитическая активность у морских свинок после затравки повышается, у крыс – наоборот понижается. Протромбиновый индекс снижается у крыс и почти не меняется у морских свинок. У этих групп животных имеются некоторые различия. Эти различия, очевидно, являются следствием биологических особенностей экспериментальных животных. Но и у тех, и у других подострая интоксикация альфаметилстиролом ведет к нарушению различных звеньев системы гемостаза.

Р.Т. Мазаевым была избрана тромбоэластография в качестве метода исследования. В процессе эксперимента у контрольных белых крыс выявлены изменения временных показателем тромбоэластограммы относительно показателей фона. Чередование направленности этих изменений позволяет расценивать их как проявление гипер-гипокоагуляционного синдрома (Mazaev et al., 2017). В эксперименте, при остром отравлении анилином, нитробензолом, нитрохлорбензолом удлинялось время коагуляции крови и увеличивалось содержание фибриногена по сравнению с контролем, а при отравлении тринитротолуолом, наряду с этими изменениями, снижалась активность VII фактора (Brin et al., 2020; Kong et al., 2024; Kilanowicz et al., 2019).

Таким образом, литературные источники убеждают в том, что при действии химических факторов происходят изменения в системе гемостаза. При этом глубина возникающих сдвигов, характер изменений в коагуляционной системе зависят от вида промышленного яда, особенностей резистентности и реактивности организма. Нами впервые проведены экспериментальные исследования отдельного и комбинированного действия масляных суспензий токсических веществ, таких как селенат натрия, окиси сурьмы, окиси мышьяка, нитрата свинца на коагуляционную систему крови. Такие работы ранее не проводились.

2. Материалы и методы

Проведены исследования коагулограммы в условиях эксперимента на белых половозрелых крысах-самцах линии Wister массой 150–160 граммов. Всего в опыт было взято 36 животных, которые были разделены на две группы (контрольная 1 группа 6 животных, опытных 5 групп по 6 животных, и помещены в специально изготовленные клетки). Экспериментальных животных контрольной серии опыта содержали в отдельной, хорошо проветриваемой комнате с естественным и искусственным освещением. Контрольная и опытные животные содержались на обычном лабораторном рационе. На брюшковую часть тела животного площадью 2x2 см наносили масляную суспензию исследуемого вещества,

которое через час смывали и так в течение месяца. Ежедневно наносимые дозы химических веществ были следующие: селенат натрия – 0,001 мг, окись сурьмы – 0,048 мг, окись мышьяка – 0,052 мг, нитрат свинца – 0,032 мг (Trahtenberg et al., 2017; Ershov et al., 2019). Это общепринятые токсикологические дозы, они не смертельные, но вызывают интоксикацию. Животных контрольной и экспериментальных групп в одни и те же сроки, то есть по истечении месячного срока путём декапитации проводили исследования согласно «Международной рекомендации по проведению медико-биологических исследований с использованием лабораторных животных (Zhang et al., 2024).

Для оценки функционального состояния коагуляционной системы крови крыс проводилось определение следующих тестов коагулограммы: концентрация фибриногена по методу Рутберга и протромбиновый индекс по Квику (Kozlovskaja et al., 1984), рекальцификация плазмы по Бегерхофу и толерантность плазмы к гепарину по методу Коллера (Kost, 1975), каолиновое время по Баркагану и Балуды, и этаноловый тест по Меньшикову (Menshikov, 1984).

Использованные тесты дают возможность судить о состоянии системы гемокоагуляции крови в различные фазы. Поскольку подробное описание всех использованных показателей коагулограммы нашло отражение в многочисленных инструкциях и руководствах (Kozlovskaja et al., 1984; Kost, 1975; Menshikov, 1984) в нашей работе методика их проведения не описывается.

Оборудование: автоматический коагулометр «Huma Clot Pro», центрифуга «Huma NCT», бинокулярный микроскоп «Huma Scope Premium», тромбоэластограф «ROTEM DELTA». Набор реагентов для определения протромбинового времени «Hemostat Thromboplastin – набор реагентов для определения фибриногена плазмы «Hemostat Fibrinogen», набор для определения тромбинового времени «Hemostat Thrombin Time».

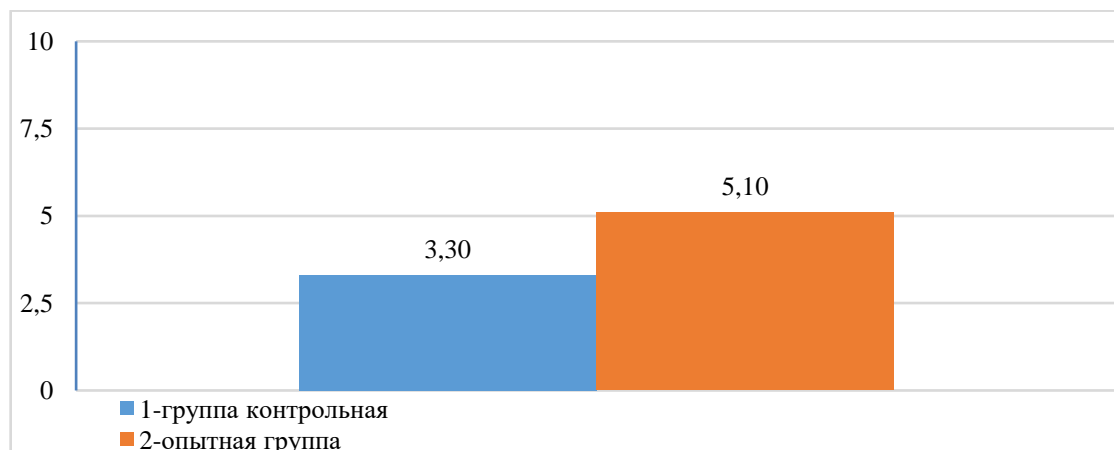
Полученные данные обработаны методами математической статистики по Гурману В.Е. (Zhang et al., 2024) с вычислением относительных и среднеарифметических величин (M), их ошибок (m), среднеквадратичных отклонений (g), критериев достоверности показателей (t) и их разницы (p) с определением межсистемных и внутрисистемных связей между изучаемыми показателями.

3. Результаты

В условиях эксперимента масляную суспензию селената натрия наносили на кожу ежедневно в дозе 0,001 мг. Результаты исследований показали, что в процессе отравления масляной суспензией селената натрия происходят изменения в системе гемокоагуляции. Были обнаружены достоверные изменения в ряде показателей коагулограммы. Выявлено повышение концентрации фибриногена (таблица 1) по сравнению со среднестатистическим значением контрольной группы (рисунок 1), разница между ними достоверна.

Таблица 1. Изменения показателей гемокоагуляционной системы крови у лабораторных животных при отравлении масляной суспензии селенатом натрия ($M \pm m$)

	Показатели	Контроль	После затравки
1	Фибриноген, г/л	3,3±0,4 n=6	5,1±0,2 P<0,001 n=6
2	Протромбиновый индекс, %	107,5±4,8 n=6	79,7±4,2 P<0,001 n=6
3	Время рекальцификации, сек.	91,3±4,2 n=6	54,5±3,2 P<0,001 n=6
4	Каолиновое время, сек.	72,1±4,3 n=6	40,5±3,5 P<0,001 n=6
5	Толерантность плазмы к гепарину, мин.	7,9±1,1 n=6	4,5±0,5 P<0,01
6	Этаноловый тест	№5 (83,3) сг-1 (16,7%) n=6	№4 (57,1%) сг-3 (42,9%) n=6

**Рисунок 1.** Концентрация фибриногена г/л, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензии селената натрия: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

Наблюдается понижение в крови протромбинового индекса в сравнении с контрольной группой: на 25,9%, значит, отмечается снижение активности факторов VII и X (рисунок 2). Время рекальцификации цитратной плазмы у опытных животных укорачивается по сравнению с контрольными животными на 40,3% (рисунок 3). Происходит достоверное укорочение каолинового времени (рисунок 4). Наблюдается укорочение времени коагуляции при введении гепарина, т.е. толерантность плазмы к гепарину повышается и составляло 59,6% (рисунок 5). Этаноловый тест, как видно из таблицы, остаётся без изменений. Положительным считается результат, когда в осадок выпадает гель, а отрицательным – когда не выпадает. Отрицательный результат у 4 опытных животных из 6 обследованных, что составило 57,1% и положительный у 3 (42,9%), у контрольных животных отрицательный результат у 5 (88,3%), положительный у 1 (16,7%).

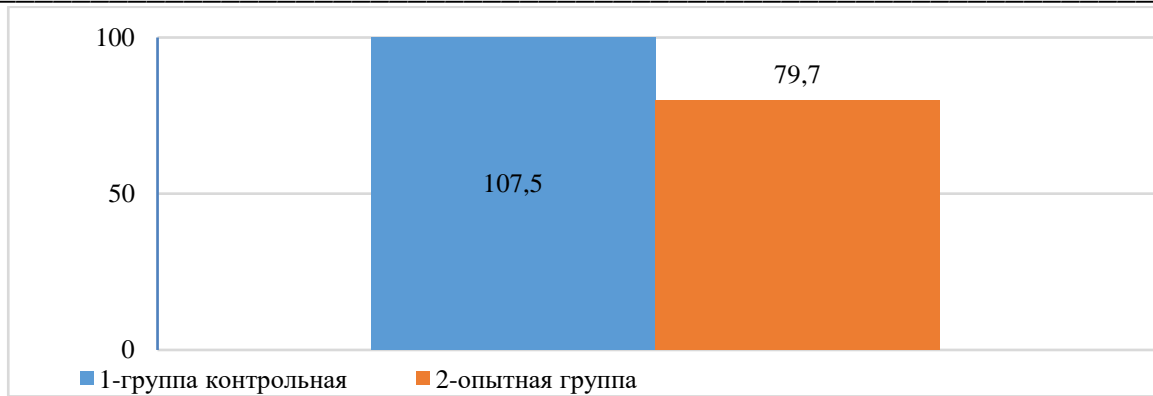


Рисунок 2. Протромбиновый индекс %, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией селената натрия: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

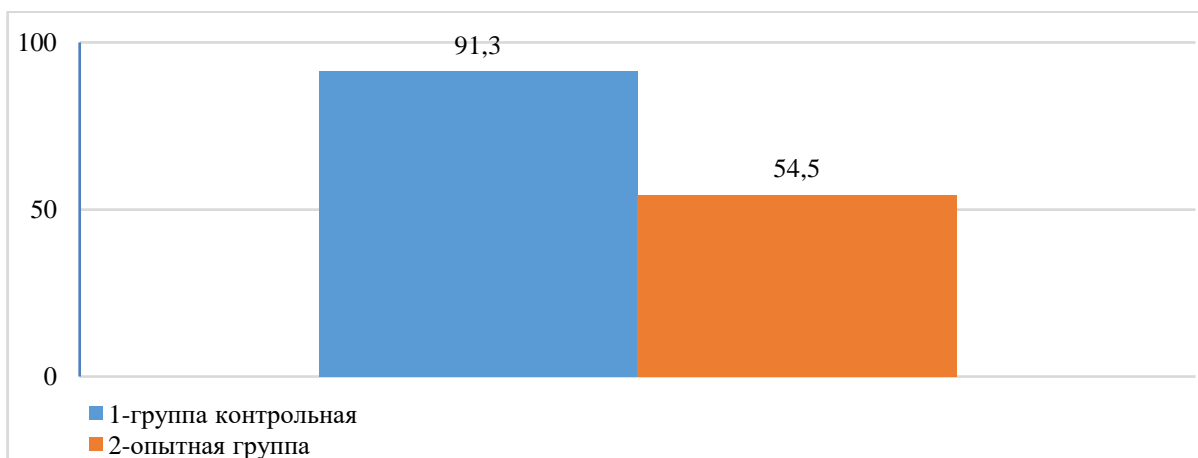


Рисунок 3. Время рекальцификации в секундах, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией селената натрия: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

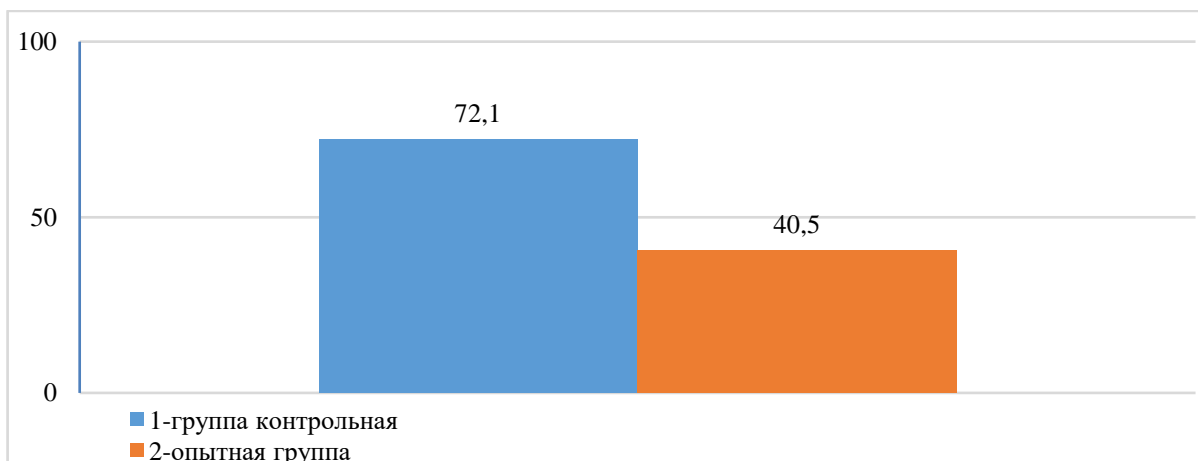


Рисунок 4. Каолиновое время в секундах, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией селената натрия: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

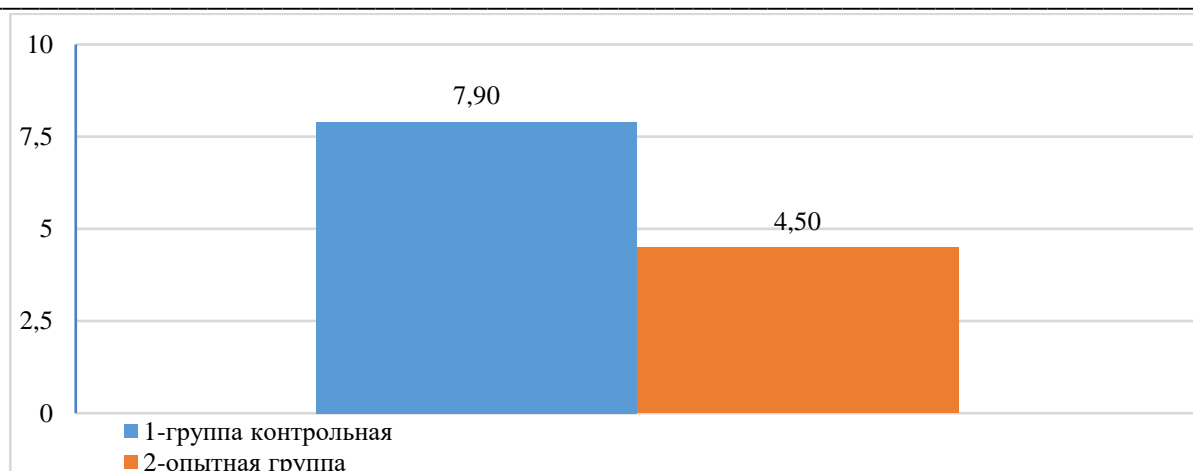


Рисунок 5. Толерантность плазмы к гепарину у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией селената натрия: 1 – контрольная группа, 2 – опытная группа (по оси ординат – время, мин)

Таким образом, масляная суспензия селената натрия обладает свойством повышать коагуляционную способность крови, т.к. достоверное укорочение времени рекальцификации, понижение концентрации фибриногена, укорочение каолинового времени, повышение толерантности плазмы к гепарину – это повышенная готовность крови к коагуляции, причём нарушения обнаружены во всех трёх фазах процесса коагуляции крови.

При длительном кожно-резорбтивном действии масляной суспензии окиси сурьмы исследовали состояние гемокоагуляции у животных. Семь опытных белых крыс подвергались действию масляной суспензии окиси сурьмы, шесть контрольных белых крыс не подвергались действию токсического вещества. Как видно из таблицы 2 наблюдается укорочение времени рекальцификации плазмы у опытных животных по сравнению с контрольными (рисунок 6.) Разница между ними достоверна. При действии окиси сурьмы отмечено укорочение каолинового времени на 40% по сравнению с контрольной группой (рисунок 7). Концентрация фибриногена, протромбиновый индекс, время рекальцификации нитратной плазмы, толерантность плазмы к гепарину, этаноловый тест в обследуемой группе не изменились по сравнению с контрольной группой.

Таким образом, при действии масляной суспензии окиси сурьмы на организм животных выявлены изменения в первой фазе процесса коагуляции крови и во внутреннем механизме.

Таблица 2. Изменение показаний гемокоагуляционной системы крови у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией окиси сурьмы ($M \pm m$)

	Показатели	Контроль	После затравки
1	Фибриноген, г/л	$2,6 \pm 0,3$ n=6	$2,6 \pm 0,7$ P>0,05 n=6
2	Протромбиновый индекс, %	$84,5 \pm 5,0$ n=6	$74,8 \pm 4,1$ P>0,05 n=6
3	Время рекальцификации, сек.	$95,5 \pm 8,8$ n=6	$57,6 \pm 7,1$ P<0,001 n=6
4	Каолиновое время, сек.	$68,3 \pm 4,3$	$37,3 \pm 3,8$

		n=6	P<0,001 n=6
5	Толерантность плазмы к гепарину, мин.	9,9±0,8 n=6	5,8±2,4 P>0,05 n=6
6	Этаноловый тест	№4 (66,7%) сг-2 (33,3%) n=6	№5 (83,3%) сг-1 (16,6%) n=6

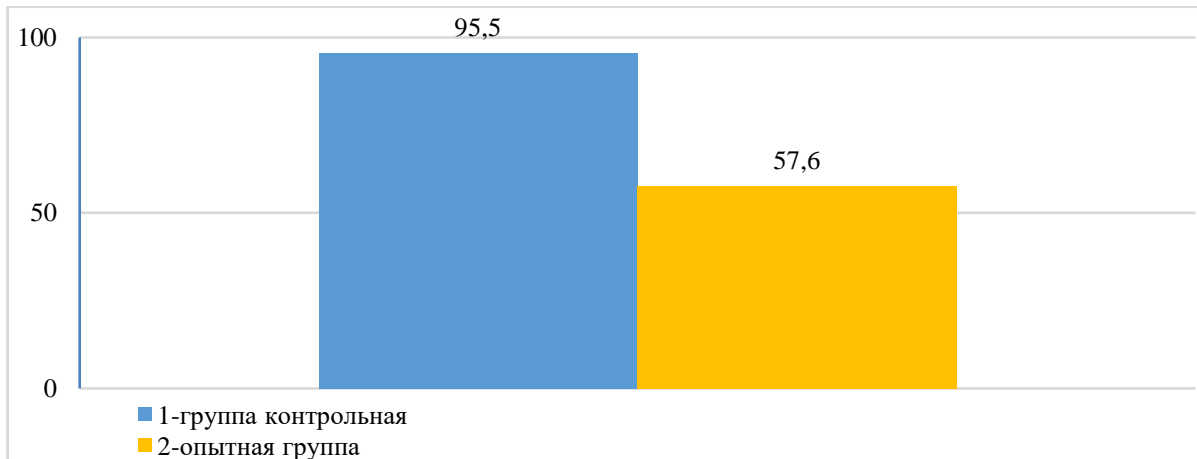


Рисунок 6. Время рекальцификации в секундах, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензии окиси сурьмы: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

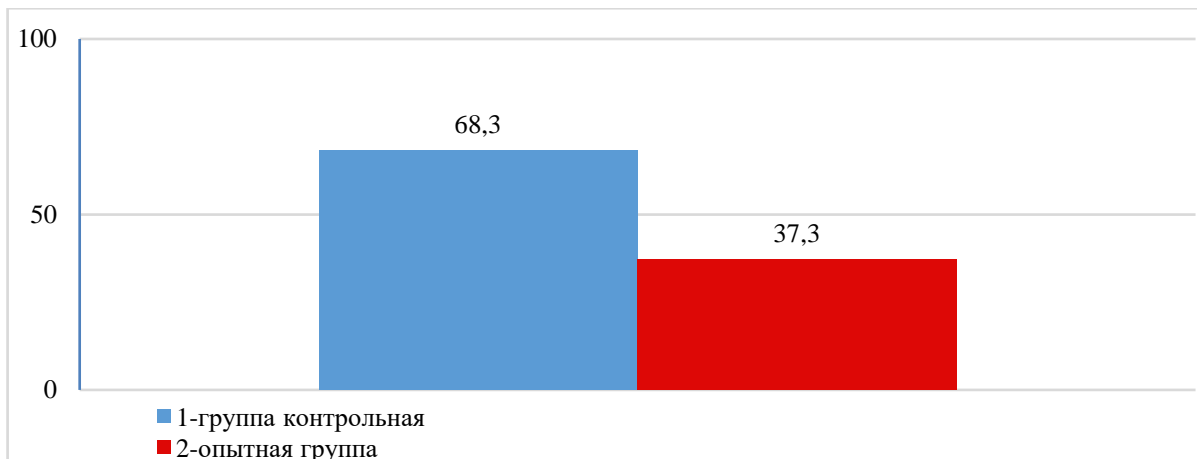


Рисунок 7. Каолиновое время в секундах, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензии окиси сурьмы: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

Состояние печени и периферической крови изучалось (Oliievska et al., 2018). У обследованных больных, имевших профессиональный контакт с сурьмой, наблюдаются изменения со стороны нервной системы функционального и органического характера. Умеренные гематологические сдвиги у обследованных больных отмечаются, как со стороны красной, так и со стороны белой крови. Выявлено уменьшение количества альбуминов и повышение альфа-1-глобулинов, формирующихся в клетках печени, снижение общего белка сыворотки крови и изменение осадочных и коагуляционных особенностей белков сыворотки крови.

О накоплении сурьмы в крови при различном пути поступления в организм изучено (Trahtenberg et al., 2017). Результаты исследования показали, что независимо от пути поступления сурьмы в организм животных она накапливается в большом количестве в крови уже к 3 дню после введения.

При длительном ингаляционном поступлении окиси сурьмы в организм животных наблюдаются сдвиги в лейкоцитарном составе периферической крови (Witeska et al., 2023). Происходят изменения количественных гематологических показателей: гемоглобина, эритроцитов, лейкоцитов, количественного состава белой крови, холинэстеразы, лактатдегидрогеназы, аланин и аспартатаминотрансферазы, минерального, белкового и липидного обменов.

При затравке животных масляной суспензии окиси мышьяка с концентрацией 0,052 мг выявлены сдвиги в системе гемокоагуляции. Большой процент всасывания через кожу обеспечивается кожно-резорбтивным методом. Как видно из таблицы 3, обнаружено повышение концентрации фибриногена у опытных животных (рисунок 8) при сопоставлении с контрольной группой и составило 66,7%. Отмечается укорочение каолинового времени (рисунок 9). Такие коагулотесты, как содержание протромбинового индекса, время рекальцификации, этаноловый тест у опытных животных при сопоставлении с контрольной группой не даёт достоверных различий, а толерантность плазмы к гепарину достоверно снижается (рисунок 10).

Таблица 3. Изменения показателей коагуляционной системы крови у лабораторных животных при отравлении масляной суспензии окиси мышьяка ($M \pm m$)

	Показатели	Контроль	После затравки
1	Фибриноген, г/л	3,0±0,6 n=6	5,0±0,3 P<0,01 n=6
2	Протромбиновый индекс, %	89,7±3,1 n=6	85,3±2,0 P>0,05 n=6
3	Время рекальцификации, сек.	85,0±11,3 n=6	82,8±17,2 P>0,05 n=6
4	Каолиновое время, сек.	71,0±5,6 n=6	41,3±8,8 P<0,01 n=6
5	Толерантность плазмы к гепарину, мин.	10,2±1,3 n=6	9,6±1,2 P<0,05 n = 6
6	Этаноловый тест	№5 (83,3%) сг-1 (16,7%) n=6	№5 (83,3%) сг-1 (16,7%) n=6

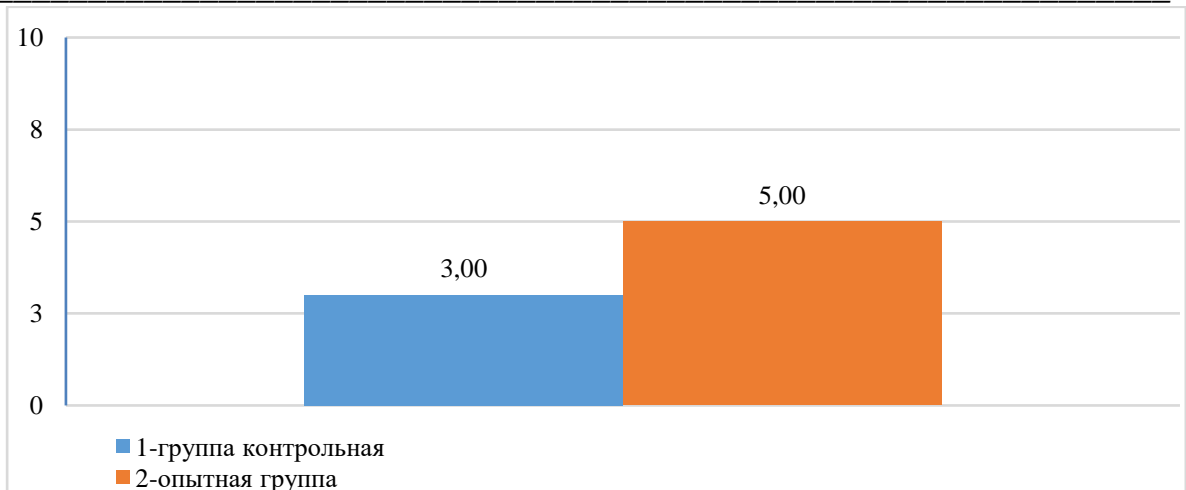


Рисунок 8. Концентрация фибриногена, г/л, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией окиси мышьяка: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

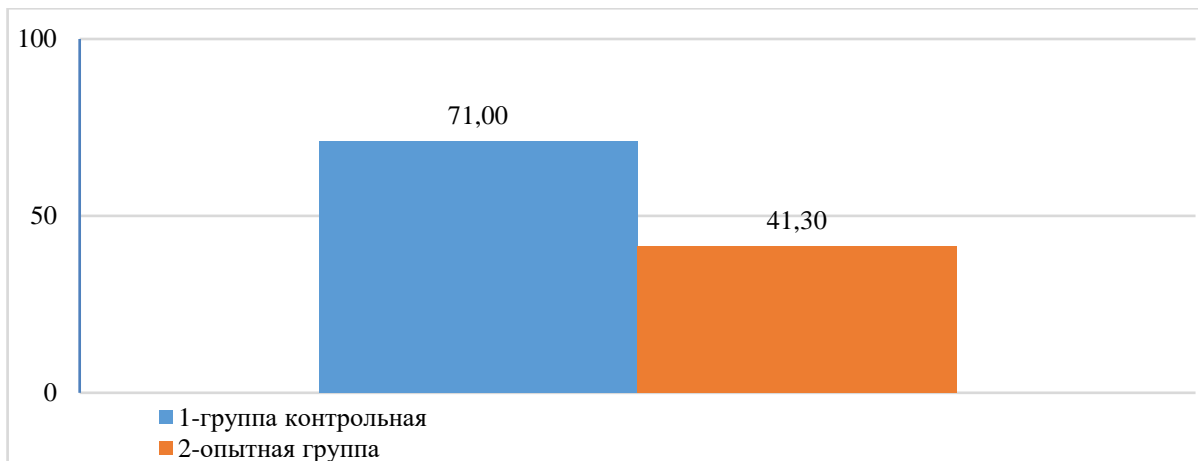


Рисунок 9. Каолиновое время, в секундах, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией окиси мышьяка: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

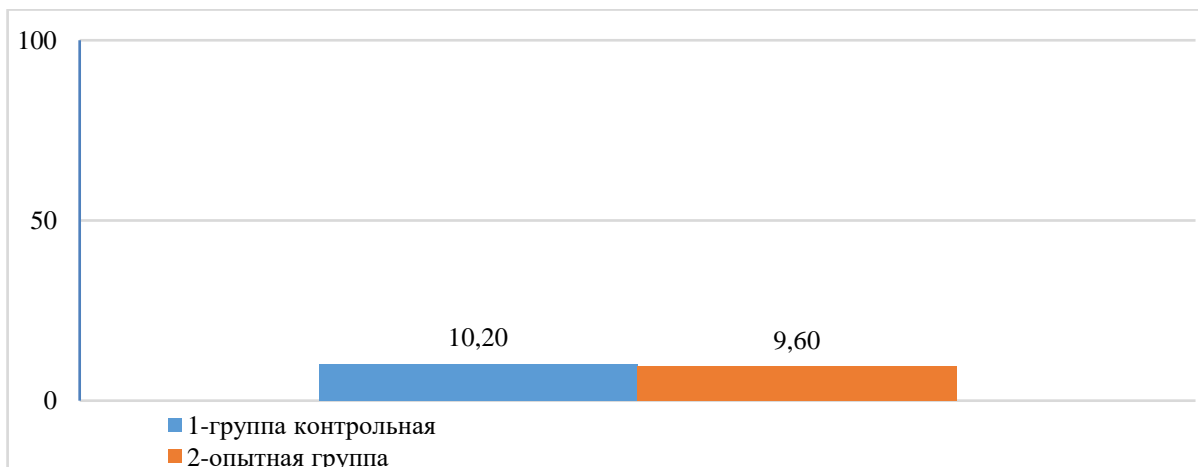


Рисунок 10. Толерантность плазмы к гепарину, мин, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией окиси мышьяка: 1-группа контрольная; 2-опытная группа

Таким образом, при действии масляной системы окиси мышьяка происходят изменения в системе гемокоагуляции. В результате сопоставления полученных данных установлены достоверные изменения в третьей фазе коагуляции, повышение концентрации фибриногена, а также сдвиги во внутреннем механизме коагуляции крови, достоверное укорочение каолинового времени. Возможно, за счёт активности факторов коагуляционной системы крови на повреждающее действие масляной суспензии окиси мышьяка.

По данным (Ershov et al., 2009) экспериментально исследовалась проницаемость кожи для мышьяка, мышьяк-содержащих минеральных вод. Результаты исследования показали, что проникновение в организм через кожу мышьяка из естественных и искусственных мышьяк-содержащих минеральных вод, прямо пропорционально общей минерализации мышьяка в минеральных водах. Мышьяк во внутренних органах и тканях организма при использовании метода радиоактивной индикации определяется не ранее 3-х часов после воздействия. При этом он неравномерно распределяется по органам и тканям. Замечено также, что в результате проведения соответствующего лечебного курса ванн проницаемость кожи для мышьяка увеличивается.

Ежедневно в течение месяца кожно-резорбтивным методом наносили 0,032 мг масляную суспензию нитрата свинца белым крысам, через час смывали. Результаты исследований показали, что в процессе отравления подопытных животных нитратом свинца происходит повышение концентрации фибриногена по сравнению с контрольными животными и составило 68,9% (рисунок 11). Наблюдается повышение в крови опытных животных протромбинового индекса (рисунок 12).

При сопоставлении средних величин с контрольной группой разница достоверна. Обнаружено укорочение времени рекальцификации плазмы у опытных животных и составило 67,3% (рисунок 13). Обнаружено статистически значимое повышение толерантности плазмы к гепарину (таблица 4).

Таким образом, большинство тестов коагулограммы изменяются при действии масляной суспензии нитрата свинца в эксперименте, отмечается повышенная коагуляционная активность крови. Изменились показатели, характеризующие первую фазу процесса коагуляции крови (время рекальцификации, толерантность плазмы к гепарину), вторую фазу (протромбиновый индекс), третью фазу (концентрация фибриногена).

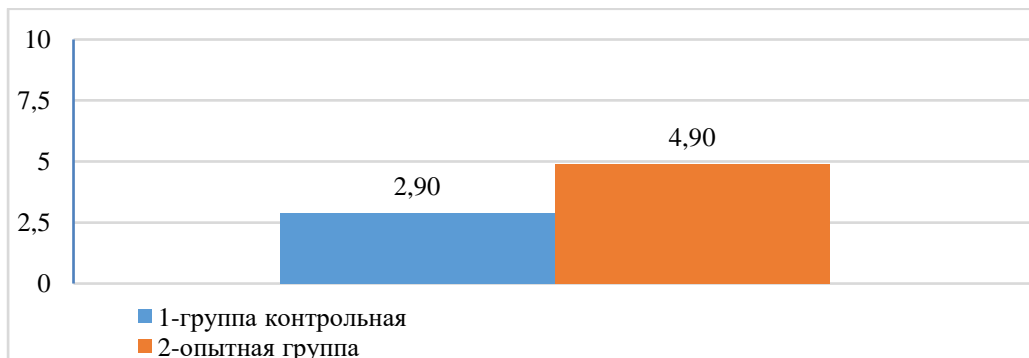


Рисунок 11. Концентрация фибриногена, г/л, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензии нитрата свинца: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

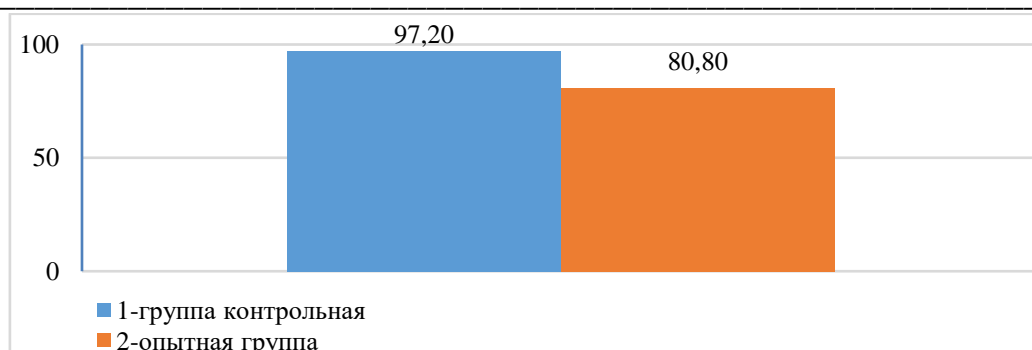


Рисунок 12. Протромбиновый индекс %, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией нитрата свинца: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

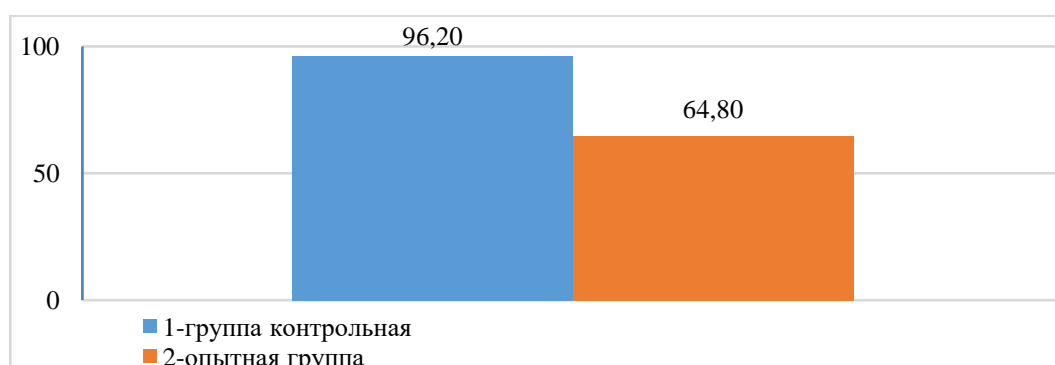


Рисунок 13. Время рекальцификации, в секундах, у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией нитрата свинца: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

Таблица 4. Изменение показателей коагуляционной системы крови у лабораторных животных при отравлении масляной суспензией нитрата свинца ($M \pm m$)

	Показатели	Контроль	После затравки
1	Фибриноген, г/л	$2,9 \pm 0,5$ n=6	$4,9 \pm 0,1$ P<0,001 n=6
2	Протромбиновый индекс, %	$97,2 \pm 4,0$ n=6	$80,8 \pm 4,2$ P<0,01 n=6
3	Время рекальцификации, сек.	$96,2 \pm 8,0$ n=6	$64,8 \pm 5,2$ P<0,001 n=6
4	Каолиновое время, сек.	$67,8 \pm 14,4$ n=6	$45,7 \pm 3,0$ P>0,05 n=6
5	Толерантность плазмы к гепарину, мин.	$8,2 \pm 0,3$ n=6	$4,9 \pm 1,5$ P>0,05 n=6
6	Этаноловый тест	№4 (66,7%) сг-2 (33,3%) n=6	№4 (66,7%) сг-2 (33,3%) n=6

Результаты наших исследований показывают, что у лабораторных животных при действии на организм масляной суспензии нитрата свинца происходит активация коагуляционной системы крови.

Проведены экспериментальные исследования состояния гемокоагуляции при комплексном действии токсических веществ (масляные суспензии селената натрия, окиси сурьмы, окиси мышьяка, нитрата свинца). Обнаружено, что при комплексном действии этих токсических веществ происходит повышение концентрации фибриногена (рисунок 14) при сравнении с контрольной группой и составило 35,7% (таблица 5). Наблюдается укорочение каолинового времени, изменения во внутреннем механизме коагуляции крови при сопоставлении с контрольной группой разница между ними статистически достоверна (рисунок 15).

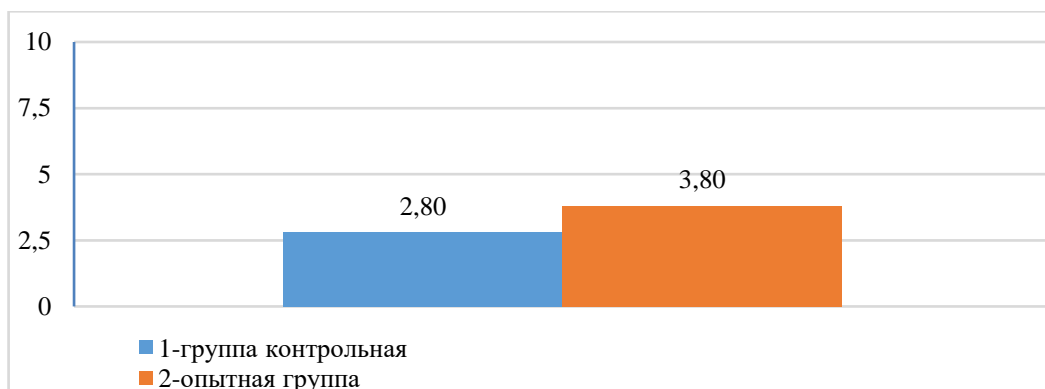


Рисунок 14. Концентрация фибриногена, г/л, у лабораторных животных при комбинированном действии токсических веществ: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

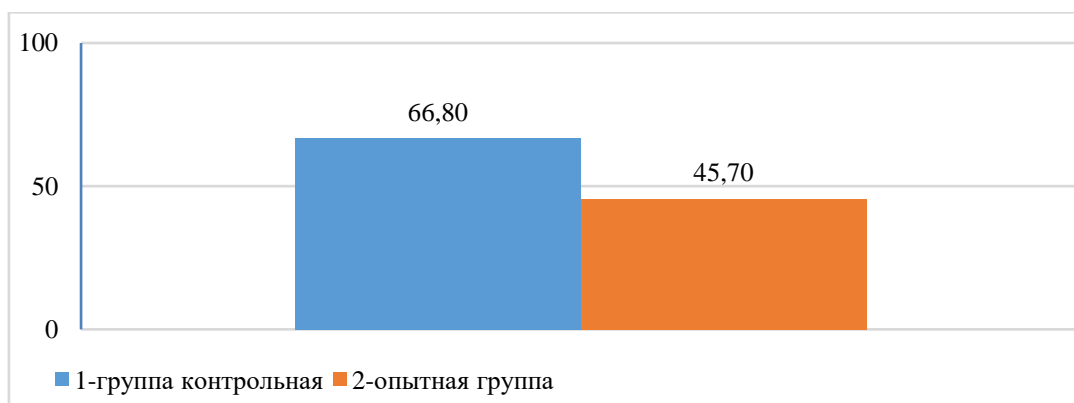


Рисунок 15. Каолиновое время, в секундах, у лабораторных животных при комбинированном действии токсических веществ: 1 – группа контрольная; 2 – опытная группа

У опытных животных содержание в крови протромбинового индекса, времени рекальцификации, толерантность плазмы к гепарину, этаноловый тест при сопоставлении с контрольной группой средние величины не дают статистических различий. Таким образом, при комбинированном действии масляных суспензий токсических веществ (селената натрия, окиси сурьмы, окиси мышьяка, нитрата свинца) выявлено нарушение функциональных взаимосвязей между системами гемокоагуляции и фибринолиза, которые могут привести к тяжёлым патологиям.

Таблица 5. Изменения показателей коагуляционной системы крови у лабораторных животных при комбинированном действии масляных суспензий токсических веществ (Pb, Se, As, Sb) ($M \pm m$)

	Показатели	Контроль	После заправки
1	Фибриноген, г/л	2,8±0,3 n=6	3,8±0,1 P<0,01 n=6
2	Протромбиновый индекс, %	95,0±2,9 n=6	90,2±2,1 P>0,05 n=6
3	Время рекальцификации, сек.	81,0±14,8 n=6	98,0±11,8 P>0,05 n=6
4	Каолиновое время, сек.	66,8±2,9 n=6	45,7±5,9 P<0,001 n=6
5	Толерантность плазмы к гепарину, мин.	9,1±2,0 n=6	9,2±1,0 P>0,05 n=6
6	Этаноловый тест	№5 (83,3%) сг-1(16,1%) n=6	№4 (66,7%) сг-2 (33,3%) n=6

При анализе доступной литературы мы не нашли работ по изучению действия комплекса токсических веществ (селената натрия, окиси сурьмы, нитрата свинца и окиси мышьяка) на систему гемокоагуляции.

Таким образом, данные исследования состояния коагуляции крови лабораторных животных при раздельном и комбинированном действии масляных суспензий токсических веществ на организм выявили изменения в коагуляционной системе крови. Наибольшее количество коагулотестов достоверно изменились при отравлении животных масляной суспензии селената натрия, нитрата свинца, характеризующие все фазы коагуляции. Токсическое действие этих металлов на различные органы и системы было обнаружено и ранее (Zhang et al., 2024; Kost, 1975; Menshikov, 1984).

Следует отметить, что при раздельном действии масляной суспензии окиси сурьмы, окиси мышьяка и комбинированное действие этих токсических веществ (нитрата свинца, окиси мышьяка, окиси сурьмы, селената натрия) на организм животных кожно-резорбтивным методом изменились лишь некоторые показатели, характеризующие отдельные фазы коагуляции. Полученные экспериментальные данные при изолированном и комбинированном действии токсических веществ (нитрата свинца, селената натрия, окиси сурьмы и окиси мышьяка) подтверждают предположение, что эти токсические вещества являются основным фактором, вызывающим изменения в системе гемокоагуляции. В эксперименте изменились такие показатели коагулограммы – время рекальцификации, толерантность плазмы к гепарину, каолиновое время, протромбиновый индекс, концентрация фибриногена, характеризующие все фазы коагуляции крови: фазу образования активной тромбопластина (первая фаза), тромбина (вторая фаза), фибрина (третья фаза).

4. Обсуждение

Исследование состояния системы гемокоагуляции крови лабораторных животных при раздельном и комбинированном действии токсических веществ выявило следующие изменения:

Большинство показателей коагулограммы достоверно изменились по сравнению с контрольной группой при действии масляной суспензии селената натрия: повышение концентрации фибриногена, укорочение времени рекальцификации, понижение в крови протромбинового индекса, укорочение каолинового времени, повышение толерантности плазмы к гепарину. Значит, при действии масляной суспензии селената натрия коагулирующая способность крови повышается.

По данным К.А. Хасановой, под влиянием селената натрия выявлены сдвиги, как в плазменных факторах коагуляции крови, так и в тромбоцитарных показателях (Hasanova et al., 2017). Экспериментально выявлено изменение теста генерации тромбопластина, что выразилось в запаздывании образования тромбопластина и в понижении его активности. Понижение активности 3 фактора тромбоцитов коррелировало с понижением протромбиновой активности. Под воздействием испытуемой дозы селената натрия происходило снижение общего количества тромбоцитов и понижение их функциональной активности.

Выявлены достоверные изменения большинства показателей коагулограммы при действии на лабораторных животных нитрата свинца. Мы применили кожно-резорбтивный метод отравления крыс, так как были установлены высокие токсические свойства металлов (селена, свинца, сурьмы, мышьяка) при поступлении через кожу (Mamurbaev et al., 2019). Обнаружено понижение в крови протромбинового индекса (вторая фаза коагуляции). Выявлены изменения в третьей фазе, фазе образования фибрина – повышение концентрации фибриногена. Показатель, отражающий внутренний механизм коагуляции – каолиновое время укорачивается. Такая картина нами квалифицируется как тенденция к гиперкоагуляции.

Действие различных концентраций свинца и мышьяка в условиях раздельного и совместного влияния на организм животных исследовано Е.И. Ерусалимский. Были изучены поведение и динамика веса животных, активность холинэстеразы цельной крови, динамика отдельных показателей крови (гемоглобина, эритроциты с базофильной зернистостью, ретикулоциты), содержание сульфгидрильных групп белков цельной крови, выведение копропорфиринов с мочой. Изучение концентрации свинца и мышьяка при раздельном и совместном действии в условиях длительных экспериментов вызывают функциональные нарушения центральной нервной системы, угнетение холинэстеразы цельной крови и повышение количества ретикулоцитов у подопытных животных.

При отравлении лабораторных животных масляной суспензией окиси сурьмы изменились лишь некоторые показатели гемокоагуляционной системы крови. Выявлено укорочение времени рекальцификации и укорочение каолинового времени (стандартизированный метод определения внутреннего механизма коагуляции крови). Изменения коагулограмм лабораторных животных отмечены при отравлении масляной суспензией окиси мышьяка. Выявлено повышение концентрации фибриногена, укорочение каолинового времени.

В доступной литературе мы не нашли работ по изучению влияния окиси сурьмы на коагуляционную систему крови, в то же время ряд исследований по изучению особенностей токсикокинетики и токсикодинамики сурьмы проливают свет на механизм развивающихся сдвигов в системе гемокоагуляции. Так, (Martirosov et al., 2018) проводились эксперименты на крысах обоего пола, когда масляная суспензия металлической сурьмы вводилась животным в брюшную полость. В первые дни после введения сурьмы, наибольшее количество её обнаруживается в печени, в стенке кишечника, в бифуркационных лимфатических узлах, наименьшее количество найдено в головном мозге, сердце и лёгких.

При длительном ингаляционном поступлении окиси сурьмы в организм животных наблюдаются сдвиги в лейкоцитарном составе периферической крови (Mohamed et al., 2024). Происходят изменения количественных гематологических показателей: гемоглобина, эритроцитов, лейкоцитов, количественного состава белой крови, холинэстеразы, лактатдегидрогеназы, аланин- и аспартаминотрансферазы, минерального, белкового и липидного обменов.

Изменения коагулограмм лабораторных животных отмечены при отравлении масляной суспензии окиси мышьяка. Выявлено повышение концентрации фибриногена, укорочение каолинового времени.

Были приведены (Mohamed et al., 2024) экспериментальные исследования влияния токсической пыли селено-мышьякового кек при поступлении его в организм через органы дыхания. Селено-мышьяковый кек, образующийся в процессе переработки полиметаллического сырья, содержит в своём составе большую группу токсических веществ; мышьяка 15–30% селена – 2,9–15,7%, свинца около 10% и др., может быть причиной вредного влияния их на организм человека. Затравка животных большими дозами полиметаллической пыли привела к изменениям со стороны периферической крови, отмечено достоверное снижение количества эритроцитов и уровня гемоглобина.

На основании проведённых исследований автор приходит к заключению, что исследуемая пыль привела к угнетению функционального состояния центральной нервной системы, красного ростка крови, а также развитию в бронхах и промежуточной ткани лёгких воспалительных процессов с последующим развитием диффузносклеротической формы пневмокониоза.

Регистрируются изменения в фазах коагуляции крови при комбинированном действии масляных суспензий токсических веществ (селената натрия, нитрата свинца, окиси сурьмы, окиси мышьяка) на организм животных. Установлены изменения в третьей фазе коагуляции (концентрация фибриногена) и во внутреннем механизме коагуляции крови (каолиновое время).

При анализе доступной литературы мы не нашли работ по изучению действия комплекса токсических веществ (селената натрия, окиси сурьмы, нитрата свинца и окиси мышьяка) на систему гемокоагуляции.

Итак, при отдельном и комбинированном действии масляных суспензий токсических веществ на организм животных нами выявлены изменения в первой фазе гемокоагуляции, фазе образования активного тромбопластина (время рекальцификации, толерантность плазмы к гепарину), во второй фазе коагуляции крови, фазе образования тромбина (протромбиновый индекс), в третьей фазе, фазе образования фибрина (концентрация фибриногена). Во внутреннем механизме коагуляции крови тоже выявлены изменения (каолиновое время).

Действие различных концентраций свинца и мышьяка в условиях отдельного и совместного влияния на организм животных исследовано (Mohamed et al., 2024). Были изучены поведение и динамика веса животных, активность холинэстеразы цельной крови, динамика отдельных показателей крови (гемоглобина, эритроциты с базофильной зернистостью, ретикулоциты), содержание сульфгидрильных групп белков цельной крови, выведение копропорфиринов с мочой. Изучение концентрации свинца и мышьяка при отдельном и совместном действии в условиях длительных экспериментов вызывает функциональные нарушения центральной нервной системы, угнетение холинэстеразы цельной крови и повышение количества ретикулоцитов у подопытных животных.

5. Заключение

Открытый способ добычи руд является основным при добыче руд чёрных и цветных металлов, нерудных полезных ископаемых. Для предприятий горнодобывающей промышленности характерен комплекс производственных факторов, способных влиять на

состояние здоровья и работоспособность рабочих. К ним относятся особые микроклиматические условия: пыль, газы, вибрация и шум. Мощным источником образования пыли в карьерах являются взрывные работы, бурение. Выделение газов происходит при взрывных работах, работе автотранспорта, процессах окисления и горения полезного ископаемого.

Работами (Мамурбаев et al., 2019) было отмечено наличие пыли большого числа опасных микроэлементов селена, свинца, сурьмы и мышьяка, были установлены высокие токсические свойства этих металлов, а у рабочих Восточно-Казахстанского медно-химического комбината выявлены значительные обменные нарушения, сопровождающиеся сдвигами со стороны эндокринной, сердечно-сосудистой, нервной системы, значительные нарушения в обмене липидов и углеводов, минеральном обмене, активности ферментов, характеризующих функциональное состояние печени, почек, желудочно-кишечного тракта.

Учитывая вышеизложенное, большой интерес представляет изучение функционального состояния системы гемокоагуляции лабораторных животных при раздельном и комбинированном действии токсических веществ.

Коагуляция крови – сложный биохимический и физико-химический процесс, по своей сущности. Главным образом, представляет собой ферментативный процесс. В настоящее время получены новые данные, уточняющие сущность ферментативных реакций, обеспечивающих процесс коагуляции крови. Кроме фибриногена, протромбина, тканевого тромбопластина и ионов кальция в процессе коагуляции крови принимают участие и другие вещества, обнаруженные не только в плазме, но и в форменных элементах крови, а также во многих тканях и органах. Одни факторы системы коагуляции крови обеспечивают и ускоряют процесс гемокоагуляции, другие же замедляют или прекращают его. Большинство факторов образуются в печени и для их синтеза необходим витамин К.

В целом проведенные исследования позволяют считать, что гиперкоагуляционные изменения, выявленные при действии неблагоприятных факторов, в первую очередь, полиметаллической пыли, содержащей токсические вещества (селенат натрия, нитрат свинца, окись сурьмы и окись мышьяка), направлены на ускорение процессов образования тромбопластина, тромбина и фибрина.

Выявлены достоверные изменения большинства показателей коагулограммы при действии на лабораторных животных нитрата свинца, селената натрия, а также окиси сурьмы, окиси мышьяка и комбинированное действие этих веществ. Выявлено укорочение времени рекальцификации (первая фаза коагуляции), понижение в крови протромбинового индекса (вторая фаза), повышение концентрации фибриногена (третья фаза коагуляции).

Показатель, отражающий внутренний механизм коагуляции – каолиновое время – укорачивается. Такая картина нами квалифицируется как тенденция к гиперкоагуляции. Мы применили кожно-резорбтивный метод отравления крыс, так как были установлены высокие токсические свойства селената натрия, нитрата свинца, окиси сурьмы, окиси мышьяка при поступлении через кожу (Мамурбаев et al., 2019).

Таким образом, экспериментальная модель подтвердила токсичность воздействия нитрата свинца, селената натрия, окиси сурьмы и окиси мышьяка, а также их комбинированное воздействие на коагуляционную систему крови.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация – К.Д., Г.К.; методология – С.К.; программное обеспечение – С.Б., А.Ц.; валидация – Р.Б., В.С.; формальный анализ – А.Ц.; исследование – С.К.; ресурсы – С.Г.; курирование данных – С.Б.; написание - подготовка оригинального черновика – К.Д.; написание - рецензирование и редактирование – Г.К.; визуализация – Р.Б.; руководство – С.Г.;

администрирование проекта – В.С. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Дакиева, Кульзипа – ассоциированный профессор, доктор по профилю по специальности 6D060700 Биология, профессор кафедры экологии и географии, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, ул. 30-ой Гвардейской дивизии, 34, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070002; ecology-2014@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8110-5255>

Калелова, Гульфат – магистр технических наук, сениор-лектор кафедры экологии и географии, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, ул. 30-ой Гвардейской дивизии, 34, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070002; gkalelova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3627-1799>

Кумарбекулы, Санат – PhD, старший преподаватель кафедры географии и экологии Казахского национального педагогического университета им. Абая, проспект Достык, 13, Алматы, Казахстан, 050010; sanat_kv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-3281>

Бакин, Серик – магистр естественных наук, сеньор-лектор кафедры экологии и географии, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, ул. 30-ой Гвардейской дивизии, 34, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070002; bakinserik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1948-6296>

Гармашова, Светлана – кандидат технических наук, сеньор-лектор кафедры экологии и географии, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, ул. 30-ой Гвардейской дивизии, 34, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070002; tootex@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4331-745X>

Седелев, Валерий – доктор технических наук, сеньор-лектор кафедры экологии и географии, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, ул. 30-ой Гвардейской дивизии, 34, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070002; valeriysedelev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9663-5726>

Бейсембаева, Роза – кандидат географических наук, ассоциированный профессор кафедры экологии и географии, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, ул. 30-ой Гвардейской дивизии, 34, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070002; roza.beysembaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6021-6282>

Цыганов, Анатолий – кандидат биологических наук, ассоциированный профессор кафедры экологии и географии, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, ул. 30-ой Гвардейской дивизии, 34, Усть-Каменогорск, Казахстан, 070002; tsap_ecobio@list.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2137-0812>

9. Финансирование: отсутствует.

10. Благодарность: мы благодарим администрацию Восточно-Казахстанского медно-химического комбината за проведение исследований. При проведении работ конфликтов не было.

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

12. Список литературы

1. Abudayeh, Z. H., Karpiuk, U., Kyslychenko, V., Abualassal, Q., Hassouneh, L. K., Qadus, S., & Talhouni, A. (2022). Optimizing extractability, phytochemistry, acute toxicity, and hemostatic action of corn silk liquid extract. *Journal of Chemistry*, 2022(1), 3059725. <https://doi.org/10.1155/2022/3059725>

2. Agabaljan, E. A. (2016). State of coagulation in persons exposed to chloroprene (Sostoyanie koagulyacii u lic, kontaktiruyushchih s hloroprenom in Russian). *Materials of the conference of young researchers (Materialy konferencii molodyh nauchnyh rabotnikov)*, 52–64.
3. Amara, I., Miled, W., Slama, R. B., & Ladhari, N. (2018). Antifouling processes and toxicity effects of antifouling paints on marine environment: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 57, 115–130. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.12.001>
4. Birke, M., Reimann, C., Rauch, U., Ladenberger, A., Demetriades, A., Jähne-Klingberg, F., Oorts, K., Gosar, M., Dinelli, E., & Halamić, J. (2017). GEMAS:cadmium distribution and its sources in agricultural and grazing land soil of Europe. *Journal of Geochemical Exploration*, 173, 13–30. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.007>
5. Brin, V. B., Gagloeva, E. M., Moldovan, T. V., & Botsieva, N. V. (2020). The effect of melatonin on the functional state of the hemostatic system and osmoregulatory kidney function in rats with chronic molybdenum intoxication. In *The International Conference «Health and wellbeing in modern society» (ICHW 2020)* (pp. 133-138). Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/ahsr.k.201001.028>
6. Ershov, B. A., & Pletnjova, T. V. (1989). The mechanism of toxic action of inorganic compounds (Mehanizm toksicheskogo dejstviya neorganicheskikh soedinenij in Russian) *Materials of the conference of young researchers (Materialy konferencii molodyh nauchnyh rabotnikov)*, 271-279.
7. Flexer, V., Baspineiro, C. F., & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: a vital raw material for green energies with a potential environmental impact. *Science of the Total Environment*, 639, 1188–1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
8. Hasanova, K. A., & Rusina, N. V. (2017). Lead poisoning and the blood coagulation system (Svincovoe porazhenie i sistema svertyvaniya krovi in Russian). *Proceedings of the Tajik Medical Institute (Trudy Tadzhijskogo medinstituta)*, 90, 108–113.
9. Kilanowicz, A., Markowicz-Piasecka, M., Klimczak, M., Stragierowicz, J., & Sikora, J. (2019). Hexachloronaphthalene as a hemostasis disturbing factor in female Wistar rats - a pilot study. *Chemosphere*, 228, 577-585. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.147>
10. Kong, Y., Zhou, Y., Zhang, P., Nie, Y., & Ma, J. (2024). Coagulation performance and mechanism of different novel covalently bonded organic silicon-aluminum/iron composite coagulant for As(V) removal from water: the role of hydrolysate species and the effect of coexisting microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 135819. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135819>
11. Kost, E. A. (1975). *Handbook of Clinical Research Methods (Spravochnik po klinicheskim metodam issledovanija in Russian)*, M., 382.
12. Koumaravelou, K. (2021). An approach of the plant *Mesua Ferrea* Linn for the venom induced consumption coagulopathy (VICC), caused by the snake *Echis Carinatus* (Russel viper). *International Journal of Pharmaceutical Research*, 09752366, 13(1). <https://doi.org/10.31838/ijpr/2021.13.01.173>
13. Kozlovskaja, L. V., & Nikolaev, A. Ju. (1984). *Textbook on clinical laboratory research methods (Uchebnoe posobie po klinicheskim laboratornym metodam issledovanij in Russian)*, M., 287.
14. Kudrjashov, B. A. (2017). Biological problems of regulation of the liquid state of blood and its coagulation (Biologicheskie problemy reguljacji zhidkogo sostojanija krovi i ejo svjortyvanie in Russian) *Medicine (Medicina)*. M., 317.
15. Kuryata, O., Akimov, O., Denisenko, S., Kostenko, H., Kostenko, V., Mishchenko, A., & Kostenko, V. (2023). Chondroitin sulfate in osteoarthritis management among diabetic patients: molecular mechanisms and clinical potential. *Romanian Journal of Diabetes Nutrition and Metabolic Diseases*, 30(4), 481-493. <https://doi.org/10.46389/rjd-2023-1425>

16. Laursen, M. A., Larsen, J. B., & Hvas, A. M. (2018). Platelet function in disseminated intravascular coagulation: a systematic review. *Platelets*, 29(3), 238-248. <https://doi.org/10.1080/09537104.2018.1442567>
17. Mamyrbayev, A. A., Altaev M. M., & Komekova G. A. (2019). Occupational hygiene and diseases in the chemical industry of Kazakhstan (Gigiena truda i profzabolevanij v himicheskoj promyshlennosti Kazahstana in Russian). *Alma-Ata: Research Institute of Regional Pathology (Alma-Ata: NII kraevoj patologii)*, 7-34.
18. Martirosov, M. S. (2018). The effect of galbanic acid on the blood coagulation system in the experiment. (Vlijanie gal'banovoj kisloty na svjortyvajushhuyu sistemu krovi v jeksperiment in Russian) *Medical Journal (Medicinskij zhurnal)*, 6, 57-60.
19. Mazaev, V. T., Vasilenko, V. E., Andrianov, A. P. (2017). The experience of studying hemostasis in toxicological studies (Opyt izuchenija gemostaza v toksikologicheskikh issledovanijah in Russian). *Hygiene and sanitation (Gigiena i sanitarija)*, 8, 84-85.
20. Men'shikov, B. V. (1984). Laboratory tests at the clinic (Laboratornye issledovanija v klinike in Russian), M., 364.
21. Mochkina, S. E., & Bogun, V. L. (2019). The effect of subacute alphas-methyl styrene intoxication on the blood coagulation system (Vlijanie podostroj intoksikacii al'fаметilstirolom na svjortyvajushhuyu sistemu krovi in Russian). *Proceedings of the Krasnoyarsk Medical Institute (Trudy Krasnojarskogo medinstituta)*, 9, 166-169.
22. Mohamed Noor, M. H., & Ngadi, N. (2024). Ecotoxicological risk assessment on coagulation-flocculation in water/wastewater treatment: a systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(40), 52631-52657. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34700-0>
23. Netesa, V. A. (2018). Thromboelastographic studies of blood coagulation under the influence of alphas-methyl styrene in an experiment (Tromboelastograficheskie issledovanija svjortyvaniya krovi pod vlijaniem al'fаметilstirola v jeksperimente in Russian). *Scientific works of the Novosibirsk (Medical Institute Nauchnye trudy Novosibirskogo medinstituta)*, 107, 205-209.
24. Olijevskaja, S. K., Kuzminska, O. V., & Trunina, T. I. (2018). The changes in the blood aggregative system under the influence of lead chloride on the example of albino rats. *Likars' ka sprava*, 5-6, 122-126. [https://doi.org/10.31640/JVD.5-6.2018\(21\)](https://doi.org/10.31640/JVD.5-6.2018(21))
25. Shelkova, T. V. & Chursyn, A. A. (2016). Activation of the anticoagulant blood system with chloromethylsilatrone (Aktivacija protivosvjortyvajushhej sistemy krovi hlormetilsilatronom in Russian). *Biologically active silicon compounds (Biologicheski aktivnye soedinenija kremnija)*, 85-86.
26. Trahtenberg, I. I., Timofeevskaja, L. A., & Kvjatkovskaja, I. Ja. (2017). Methods for studying the chronic effects of chemical and biological pollutants (Metody izuchenija hronicheskogo dejstvija himicheskikh i biologicheskikh zagraznitelej in Russian), Riga, 170.
27. Witeska, M., Kondera, E., & Bojarski, B. (2023). Hematological and hematopoietic analysis in fish toxicology - a review. *Animals*, 13(16), 2625. <https://doi.org/10.3390/ani13162625>
28. Zhang, D., Xu, X., Lu, Y., & Guo, L. (2024). Behavioral toxicity and neurotoxic mechanisms of PLA-PBAT biodegradable microplastics in zebrafish. *Science of The Total Environment*, 928, 172354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172354>

Үйітты заттардың бөлек және аралас әсері кезіндегі гемокоагуляция жүйесі көрсеткіштерінің өзгеріштігі

Кульзипа Дакиева, Гульфат Калелова, Санат Құмарбекұлы, Серик Бакин, Светлана Гармашова, Валерий Седелев, Роза Бейсембаева, Анатолий Цыганов

Аңдатпа. Шығыс Қазақстан мыс-химия комбинаты Шығыс Қазақстан облысында Усть-Таловка кентінде орналасқан, комбинаттың құрылымдық бөлімшелері үш карьер (Шемонаиха, Николаев, Камышинский) және Николаев байыту фабрикасы болып табылады. Тау-кен жұмыстарының ашық әдісімен барлық негізгі процестер шаңның бөлінуімен бірге жүреді. Бұрғылау кезінде шаңның бөлінуі тау жыныстарының немесе кендердің жойылуына және ұнғымалардан бөлінетін бұрғылау ұсақ-түйектерінің ауаға енуіне байланысты болады. Тау-кен көлігі машиналарының карьерлері мен кабиналарының ауа ортасында қалқып жүрген полиметалл шаңының қауіптілігі мен уыттылығы тұрғысынан шаңның химиялық құрамы ерекше қызығушылық пен назар аударады. А.А. Мамырбаевтың еңбектерінде көптеген ықтимал қауіпті микроэлементтер-қорғасын нитраты, натрий селенаты, мышьяк оксиді, сурьма оксиді шаңының болуы көрсетілген. Бұл улы заттардың жалпы уытты әсерінің сипаты егжей-тегжейлі зерттелген және көптеген еңбектерде жалпыланған, сонымен бірге бұл заттардың қанның коагуляциялық жүйесіне әсер ету ерекшеліктері жеткілікті зерттелмеген. Зерттеудің мақсаты - жануарларға модельдік эксперименттерде улы заттардың (қорғасын нитраты, натрий селенаты, сурьма оксиді және мышьяк оксиді) әсерін зерттеу болды. Гемокоагуляция жүйесін зерттеу салмағы 150-160 грамм Wister желісінің ақ жыныстық жетілген еркек егеуқұйрықтарында эксперимент жағдайында жүргізілді. Егеуқұйрықтардың қанның гемокоагуляциясы жүйесінің функционалдық жағдайын бағалау үшін келесі коагулограмма сынақтары анықталды: фибриноген концентрациясы, протромбин индексі, рекальцификация уақыты, каолин уақыты, плазманың гепаринге төзімділігі, қанның коагуляциясы процесінің бірінші, екінші және үшінші фазаларын сипаттайтын этанол сынағы. Зерттеудің құндылығы - өндірістік факторлардың, атап айтқанда улы заттардың коагуляциялық қан жүйесінің әртүрлі компоненттеріне жағымсыз әсерін зерттеу бұрын жүргізілмеген және жүргізілген зерттеулер қазіргі коагулологияның кейбір даулы мәселелеріне айқындық бере алады.

Түйін сөздер: тәжірибелік жануарлар; гемокоагуляция жүйесінің көрсеткіштері; улы заттар кешені.

On the variability of hemocoagulation system parameters under the separate and combined action of toxic substances

Kulzipa Dakieva, Gulfat Kalelova, Sanat Kumarbekuly, Serik Bakin, Svetlana Garmashova, Valery Sedelev, Rosa Beysembaeva, Anatoliy Tsyganov

Annotation. The East Kazakhstan Copper and Chemical Combine is located in the Ust-Talovka settlement in the East Kazakhstan region. The structural units of the combine are three quarries (Shemonaikha, Nikolaevsky, Kamyshinsky) and the Nikolaevskaya processing Plant. In the open-pit mining process, all major processes are accompanied by the release of dust. During drilling, dust is released due to the destruction of rock or ore and the intake of drilling fines released from wells into the air. From the point of view of the danger and toxicity of polymetallic dust floating in the air of quarries and cabins of mining vehicles, the chemical composition of dust is of particular interest and attention. The works of A.A. Mamyrbayev show the presence of dust of a large number of potentially dangerous trace elements, lead nitrate, sodium selenate, arsenic oxide, and antimony oxide. The nature of the general toxic effect of these toxic substances has been studied in detail and summarized in numerous works; at the same time, the features of the specific effect of these substances on the activity of the blood coagulation system remain unexplored.

The aim of the study was to study the effects of toxic substances (lead nitrate, sodium selenate, antimony oxide, and arsenic oxide) in model experiments on animals.

Studies of the hemocoagulation system were conducted experimentally on white sexually mature male rats of the Wister line weighing 150-160 grams.

To assess the functional state of the rat blood hemocoagulation system, the following coagulogram tests were performed: fibrinogen concentration, prothrombin index, recalcification time, kaolin time, plasma tolerance to heparin, and an ethanol test characterizing the first, second, and third phases of the blood coagulation process.

The value of the study lies in the fact that the study of the adverse effects of industrial factors, namely, toxic substances, on various components of the blood coagulation system has not been conducted before, and the conducted research may clarify some controversial issues of modern coagulology.

Keywords: experimental animals; indicators of the hemocoagulation system; a complex of toxic substances.

Разработка и оптимизация активированного угля из биомассы для повышения водосбережения в сельском хозяйстве

Ерлан Досжанов^{1,2}, Дана Ахметжанова^{1,2*}, Арман Жумажанов^{1,2}, Оспан Досжанов³, Зере Нұрбол⁴, Мағжан Оспан⁵

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; doszhanov_yerlan@mail.ru, adana128128@gmail.com, jumajanarman@gmail.com

²Институт проблем горения, Алматы, Казахстан; doszhanov_yerlan@mail.ru, adana128128@gmail.com, jumajanarman@gmail.com

³Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; ospan.doszhanov@mail.ru

⁴Назарбаев Интеллектуальная школа естественно-математического направления, Алматы, Казахстан; zere2301nm@gmail.com

⁵Joо High School, Алматы, Казахстан; ospanmagzhan9@gmail.com

*Корреспонденция: adana128128@gmail.com

Цитирование: Досжанов, Е., Ахметжанова, Д., Жумажанов, А., Досжанов, О., Нұрбол, З., Оспан, М. (2026). Разработка и оптимизация активированного угля из биомассы для повышения водосбережения в сельском хозяйстве. Journal of Ecology and Sustainability, 154(1), 77-92. <https://doi.org/10.32523/5da1jn33>

Академический редактор:
А. Зандыбай

Поступила: 13.12.2025
Исправлена: 12.02.2026
Принята: 27.03.2026
Опубликована: 31.03.2026



Copyright: © 2026 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. Устойчивое развитие сельского хозяйства в условиях глобального изменения климата и ограниченных водных ресурсов требует внедрения инновационных материалов с повышенной влагоудерживающей способностью, включая углеродные субстраты на основе сельскохозяйственных отходов. В данной работе проведено комплексное исследование текстурных, морфологических и адсорбционных характеристик активированного угля (АУ), синтезированного из рисовой шелухи при варьировании массовых соотношений сорбента к гидроксиду калия (КОН) (1:1, 1:2, 1:3 и 1:4). Цель работы – оптимизация условий химической активации для формирования пористой структуры, обеспечивающей эффективное влагоудержание. Методология включала применение теории функционала плотности (DFT) и метода Барретта–Джойнера–Халенды (ВЖН). Результаты показали, что максимальный суммарный объем пор (1,6 см³/г) и развитая удельная поверхность (2900 м²/г) достигаются при соотношении 1:3. ИК-Фурье спектроскопия подтвердила наличие гидрофильных функциональных групп (О-Н, С=О, С-О), играющих ключевую роль в связывании молекул воды. Эксперименты по влагоудержанию, выполненные в трехкратной повторности (n=3), продемонстрировали, что образец 1:3 характеризуется наиболее стабильным сохранением влаги как при 22 °С, так и при повышенной температуре 50 °С, значительно превосходя образцы с низкой степенью активации (1:1, 1:2) и переактивированный образец (1:4). Сравнительный анализ показал, что оптимизированный АУ обладает превосходством над традиционным биоуглем и цеолитами по удельной поверхности, обеспечивая долгосрочную стабильность углеродного каркаса в почве. Полученные данные подтверждают ключевую роль баланса микро- и мезопор в процессах замедления испарения воды и свидетельствуют о высокой перспективности

использования данных материалов в качестве экологически безопасных влагосберегающих агентов для повышения продуктивности агроценозов в засушливых регионах.

Ключевые слова: активированный уголь; сельскохозяйственные отходы; влагоудерживающий субстрат; пористая структура; адсорбционные свойства.

1. Введение

Обеспечение устойчивого земледелия в условиях климатических изменений и дефицита воды - приоритетная задача мирового агропромышленного комплекса (Lesk et al., 2016, Ayaz et al., 2021). Изменение климата напрямую снижает продуктивность сельскохозяйственных культур, что особенно критично для регионов с ограниченными водными ресурсами. Согласно Седьмому национальному докладу Республики Казахстан об изменении климата, к 2050 году влажность в вегетационный период в Северо-Казахстанской области снизится на 11–16%, а частота засух возрастет на 10–15% (Zhumagulov et al., 2024). Эти прогнозы свидетельствуют о том, что традиционные методы ведения сельского хозяйства требуют пересмотра в пользу водосберегающих технологий.

В последние десятилетия северные широты прогреваются быстрее других регионов планеты. В Центральной Азии это сопровождается дефицитом осадков и увеличением продолжительности засух (Abdolla et al., 2024). В Казахстане более 80% сельхозугодий подвержены дефициту влаги. В этой связи внедрение водосберегающих технологий становится ключевым фактором продовольственной безопасности страны.

Традиционное использование минеральных удобрений для повышения урожайности часто ведет к значительным экологическим проблемам. Выщелачивание азота способствует загрязнению водных ресурсов и почвы, а также увеличивает подвижность тяжелых металлов (Sabitov et al., 2024, Brar et al., 2024, Doszhanov et al., 2024, Akhmetzhanova et al., 2025). Перспективным решением являются сорбенты, способные удерживать влагу и питательные вещества, снижая потребность в частом поливе.

Наиболее доступным и экономически оправданным сырьем для производства подобных сорбентов являются растительные остатки: стебли, шелуха и кора. Из этого растительного материала получают активированный уголь (АУ), обладающий высокой удельной поверхностью и развитой пористой структурой (Ndede et al., 2022, Sabitov et al., 2024). Важно учитывать, что различия между АУ и биоуглем заключаются в источнике сырья, методе производства и целевом применении (Hagemann et al., 2018). Процесс получения АУ включает несколько стадий: карбонизацию биомассы в условиях ограниченного доступа кислорода и последующую химическую активацию с использованием гидроксида калия (KOH) (Williams et al., 2022). В результате образуется биоуголь - углеродсодержащий продукт, который может сохранять питательные вещества, связывать тяжелые металлы и снижать токсичность удобрений (Chen et al., 2018, Afshar et al., 2024, Abhishek et al., 2022). Биоуголь может применяться в различных областях сельского хозяйства. Он может использоваться как почвенная добавка для улучшения водного и питательного баланса почвы, добавляться в корма и силос, служить субстратом в рыбном хозяйстве, а также использоваться для очистки воды (Saletnik et al., 2019, Feng et al., 2023, Moroung et al., 2020, Dadhich et al., 2022, Schmidt et al., 2019, Maleki et al., 2023). В настоящей работе материал получен путем химической активации рисовой шелухи с использованием KOH и классифицируется как АУ. При этом параметры активации, включая массовое соотношение KOH и углеродного сырья, оказывают существенное влияние на текстурные и адсорбционные характеристики полученного углерода. Эти параметры определяют способность материала удерживать влагу и поглощать питательные вещества, что напрямую влияет на его эффективность при использовании в сельском хозяйстве (Jedynak et al., 2024, Hiremath et al., 2012, Doszhanov et al., 2023).

В данной работе проведено комплексное изучение поверхностных и структурных характеристик АУ, полученного при различных массовых соотношениях сорбента и КОН. Цель исследования - оптимизация условий активации для повышения удельной поверхности и пористой структуры материала, что позволяет его использовать в качестве эффективного водосберегающего субстрата. Для идентификации функциональных групп, отвечающих за удержание воды, использовался метод инфракрасной (ИК) Фурье-спектроскопии (FTIR). Пористая структура анализировалась методами теории функционала плотности (DFT) и Барретта-Джойнера-Халенды (БДХ). Это обеспечило детальное понимание влияния условий активации на формирование микро- и мезопор (Doszhanov et al., 2023, Bardestani et al., 2019, McLaren et al., 2021, Barrett et al., 1951).

Результаты позволяют оценить структурные и адсорбционные свойства АУ и выявить оптимальные параметры производства угля с высокой влагоудерживающей способностью. Это имеет прямое значение для внедрения водосберегающих технологий в сельское хозяйство. Полученные данные способствуют пониманию механизмов действия сорбентов и открывают новые подходы к управлению водными ресурсами в условиях меняющегося климата.

2. Материалы и методы

В рамках настоящей работы под влагоёмкостью понимается количество воды, поглощаемой материалом при заданных экспериментальных условиях, тогда как влагоудерживающая способность используется для описания способности материала сохранять влагу во времени и при высыхании, что имеет прикладное значение для сельскохозяйственных субстратов.

АУ был получен из рисовой шелухи – побочного продукта переработки риса, являющегося высокоуглеродным сырьем благодаря значительному содержанию целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Эти компоненты обеспечивают формирование развитой пористой структуры при термохимической обработке.

Процесс получения АУ включал пять этапов: тщательное измельчение сырья, карбонизация, пропитка щелочью, предварительный нагрев и химическая активация. Рисовую шелуху измельчали до мелких фракций с целью увеличения удельной поверхности и обеспечения равномерной теплопередачи во время пиролиза. Такая подготовка повышала эффективность карбонизации, уменьшала неоднородность структуры материала и способствовала формированию пористой структуры с развитой микропористостью.

Карбонизация проводилась при температуре 550 °С в течение 120 мин с линейной скоростью нагрева 5 °С/мин. Эксперимент выполняли в инертной атмосфере, поддерживаемой подачей азота в вертикальный стальной реактор со скоростью 150 см³/мин, что обеспечивало предотвращение окислительных процессов и стабильность структуры углерода.

Карбонизированные образцы подвергались пропитке 1 М раствором КОН с различными массовыми соотношениями сорбента к щелочи 1:1, 1:2, 1:3 и 1:4 (соответствующие объемы раствора 5, 10, 15 и 20 мл). Это позволяло равномерно распределить активирующий агент по всей массе материала. Для глубокого проникновения щелочи смесь выдерживали 3 часа при температуре 30–80 °С.

Образцы нагревали в электропечи до 300–850 °С (5 °С/мин). После 3-часовой выдержки материал охлаждали до комнатной температуры в среде аргона. Для удаления остаточных реагентов и продуктов реакции полученный АУ промывали 0,1 М раствором соляной кислоты, а затем дистиллированной водой до достижения нейтрального рН (6–7). После промывки образцы сушили при температуре 100–105 °С до постоянной массы.

Для тестов использовались частицы размером 1–2 мм. Испытания проводились для всех четырех типов образцов (соотношения от 1:1 до 1:4). Для каждого образца использовали по 10 г материала с добавлением 5 г дистиллированной воды. Испытания проводились при температурах – 22 °С и 50 °С. Динамику поглощения и испарения влаги фиксировали через 10, 20, 30, 60, 120 и 150 мин.

Исследования влагоемкости и влагоудерживающей способности проводились в идентичных условиях в трехкратной повторности ($n=3$) для каждого образца. Полученные результаты носят сравнительный характер и позволяют выявить различия в свойствах материалов в зависимости от условий их активации. Статистическая обработка данных включала расчет стандартного отклонения (SD), результаты представлены в формате Среднее \pm SD.

3. Результаты

3.1. Морфологическая структура сорбентов

Морфологическая структура полученных АУ зависит от соотношения масс исходного сорбента и гидроксида калия (KOH): а) 1:1, б) 1:2, с) 1:3 и д) 1:4 (рисунок 1). Микрофотографии демонстрируют изменение пористости и структуры образцов при увеличении содержания АУ.

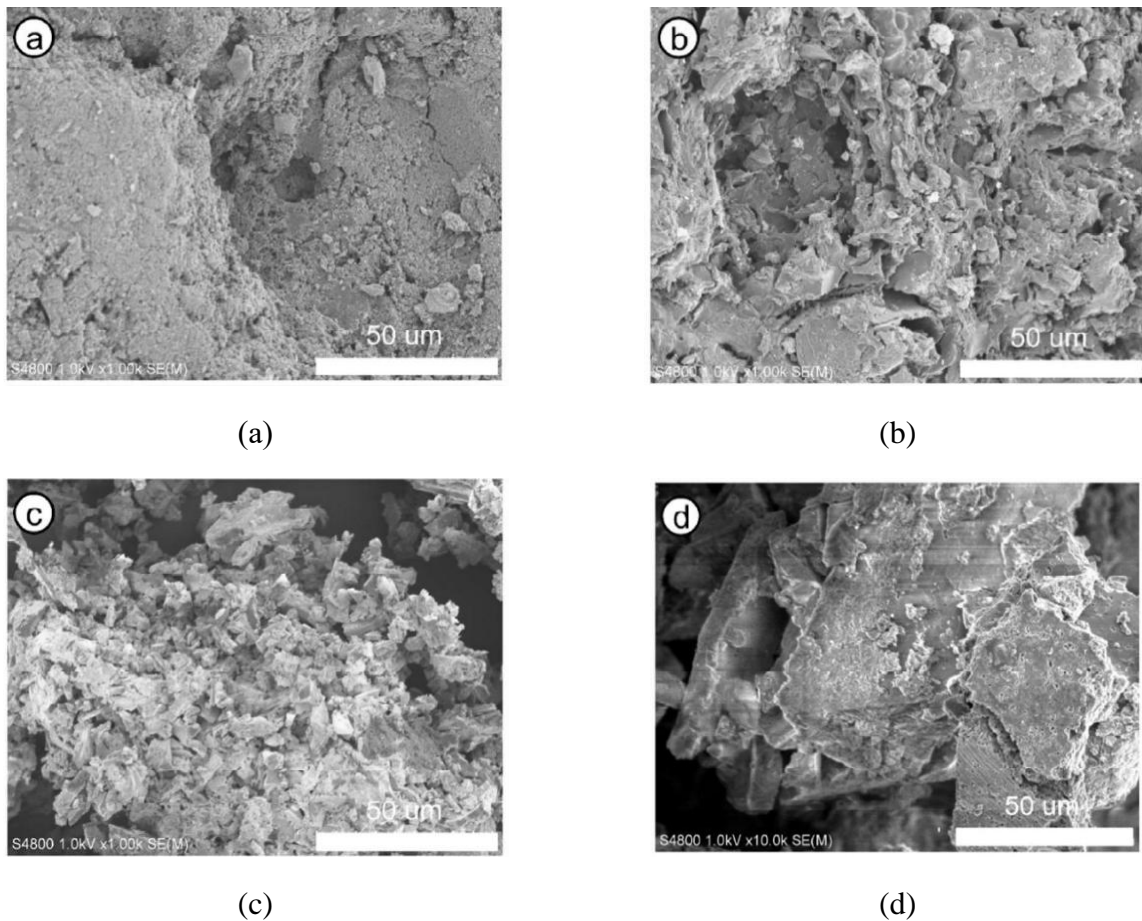


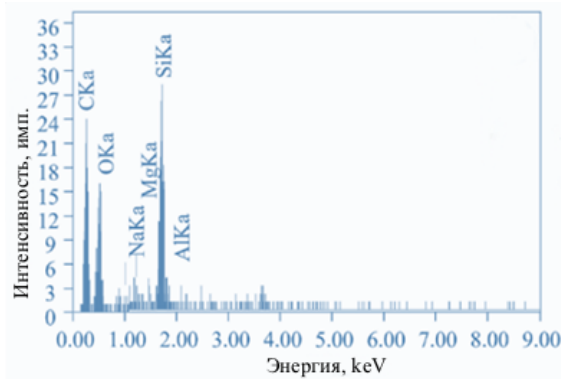
Рисунок 1. Микроструктура активированного угля, полученного при различных массовых соотношениях сорбента и KOH: (а) 1:1, (б) 1:2, (с) 1:3 и (д) 1:4

Образец, полученный при соотношении 1:1, характеризуется сравнительно плотной и слаборазвитой структурой с низкой степенью пористости (рисунок 1а). При увеличении соотношения до 1:2 наблюдается повышение рыхлости материала и увеличение количества пор по сравнению с образцом 1:1 (рисунок 1б). Структура становится неоднородной с появлением микропор.

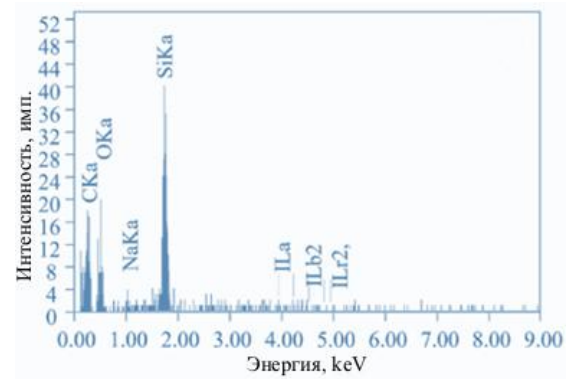
Наиболее выраженная пористая структура зафиксирована в образце при соотношении 1:3 (рисунок 1с), который отличается равномерным распределением пор и высокой степенью разрыхления углеродной матрицы. При дальнейшем увеличении доли KOH до соотношения 1:4 структура становится чрезмерно рыхлой, с признаками поверхностной эрозии и разрушения углеродного каркаса (рисунок 1д).

3.2. Энергодисперсионные спектры (ЭДС) АУ

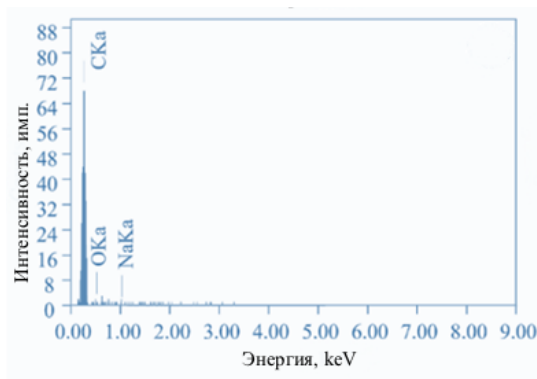
На рисунке 2 представлены энергодисперсионные спектры (ЭДС) АУ, полученного при различных массовых соотношениях сорбента к КОН. Во всех образцах зафиксированы пики, соответствующие основным элементам структуры АУ: углерод (С), кислород (О), а также натрий (Na), магний (Mg), алюминий (Al) и кремний (Si).



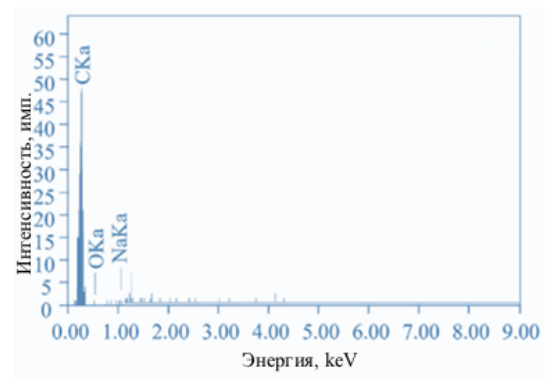
(a)



(b)



(c)



(d)

Рисунок 2. Энергодисперсионные спектры активированного угля, полученные при различных массовых соотношениях сорбента и КОН: (a) 1:1, (b) 1:2, (c) 1:3 и (d) 1:4

Образец 1:1 (рисунок 2a) наблюдаются выраженные пики С и О, а также пики Na и Mg.

Образец 1:2 (рисунок 2b): отмечается рост интенсивности пиков С и О. В спектре также фиксируется выраженный пик Si.

Образец 1:3 (рисунок 2c): в спектре доминируют пики С и О, в то время содержание примесей минимально.

Образец 1:4 (рисунок 2d): основными элементами также остаются С и О, однако интенсивность пиков Na и Mg несколько возрастает по сравнению с образцом 1:3.

Для оценки поверхностных характеристик АУ, синтезированных при различных соотношениях сорбента и КОН, проведены измерения параметров азотной адсорбции методом БЭТ. Результаты представлены в таблице 1.

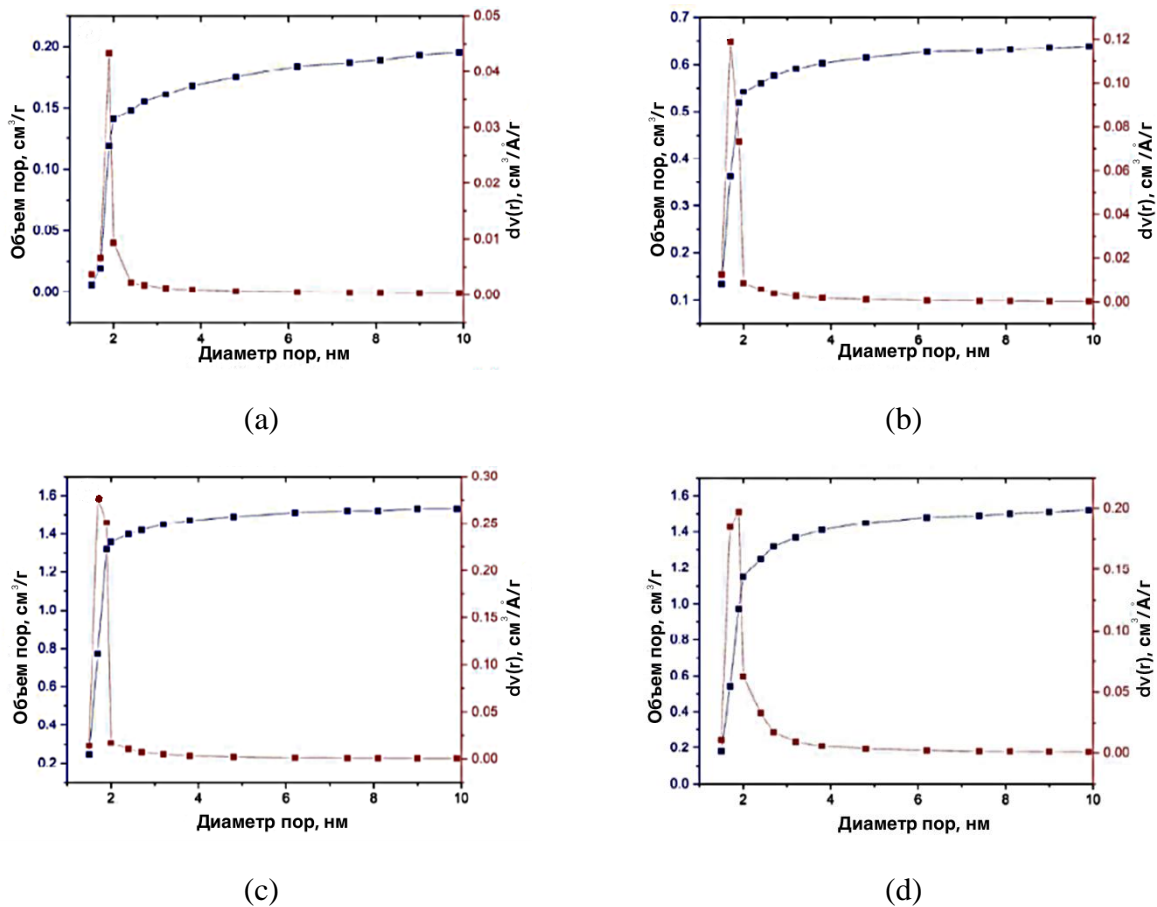
Таблица 1. Текстурные характеристики и параметры адсорбции БЭТ образцов при различных массовых соотношениях сорбента к КОН

Соотношение сорбент:КОН	Удельная поверхность, м ² /г	Константа, С	Коэффициент корреляции, r
1:1	910,0	55,456	0,999
1:2	1210,0	195,234	0,997
1:3	2900,0	101,356	0,997
1:4	924,0	57,389	0,952

Наибольшее значение удельной поверхности (2900,0 м²/г) зафиксировано для образца с соотношением 1:3. При дальнейшем увеличении содержания щелочи (до 1:4) наблюдается резкое снижение поверхности до 924,0 м²/г, что может быть связано с частичным разрушением пористой структуры.

3.3. Распределение объема пор АУ

Анализ распределения объема пор АУ, полученного при четырех массовых соотношениях сорбента к КОН, представлен на рисунке 3. Графики демонстрируют зависимость общего (см³/г) и дифференциального объемов пор $dv(r)$ (см³/Å/г) от их диаметра. Эти данные позволяют оценить влияние условий активации на формирование пористой структуры материала.

**Рисунок 3.** Распределение объема пор активированного угля при различных массовых соотношениях сорбента и КОН: (a) 1:1, (b) 1:2, (c) 1:3 и (d) 1:4

Образцу КОН = 1:1 характерен умеренный общий объём пор, где структура представлена преимущественно микропорами диаметром ≈ 2 нм (рисунок 3а). На графике $dv(r)$ наблюдается выраженный пик при данном диаметре, тогда как вклад мезо- и макропор незначителен.

В образце 1:2 общий объём пор возрастает до $0,7 \text{ см}^3/\text{г}$, при этом микропоры диаметром около 2 нм также остаются доминирующими (рисунок 3б).

Максимальный общий объём пор – $1,6 \text{ см}^3/\text{г}$ - зафиксирован в образце 1:3 (рисунок 3с). В данном случае наряду с высокой концентрацией микропор присутствует заметная доля мезопор, характеризующихся равномерным распределением

В образце 1:4 общий объём пор сохраняется на уровне $1,6 \text{ см}^3/\text{г}$, однако пик $dv(r)$ становится менее выраженным, что свидетельствует о перераспределении пор в сторону более крупных диаметров (рисунок 3д).

3.4. Влагоёмкость АУ

Экспериментальные исследования показали, что динамика удержания воды АУ существенно зависит от массового соотношения сорбента и КОН, используемого на стадии химической активации. Наиболее высокая влагоёмкость и замедленное испарение воды наблюдались у образца с соотношением 1:3, который характеризовался оптимально развитой микропористой структурой, обеспечивающей эффективное удержание влаги.

Анализ динамики испарения воды показал, что при повышенной температуре 50°C масса воды в образце 1:3 постепенно уменьшалась с $5,031 \text{ г}$ в начале эксперимента до $1,695 \text{ г}$ через 150 мин, что отражает стабильный и равномерный характер потери влаги. При комнатной температуре 22°C скорость испарения была значительно ниже, и масса воды через тот же временной интервал составляла $4,320 \text{ г}$, что свидетельствует о высокой влагоудерживающей способности материала в условиях, приближенных к естественным (Таблица 2).

Таблица 2. Динамика испарения воды (г) при температурах 50°C и 22°C

t, мин	1:1 (50°C)	1:1 (22°C)	1:2 (50°C)	1:2 (22°C)	1:3 (50°C)	1:3 (22°C)	1:4 (50°C)	1:4 (22°C)
0	$5,031 \pm 0,03$	$5,035 \pm 0,01$	$5,036 \pm 0,01$	$5,035 \pm 0,03$	$5,036 \pm 0,02$	$5,035 \pm 0,01$	$5,030 \pm 0,01$	$5,035 \pm 0,01$
10	$5,052 \pm 0,05$	$4,906 \pm 0,07$	$5,105 \pm 0,04$	$4,929 \pm 0,02$	$5,137 \pm 0,05$	$4,939 \pm 0,05$	$5,120 \pm 0,02$	$4,930 \pm 0,01$
30	$4,402 \pm 0,18$	$4,658 \pm 0,06$	$4,556 \pm 0,09$	$4,756 \pm 0,02$	$4,687 \pm 0,04$	$4,858 \pm 0,02$	$4,656 \pm 0,02$	$4,825 \pm 0,06$
60	$3,505 \pm 0,15$	$4,350 \pm 0,66$	$3,855 \pm 0,06$	$4,508 \pm 0,05$	$4,085 \pm 0,04$	$4,710 \pm 0,02$	$4,004 \pm 0,04$	$4,657 \pm 0,07$
120	$2,002 \pm 1,7$	$4,005 \pm 0,64$	$2,503 \pm 0,15$	$4,251 \pm 0,01$	$2,860 \pm 0,05$	$4,545 \pm 0,05$	$2,803 \pm 0,02$	$4,508 \pm 0,02$
150	$0,907 \pm 0,65$	$3,709 \pm 0,50$	$1,308 \pm 0,05$	$4,005 \pm 0,01$	$1,695 \pm 0,02$	$4,320 \pm 0,04$	$1,606 \pm 0,02$	$4,286 \pm 0,04$

Примечание: Данные представлены как среднее значение \pm стандартное отклонение SD для $n = 3$ повторностей

Образец с соотношением 1:4 продемонстрировал схожие тенденции, однако скорость испарения воды при 50°C была несколько выше по сравнению с образцом 1:3. Это может быть связано с изменением соотношения микро- и мезопор, при котором увеличение доли более крупных пор способствует ускоренному испарению воды при повышенной температуре, несмотря на достаточно высокую начальную влагоёмкость материала. При температуре 22°C различия между образцами 1:3 и 1:4 были менее выражены, что указывает на меньшую чувствительность их влагоудерживающих свойств к температурным колебаниям в умеренных условиях.

Образцы с соотношениями 1:2 и 1:1 характеризовались более быстрым снижением массы воды, особенно при температуре 50°C, что свидетельствует о меньшей способности удерживать влагу. Вероятной причиной является менее развитая пористая структура и ограниченная микропористость, вследствие чего вода быстрее испаряется и в меньшей степени задерживается в объёме углеродного материала. При температуре 22°C различия между этими образцами и наиболее эффективными образцами (1:3 и 1:4) сохранялись, однако проявлялись менее резко за счёт замедления процессов испарения. Таким образом, полученные результаты показывают, что массовое соотношение сорбента и КОН является ключевым фактором, определяющим как влагоёмкость, так и влагоудерживающую способность АУ. Наиболее эффективные образцы (1:3 и 1:4) сохраняют значительную часть воды в течение длительного времени, тогда как образцы с меньшей активацией (1:2 и 1:1) характеризуются ускоренной потерей влаги, особенно при повышенной температуре. Эти наблюдения подчеркивают важность контроля условий химической активации для формирования пористой структуры, обеспечивающей стабильные влагосберегающие свойства материала.

4. Обсуждение

4.1. Влияние массового соотношения КОН на морфологию и элементный состав

Низкая пористость образца 1:1, вероятно, обусловлена недостаточным количеством активирующего агента для эффективного протекания реакций химической активации. В этих условиях процессы взаимодействия КОН с углеродной матрицей ограничены, что приводит к сохранению крупных, слабоветвлённых структурных элементов. Присутствие Na и Mg в образце может быть связано с неполным удалением природных минеральных компонентов и низкой степенью активации на ранней стадии процесса.

Увеличение доли КОН до соотношения 1:2 приводит к интенсивному разрушению крупных фрагментов углеродного материала и формированию микропор. Это указывает на усиление реакций активации и развитие пористой сети в структуре АУ. Рост интенсивности пиков С и О указывает на усиление процессов химической активации и развитие пористой структуры. Высокое содержание Si в данном образце связано с наличием природного SiO₂, характерного для исходного сырья – рисовой шелухи, и его сохранением в процессе активации.

Оптимальные условия активации достигаются при соотношении 1:3, где достигается максимальная удельная поверхность и высокая степень чистоты (доминируют пики С и О). Это указывает на контролируемое травление матрицы без разрушения её каркаса.

При дальнейшем увеличении доли КОН до соотношения 1:4 наблюдается эффект переактивации. Избыток щёлочи приводит к чрезмерному травлению углеродной структуры, эрозии поверхности и частичному разрушению углеродного каркаса, что может негативно сказываться на механической стабильности и эксплуатационных свойствах материала. Таким образом, чрезмерные концентрации активирующего агента не являются целесообразными, несмотря на увеличение степени разрыхления структуры. Вторичный рост интенсивности пиков Na и Mg указывает на накопление щелочных остатков в структуре АУ. Это может быть связано с переактивацией и частичной деградацией углеродного каркаса, а также неполным удалением щёлочи при промывке.

Результаты БЭТ-анализа подтверждают, что увеличение доли КОН в целом способствует росту удельной поверхности АУ. Однако при избытке активирующего агента наблюдается снижение линейности изотерм адсорбции и уменьшение удельной поверхности, что связано с разрушением пористой структуры. Таким образом, массовое соотношение сорбента и КОН 1:3 является оптимальным для получения АУ с высокоразвитой поверхностью и стабильными структурными характеристиками.

4.2. Влияние условий активации на развитие микропористой структуры и объём пор

Доминирование микропор диаметром около 2 нм во всех образцах указывает на ключевую роль химической активации КОН в формировании микропористой структуры АУ. Относительно низкий объём пор при соотношении 1:1 свидетельствует о недостаточной интенсивности процессов активации, что ограничивает развитие пористой сети.

В образце 1:2 заметен рост общего объёма пор, что связано с более эффективным взаимодействием активирующего агента с углеродной матрицей и формированием дополнительных микропор.

Сочетание высокой концентрации микропор и присутствия мезопор в образце 1:3 обеспечивает увеличение доступной поверхности и потенциально более высокую адсорбционную ёмкость. Равномерное распределение пор и выраженный пик $dv(r)$ указывают на сбалансированный характер активации без разрушения углеродного каркаса.

В образце 1:4 наблюдается перераспределение пор в сторону более крупных размеров и снижение выраженности микропористости. Это может быть связано с переактивацией, сопровождающейся частичным разрушением микропористой структуры и образованием макропор, что снижает структурную прочность материала.

Несмотря на высокий уровень активации при соотношениях 1:3 и 1:4, визуальные различия в структуре образцов и данные элементного анализа указывают на более чистую и однородную структуру АУ при соотношении 1:3. В случае соотношения 1:4 вероятно накопление остатков щёлочи, что приводит к гетерогенности структуры и потенциальному ухудшению эксплуатационных свойств. Таким образом, увеличение доли КОН способствует развитию пористой структуры АУ, однако соотношение 1:3 является оптимальным для получения материала с развитой микропористостью и высокой удельной поверхностью.

4.3. Влияние условий активации на влагоудерживающую способность

Результаты исследования подтверждают, что содержание активирующего агента играет ключевую роль в формировании пористой структуры АУ и напрямую влияет на его влагоёмкость и влагоудерживающую способность. Экспериментальные данные показали, что оптимальное массовое соотношение сорбента и КОН 1:3 обеспечивает гармоничное сочетание микро- и мезопор, формируя максимально доступную удельную поверхность для адсорбции воды. Этот фактор позволяет существенно замедлить процесс испарения влаги как при комнатной температуре (22 °C), так и при повышенной температуре (50 °C), обеспечивая стабильное удержание воды на протяжении всего эксперимента.

Образцы с увеличенной долей КОН до 1:4 продемонстрировали лишь незначительное улучшение влагоудерживающей способности по сравнению с оптимальным вариантом 1:3, что указывает на наличие порогового значения массового соотношения активирующего агента. В то же время снижение содержания КОН до 1:2 и 1:1 приводило к заметному ухудшению адсорбционных свойств материала, особенно при повышенной температуре, где скорость испарения влаги была значительно выше. Эти наблюдения чётко коррелируют с результатами анализа текстурных характеристик АУ: менее развитая микропористая структура у образцов с пониженной концентрацией КОН ограничивает удержание воды, в то время как избыточное количество активирующего агента не обеспечивает дополнительного положительного эффекта, несмотря на увеличение общего объёма пор.

Таким образом, полученные данные демонстрируют прямую связь между текстурными характеристиками АУ и его функциональной способностью удерживать влагу. В частности, сочетание микро- и мезопор в оптимальном образце 1:3 создаёт структурную основу для эффективного замедления испарения и накопления воды, что является критически важным для сельского хозяйства в условиях дефицита водных ресурсов. Результаты подтверждают перспективность использования АУ в качестве влагосберегающего материала и подчеркивают необходимость точного контроля параметров химической активации для достижения требуемых эксплуатационных характеристик. Однако активированный уголь может оказывать

и потенциальное влияние на почвенные экосистемы. Введение АУ в почву изменяет структуру микробных сообществ и их функции, снижая доступность гидрофобных органических загрязнителей для разложения микроорганизмами и растений, что снижает фитотоксичность, но может ограничивать биodeградацию некоторых соединений (Rahi et al., 2012). Кроме того, остатки химических активаторов могут изменять рН почвы и доступность элементов для растений. Таким образом, для безопасного и эффективного использования АУ в сельском хозяйстве необходимы дальнейшие исследования долговременной стабильности, циклов увлажнения–высыхание и влияния на микробиоту и биогеохимию почвы.

4.4. Экологические аспекты и ограничения исследования

Внесение в почву углеродных мелиорантов, характеризующихся развитой пористой структурой и высокой удельной поверхностью, способствует существенному изменению физико-химических условий среды (Rizhiia et al., 2012). Это не только увеличивает адсорбцию влаги, но и улучшает удержание ключевых минеральных элементов, в частности NO_3 (Sviderskii et al., 2025, Fan et al., 2023). Для обоснования преимуществ синтезированного АУ и оценки его экологической значимости в рамках современных агротехнологий необходимо сопоставить его характеристики с широко применяемыми аналогами. В таблице 3 представлен сравнительный анализ функциональных и экологических параметров полученного материала в контексте таких мелиорантов, как традиционный биоуголь, синтетические гидрогели и природные цеолиты

Таблица 3. Сравнительная характеристика влагосберегающих материалов

Критерий	АУ (данная работа)	Биоуголь	Гидрогели	Цеолиты
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	Высокая >2900	Средняя 100–500	-	Средняя 400–800
Удержание NO_3 и влаги	Высокое	Среднее	Очень высокое	Высокое
Долгосрочная стабильность	Высокая (углеродный каркас)	Высокая	Низкая (биodeградация)	Очень высокая (минерал)
Влияние на рН почвы	Риск повышения (остатки КОН)	Слабое повышение	Нейтральное	Нейтральное
Экотоксичность	Низкая (после промывки)	Минимальная	Потенциальный риск (мономер)	Нулевая

В отличие от биоугля активированный уголь обладает в 5–10 раз большей удельной поверхностью (Khan et al., 2024). Это позволяет не только удерживать влагу за счет капиллярной конденсации в мезопорах, но и эффективно адсорбировать питательные вещества, предотвращая их вымывание.

В сравнении с синтетическими гидрогелями, АУ более устойчив к циклам «замораживание–оттаивание» и не теряет структурную целостность в почве. Гидрогели способны поглощать объемы воды, в 500–600 раз превышающие их собственный вес (Kumar et al., 2025). Несмотря на то, что синтезированный АУ уступает гидрогелям по абсолютному объему поглощаемой воды, он обладает преимуществом в виде высокой сорбционной способности к минеральным нутриентам и более высокой структурной стабильности в

почвенном профиле, что делает его перспективной альтернативой полимерным влагоудерживающим агентам.

Природные и синтетические цеолиты также широко применяются в агротехнологиях как структурообразователи почв. Благодаря своей жесткой алюмосиликатной структуре и высокой катионообменной емкости, они эффективно удерживают ионы NH_4^+ и калия K^+ , предотвращая их вымывание из прикорневой зоны. Однако, по сравнению с синтезированным АУ, цеолиты обладают значительно меньшей удельной поверхностью и ограниченным объемом мезопор. В то время как цеолиты работают преимущественно как ионообменники, оптимизированный АУ обеспечивает более эффективное капиллярное удержание влаги за счет развитой пористости и наличия полярных функциональных групп на поверхности (Akhmetzhanova et. al., 2025).

С точки зрения экологической устойчивости, производство АУ из рисовой шелухи соответствует принципам циркулярной экономики, обеспечивая рациональную утилизацию сельскохозяйственных отходов. Применение химической активации КОН требует строгого контроля стадии промывки для исключения негативного влияния на рН почвенного раствора, однако, при соблюдении технологии, полученный пористый каркас становится стабильной средой для развития полезной почвенной микробиоты.

Таким образом, оптимизированный АУ представляет собой экологически безопасную альтернативу полимерным влагоудерживающим агентам, способствуя восстановлению деградированных земель и снижению пестицидной нагрузки за счет высокой адсорбционной способности. Это позволяет рассматривать активированный уголь из рисовой шелухи как более эффективный агент для прямого влагосбережения в сельскохозяйственном секторе.

5. Заключение

В ходе исследования были всесторонне проанализированы текстурные, поверхностные и адсорбционные характеристики АУ, полученного из растительных остатков при различных массовых соотношениях сорбента и КОН. Результаты экспериментов показали, что условия химической активации оказывают существенное влияние на формирование пористой структуры, величину удельной поверхности и распределение функциональных групп на поверхности материала. Оптимальные адсорбционные свойства были достигнуты при соотношении 1:3. Оно обеспечивает удельную поверхность $2900,0 \text{ м}^2/\text{г}$ и стабильное удержание влаги в течение 150 мин при температурах до 50°C .

Образец 1:4 также демонстрировал хорошие показатели удержания влаги, однако скорость испарения была несколько выше. В то же время материалы с меньшими соотношениями сорбента и КОН (1:2 и 1:1) характеризовались более быстрым снижением содержания влаги, что указывает на менее развитую пористую структуру и ограниченную микропористость. Следует отметить, что в рамках данной работы не оценивалась долговременная стабильность влагоудерживающих свойств материала, включая влияние повторяющихся циклов увлажнения–высыхания. Учитывая практическую направленность исследования, анализ устойчивости структуры АУ при длительной эксплуатации представляет собой важное направление дальнейших исследований.

Результаты ИК Фурье-спектроскопии подтвердили наличие функциональных групп О-Н, С=О и С-О, способствующих связыванию воды и накоплению питательных веществ.

Полученные данные подчеркивают, что правильный выбор условий активации и массового соотношения сорбента и КОН позволяет эффективно управлять свойствами АУ в зависимости от задач его практического применения. АУ, синтезированный в оптимальных условиях, может быть использован в качестве влагосберегающего почвенного субстрата, что особенно актуально для регионов с ограниченными водными ресурсами. Кроме того, материал перспективен для создания комплексных удобрений с постепенным высвобождением питательных веществ, применения в гидропонных системах, а также для очистки воды и снижения потерь влаги при хранении и транспортировке сельскохозяйственной продукции.

Возможные направления дальнейших исследований включают оптимизацию параметров активации для других видов биомассы, изучение долговременной стабильности влагоудерживающей способности материалов, а также анализ влияния функциональных групп на взаимодействие АУ с различными типами удобрений и микроэлементов. Дополнительно представляет интерес исследование комбинированного применения АУ с другими влагосберегающими материалами и природными минералами с выраженными сорбционными свойствами (цеолиты, диатомиты и др.), а также оценка его поведения в условиях различных климатических зон.

Таким образом, проведённое исследование демонстрирует высокую практическую значимость АУ как эффективного влагосберегающего материала и создаёт научную основу для его внедрения в современные водосберегающие агротехнологии и дальнейшего развития устойчивого сельского хозяйства в условиях нарастающего дефицита водных ресурсов и климатических изменений.

6. Вспомогательный материал: нет

7. Вклады авторов

Концептуализация – Д.А., Е.Д., О.Д.; методология – Д.А., М.О.; программное обеспечение – Д.А., З.Н.; валидация – О.Д., Е.Д.; формальный анализ – А.Ж., М.О.; исследование – Д.А., Е.Д., О.Д.; ресурсы – Е.Д.; курирование данных – О.Д.; написание и подготовка оригинального черновика – Д.А., А.Ж.; написание, рецензирование и редактирование – Д.А.; визуализация – З.Н.; руководство – Е.Д.; администрирование проекта – О.Д.; получение финансирования – Е.Д. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Досжанов, Ерлан – PhD, доцент, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; заведующий лабораторией Нанобиотехнологий, Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан, 050012; doszhanov_yerlan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3454-8889>

Ахметжанова, Дана – докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; младший научный сотрудник, Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан, 050012; adana128128@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3670-9460>

Жумажанов, Арман – докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; лаборант высшей категории, Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан, 050012; jumajanmarman@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-6256-9814>

Досжанов, Оспан – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Алматинский технологический университет, ул. Толе би, 100, Алматы, Казахстан, 050012; ospan.doszhanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2292-8742>

Нұрбол, Зере – ученица 11-класса, Назарбаев Интеллектуальная школа естественно-математического направления, ул. Елибаева, 2, Алматы, Казахстан, 050006; zere2301nm@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-1481-2733>

Оспан, Мағжан – ученик 10 класса, Жоо High School, ул. Байтерекова, 3, Алматы, Казахстан, 050038; ospanmagzhan9@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0967-655X>

9. Финансирование: данное исследование по получению и изучению свойств активированного угля из растительных остатков выполняется в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № ГФ23489070).

10. Благодарности: нет

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

12. Список литературы

1. Abdolla, N. S., Nysanbaeva, A. S., & Äbdirazaq, A. K. (2024). Changes in air temperature in Kyzylorda region during 1961–2020 (Qyzylorda oblysyndagy aua temperaturasyrynyn 1961–2020 zhyldar aralygynda özgerui in Kazakh). *Hydrometeorology and Ecology (Gidrometeorologiya zhane ekologiya)*, 1(112), 65–76. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-65-78>
2. Abhishek, K., Shrivastava, A., Vimal, V., Gupta, A. K., Bhujbal, S. K., Biswas, J. K., & Kumar, M. (2022). Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: a state-of-the-art review. *Science of the Total Environment*, 853, 158562. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158562>
3. Afshar, M., & Mofatteh, S. (2024). Biochar for a sustainable future: environmentally friendly production and diverse applications. *Results in Engineering*, 23, 102433. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102433>
4. Akhmetzhanova, D., Sabitov, A., Doszhanov, Y., Atamanov, M., Saurykova, K., Zhumazhanov, A., Atamanova, T., Kerimkulova, A., Velasco, L. F., Zhumagalieva, A., Jandosov, J., & Doszhanov, O. (2025). Zeolites and activated carbons in hydroponics: a systematic review of mechanisms, performance metrics, techno-economic analysis and life-cycle assessment. *Sustainability*, 17(24), 10977. <https://doi.org/10.3390/su172410977>
5. Ayaz, M., Feizienė, D., Tilvikienė, V., Akhtar, K., Stulpinaitė, U., & Iqbal, R. (2021). Biochar role in the sustainability of agriculture and environment. *Sustainability*, 13, 1330. <https://doi.org/10.3390/su13031330>
6. Bardestani, R., Patience, G. S., & Kaliaguine, S. (2019). Experimental methods in chemical engineering: specific surface area and pore size distribution measurements - BET, BJH, and DFT. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(11), 2781–2791. <https://doi.org/10.1002/cjce.23632>
7. Barrett, E. P., Joyner, L. G., & Halenda, P. P. (1951). The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *Journal of the American Chemical Society*, 73(1), 373–380. <https://doi.org/10.1021/ja01145a126>
8. Brar, B., Saharan, B. S., Seth, C. S., Kamboj, A., Bala, K., Rajput, V. D., & Duhan, J. S. (2024). Nanobiochar: Soil and plant interactions and their implications for sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 103077. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103077>
9. Chen, L., Chen, Q., Rao, P., Yan, L., Shakib, A., & Shen, G. (2018). Formulating and optimizing a novel biochar-based fertilizer for simultaneous slow-release of nitrogen and immobilization of cadmium. *Sustainability*, 10(8), 2740. <https://doi.org/10.3390/su10082740>
10. Dadhich, A. (2022). Engineered biochar as feed supplement and other husbandry applications. In *Engineered biochar: fundamentals, preparation, characterization and applications* (pp. 319–329). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2488-0_17
11. Doszhanov, E. O., Sabitov, A. N., Mansurov, Z. A., Doszhanov, O. M., Zhandosov, Zh. M., & Rakhymzhan, N. (2023). Method for obtaining sorbent from plant raw materials (Sposob polucheniya sorbenta iz rastitelnogo syr'ya in Russian) [Patent RK No. 8681]. <https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/DownloadFilePdf?patentId=382949&lang=ru>
12. Doszhanov, Y., Atamanov, M., Jandosov, J., Saurykova, K., Bassygarayev, Z., Orazbayev, A., & Sabitov, A. (2024). Preparation of granular organic iodine and selenium complex fertilizer based on biochar for biofortification of parsley. *Scientifica*, 2024, 6601899. <https://doi.org/10.1155/2024/6601899>

13. Feng, W., Wang, T., Yang, F., Cen, R., Liao, H., & Qu, Z. (2023). Effects of biochar on soil evaporation and moisture content and the associated mechanisms. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 66. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00776-7>
14. Hiremath, M. N., Shivayogimath, C. B., & Shivalingappa, S. N. (2012). Preparation and characterization of granular activated carbon from corn cob by KOH activation. *International Journal of Research in Chemistry and Environment*, 2(3), 84–87.
15. Jedynek, K., & Charmas, B. (2024). Adsorption properties of biochars obtained by KOH activation. *Adsorption*, 30(2), 167–183. <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00399-7>
16. Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84–87. <https://doi.org/10.1038/nature16467>
17. Maleki, A., & Bozorg, A. (2023). Algal biochar of unique structure as a robust alternative to manipulate mixed-matrix membranes performance and fouling resistance. *Results in Engineering*, 18, 101043. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101043>
18. McLaren, R. L., Laycock, C. J., Brousseau, E., & Owen, G. R. (2021). Examining slit pore widths within plasma-exfoliated graphitic material utilizing Barrett–Joyner–Halenda analysis. *New Journal of Chemistry*, 45, 12071–12080. <https://doi.org/10.1039/D1NJ01702K>
19. Mopoung, S., Udeye, V., Viruhpintu, S., Yimtragool, N., & Unhong, V. (2020). Water treatment for fish aquaculture system by biochar-supplemented planting panel system. *The Scientific World Journal*, 2020, 7901362. <https://doi.org/10.1155/2020/7901362>
20. Ndede, E. O., Kurebito, S., Idowu, O., Tokunari, T., & Jindo, K. (2022). The potential of biochar to enhance the water retention properties of sandy agricultural soils. *Agronomy*, 12(2), 311. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020311>
21. Sabitov, A., Atamanov, M., Doszhanov, O., Saurykova, K., Tazhu, K., Kerimkulova, A., & Doszhanov, Y. (2024). Surface characteristics of activated carbon sorbents obtained from biomass for cleaning oil-contaminated soils. *Molecules*, 29(16), 3786. <https://doi.org/10.3390/molecules29163786>
22. Sabitov, A. N., Doszhanov, E. O., Turganbai, S., & Nurbolatuly, D. (2024). Method for obtaining granular fertilizer based on biochar (Sposob polucheniya granulirovannogo udobreniya na osnove pirouglya in Russian) [Patent RK No. 8791]. <https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/DownloadFilePdf?patentId=383847&lang=ru>
23. Hagemann, N., Spokas, K., Schmidt, H.-P., Kägi, R., Böhler, M. A., & Bucheli, T. D. (2018). Activated carbon, biochar and charcoal: linkages and synergies across pyrogenic carbon's ABCs. *Water*, 10, 182. <https://doi.org/10.3390/w10020182>
24. Saletnik, B., Zagula, G., Bajcar, M., Tarapatsky, M., Bobula, G., & Puchalski, C. (2019). Biochar as a multifunctional component of the environment. *Applied Sciences*, 9, 1139. <https://doi.org/10.3390/app9061139>
25. Schmidt, H. P., Hagemann, N., Draper, K., & Kammann, C. (2019). The use of biochar in animal feeding. *PeerJ*, 7, e7373. <https://doi.org/10.7717/peerj.7373>
26. Williams, N. E., Oba, O. A., & Aydinlik, N. P. (2022). Modification, production, and methods of KOH-activated carbon. *ChemBioEng Reviews*, 9(2), 164–189. <https://doi.org/10.1002/cben.202100030>
27. Zhumagulov, I. I., & Satbaldieva, Zh. Zh. (2024). Analysis of the influence of meteorological conditions on the productivity of spring wheat in 2023 based on the Tayinsha meteorological station of North Kazakhstan region (Analiz vliyaniya meteorologicheskikh usloviy na produktivnost' yarovoy pshenitsy v 2023 godu na primere meteorologicheskoy stantsii Tayinsha Severo-Kazakhstanskoy oblasti in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Gidrometeorologiya i ekologiya)*, 3(114), 51–58. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-114-3-51-59>
28. Rahi, A. A., Younis, U., Ahmed, N., Ali, M. A., Fahad, Sh., Sultan, H., Zarei, T., Danish, S., Taban, S., Enshasy, H. A. E., Tamunaidu, P., Alotaibi, J. M., Alharbi, S. A., & Datta, R. (2022). Toxicity of cadmium and nickel in the context of applied activated carbon biochar for

- improvement in soil fertility. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29, 2, 743-750. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.09.035>
29. Rizhiya, E. Y., Buchkina, N. P., & Balashov, E. V. (2020). Influence of biochar on the content of mineral nitrogen forms in sod-podzolic loamy sand soil with different degrees of cultivation (Vliyanie biouglya na sodержanie mineral'nyh form azota v dernovo-podzolistoj supeschanoj pochve s raznoj stepen'yu okul'turennosti in Russian). *Soil Science (Pochvovedenie)*, 6, 727–736. <https://doi.org/10.31857/S0002188120060095>
30. Sviderskiy, S. A., Morozova, Ya. V., Grabchak, A. A., Kulikova, M. V., & Maksimov, A. L. (2025). CO₂ hydrogenation reaction on biochar-based catalysts (Reakciya gidrirovaniya CO₂ na katalizatorah na osnove biouglya in Russian). *Petrochemistry (Neftekhimiya)*, 63(2), 239-249. <https://doi.org/10.31857/S0028242123020089>
31. Fan, Y., Su, J., Wang, Z., Liu, S., Li, X., & Hou, C. (2023). Improvement of the specific surface area of biochar by calcium-precipitated nanoparticles synthesized by microbial induction as a template skeleton: Removal mechanism of tetracycline in water. *Journal of Environmental Management*, 348, 119279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119279>
32. Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M. A., Hashem, A., & Abd Allah, E. F. (2024). Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: a review. *Plants*, 13(2), 166. <https://doi.org/10.3390/plants13020166>
33. Kumar, R., Kumar, M., Chand, G. S., Parihar, M. S., Kundu, R., & Khandelwal, A. (2020). Hydrogel and its effect on soil moisture status and plant growth: a review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(3), 1746–1753. https://www.researchgate.net/publication/348927854_Hydrogel_and_its_effect_on_soil_moisture_status_and_plant_growth_A_review

Ауыл шаруашылығында ылғалды сақтауды арттыру мақсатында активтендірілген көмірді биомассадан дайындау мен оңтайландыру

Ерлан Досжанов, Дана Ахметжанова, Арман Жумажанов, Оспан Досжанов, Зере Нұрбол, Мағжан Оспан

Андатпа. Жаһандық климаттың өзгеруі және су ресурстарының шектеулілігі жағдайында ауыл шаруашылығын тұрақты дамыту ылғал ұстағыш қабілеті жоғары инновациялық материалдарды, соның ішінде ауыл шаруашылығы қалдықтары негізіндегі көміртекті субстраттарды енгізуді талап етеді. Бұл жұмыста сорбент пен калий гидроксидінің (КОН) әртүрлі массалық қатынастарында (1:1, 1:2, 1:3 және 1:4) күріш қауызынан синтезделген активтендірілген көмірдің (АК) текстуралық, морфологиялық және адсорбциялық сипаттамаларына кешенді зерттеу жүргізілді. Жұмыстың мақсаты - тиімді ылғал сақтауды қамтамасыз ететін кеуекті құрылымды қалыптастыру үшін химиялық активтендіру жағдайларын оңтайландыру. Әдістеме тығыздық функционал теориясын (DFT) және Барретт–Джойнер–Халенда (ВЖН) әдісін қолдануды қамтыды. Нәтижелер көрсеткендей, кеуектердің максималды жиынтық көлемі (1,6 см³/г) және дамыған меншікті беті (2900 м²/г) 1:3 қатынасында қол жеткізіледі. ИҚ-Фурье спектроскопиясы су молекулаларын байланыстыруда шешуші рөл атқаратын гидрофильді функционалды топтардың (О-Н, С=О, С-О) бар екенін растады. Үш қайталанбалы өлшеммен (n=3) орындалған ылғал ұстау тәжірибелері 1:3 үлгісінің 22°C және 50°C температураларда ылғалды тұрақты сақтайтынын көрсетті. Бұл көрсеткіш активтендіру дәрежесі төмен үлгілер (1:1, 1:2) мен артық активтендірілген үлгілерден (1:4) айтарлықтай жоғары. Салыстырмалы талдау оңтайландырылған АК-ның меншікті беті бойынша дәстүрлі биокөмір мен цеолиттерден басым екенін және топырақтағы көміртекті қаңқаның ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ететінін көрсетті. Алынған

деректер ылғалдың булануын бәсеңдету процестеріндегі микро- және мезокеуектер тепе-теңдігінің шешуші рөлін дәлелдейді және бұл материалдарды құрғақшылық аймақтардағы агроценоздардың өнімділігін арттыру үшін экологиялық қауіпсіз ылғал сақтаушы агенттер ретінде пайдаланудың жоғары перспективасын айқындайды.

Түйін сөздер: белсендірілген көмір; ауыл шаруашылығы қалдықтары; ылғал сақтайтын субстрат; кеуекті құрылым; адсорбциялық қасиеттер.

Development and optimization of biomass-derived activated carbon for enhancing water retention in agriculture

Yerlan Doszhanov, Dana Akhmetzhanova, Arman Zhumazhanov, Ospan Doszhanov, Zere Nurbol, Ospan Magzhan

Abstract. Sustainable agriculture amid climate change and water scarcity necessitates innovative materials with enhanced water-holding capacity, such as biomass-based carbon substrates. This study investigates the textural and adsorption characteristics of activated carbon (AC) synthesized from rice husk using varying mass ratios of sorbent to potassium hydroxide (KOH) (1:1, 1:2, 1:3, and 1:4). The objective was to optimize chemical activation conditions to develop a porous structure for efficient water retention. The methodology employed density functional theory (DFT) and the Barrett–Joyner–Halenda (BJH) method for structural analysis. Results indicated that a 1:3 ratio achieves the maximum total pore volume (1.6 cm³/g) and a high specific surface area (2900 m²/g). Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) confirmed hydrophilic functional groups (O-H, C=O, C-O) essential for moisture binding. Water retention experiments, conducted in triplicate (n=3), demonstrated that the 1:3 sample maintains superior moisture stability at both 22°C and 50°C compared to low-activation (1:1, 1:2) and over-activated (1:4) samples. Comparative analysis reveals that the optimized AC outperforms traditional biochar and zeolites in specific surface area while ensuring the long-term stability of the carbon framework. These findings confirm the critical role of balanced micro- and mesoporosity in slowing water evaporation. The study suggests that such materials are promising, environmentally friendly, moisture-conserving agents for increasing agroecose productivity in arid regions.

Keywords: activated carbon; agricultural waste; moisture-retaining substrate; porous structure; adsorption properties.

Жасыл технологияда фиторемедиацияны қолдану әдістерін зерттеу

Лайла Калимолдина*, Жанат Шаихова, Гулбарам Султангазиева, Гүлжан Жақсыбаева, Шинар Аскарова

Алматы технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан;
kalimoldinal@gmail.com, zh.shaikhova1965@gmail.com, gul-2012-61@mail.ru, zhaksybaeva.gulz@mail.ru, askarova-1977@list.ru
 *Корреспонденция: kalimoldinal@gmail.com

Андатпа. Қоршаған ортаның ластануы жаһандық экологиялық қауіп сипатына ие болды, қазіргі жағдай үкіметтің, ғалымдардың, жұртшылықтың алаңдаушылығын тудырды және экономикалық үрдістер барысында ластаушы заттарға айналған элементтердің табиғаттағы айналымының қарапайым және жеткілікті тиімді технологияларын жасау қажеттілігін туындатты.

Бүгінгі күнге дейін белгілі қоршаған ортаны тазарту тұжырымдамасына ең сәйкес келетін әдіс фиторемедиация болып табылады, оның негізінде өсімдіктердің субстраттан радиоактивті немесе ластаушы элементтерді алудың гипераккумулятивті қабілеті жатыр. Осы ғылыми-зерттеу жұмысы фиторемедиация технологиясының негізгі элементтерін әзірлеуге бағытталған.

Фиторемедиацияға қатысатын процестер табиғи жағдайда жүретіндіктен, ластанған аймақтар адамның араласуынсыз өсімдіктермен өзін-өзі тазартуға бейім және ластану деңгейі төмен аудандарда қолдануға жарамды.

Жұмыстың негізгі мақсаты – ауыр металдармен ластанған топырақтарды фитоиндикациялау және фиторемедиациялау мүмкіндігін зерттеу, сонымен қатар фиторемедиация әдісін қолдана отырып, табиғи экологиялық тазартқыш өсімдіктерді зерттеу.

Зерттеу барысында қазіргі заманғы ғылыми-техникалық, нормативтік, әдістемелік әдебиеттерге аналитикалық шолу жүргізілді, зерттеу бағдарламасы әзірленді, тиісті әдістемелер таңдалды, зертханалық және далалық жағдайларда тәжірибелер жүргізілді. Зертханалық және далалық тәжірибелердің нәтижелері талданды. Бірнеше далалық сынақтар Алматы қаласы және Алматы облысының ауа ортасын тазарту үшін Павловния өсімдігін пайдалану мүмкіндігін растады. Зерттеу нәтижелері тез өсетін Павловния ағашының көмегімен ауыр металдармен (кадмий, қорғасын, мышьяк және сурьма) ластанған жерлерде топырақ қабатын қалпына келтіруге болатынын көрсетеді.

Фиторемедиация әдісінің барлық артықшылықтары мен шектеулері зерттеліп, эксперименталды түрде көрсетілді. Зерттеу нәтижелері ластанған топырақтағы қоршаған ортаға әсерді азайту үшін фиторемедиация әдісінің қолайлылығын анықтайды.

Түйін сөздер: фиторемедиация технологиясы; қоршаған орта; Павловния; ауыр металдар; топырақ.

Дәйексөз: Калимолдина, Л., Шаихова, Ж., Султангазиева, Г., Жақсыбаева, Г., Аскарова, Ш. (2026). Жасыл технологияда фиторемедиацияны қолдану әдістерін зерттеу. Journal of Ecology and Sustainability, 154(1), 93-108. <https://doi.org/10.32523/pz31qd44>

Академиялық редактор:
А. Зандыбай

Редакцияға түсті: 02.12.2025
Түзетілді: 13.03.2026
Қабылданды: 24.03.2026
Басылымға шықты: 31.03.2026



Copyright: © 2026 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

Су және жел эрозиясы процестеріне байланысты қорғасын-мырыш шлактарын сақтау орнына Алматы қаласы мен іргелес аудандарының топырақтарында қорғасын және кадмий иондарының мөлшері шекті рұқсат етілген концентрациядан (ШРК) $453,3 \pm 34,7$ есеге дейін асатыны анықталды. Қазақстанның оңтүстігіндегі құрғақ климат жағдайында ауыр металл иондарының ең көп концентрациясы эфемероидты өсімдіктерінің көптеген түрлері үшін тамыр қабаты болып табылатын топырақтың жоғарғы горизонттарында жинақталатыны анықталды. Топырақтың ауыр металдармен ластану деңгейінің ең фитоиндикативті көрсеткіші өсімдіктер қауымдастығының фитоценодикалық құрамы және топырақтың өсімдіктермен проективті жабыны болып табылады. Топырақтың ауыр металдармен ластануының әртүрлі аймақтарының өсімдіктер қауымдастығы түрлердің саны бойынша да, топтардың фитоценодикалық құрамы бойынша да тең емес, ал уытты градиенттің өсу бағытында көпжылдық өсімдік түрлері басым эрозиофильді және рудералды түрлердің үлесі өсуде. Сонымен қатар, ластанудың өсу градиентінде мезофиттердің үлесінің төмендеуі және өсімдіктердің ксерофиттік экологиялық топтарының көбеюі байқалады. Ластану аймағының тамырлы өсімдіктер қауымдастығының сирек және тұрақты түрлік құрамы механикалық, өсу кедергілеріне және өсімдік ағзасының жасушааралық кеңістіктегі суда ерімейтін тұзды шөгінділер түрінде ауыр металл иондарының артық мөлшерін бейтараптандыру қабілетіне байланысты осы түрлерде белгілі бір тұрақтылық механизмдерінің болуымен негізделгені анықталды.

Топыраққа автомобиль жолдарының, өнеркәсіптік кәсіпорындардың шаңымен, ағынды сулардың жауын-шашынмен, тыңайтқыштармен, ауыр металдардың қосылыстары физика-химиялық және биологиялық факторлардың әсерінен өзгерістерге ұшырайды. Еру жылдамдығы мен дәрежесі қосылыстардың қасиеттеріне де, топырақта жүретін процестерге де байланысты болады. Нәтижесінде топырақ ерітіндісіндегі металдардың мөлшері табиғи топырақ органикалық және минералды компоненттерімен термодинамикалық тепе-теңдікке жақындайды.

Өсімдіктердің химиялық элементтерді сіңіруі бұл әртүрлі түрлердегі жасуша мембраналарының құрылымы мен химиялық құрамына байланысты организм айтарлықтай реттейтін процесс. Пассивті диффузия сіңірілген минералды элементтердің бүкіл массасының тек 2-3% құрайды.

Алайда, өсімдіктің элементтерді сіңіруді реттеуі минералдардың төмен концентрациясы бар тендестірілген ерітінділерден қоректену кезінде ғана орын алады. Концентрацияның жоғарылауымен реттеу процестері негізінен тежеледі, нәтижесінде өсімдік ағзасында элементтердің едәуір жинақталуы жүреді.

Ауыр металдардың аз мөлшері топырақтың буферлік қасиеттеріне байланысты өсімдіктерге жағымсыз әсер етпейді, бұл токсиканттардың инактивациясына әкеледі. Дегенмен, топырақтың қорғаныс мүмкіндіктері шексіз емес. Ластану деңгейі жоғарылаған сайын инактивация толық болмайды және зиянды иондар ағыны тамырларға жинақтала бастайды. Жоғарыда аталған артық ауыр металдан қорғау механизмдерінен басқа, өсімдіктерде жер үсті органдарының биомассасын азайту арқылы ластану жағдайында тамыр жүйесінің қалыптасуы күшейеді. Ластанған топырақтардан тамырлар арқылы өсімдікке ауыр металдардың түсуінен басқа тағы бір жол бар – металдарды газ-шаң шығарындылары мен аэрозольдерден сіңіру. Құрамында металдар бар бөлшектер жауын-шашын мен желмен жойылады. Шоғырланған бөлшектердің белгілі бір бөлігі тіндерге енеді.

Өсімдіктердегі ауыр металдардың тербелістерінің кең ауқымы геохимиялық ауытқулардың болуы, техногендік әсер ету дәрежесі, маусымдық ауытқулар, топырақ қасиеттері, генотиптің бір немесе басқа элементті жинақтау қабілеті сияқты әртүрлі факторлардың әсерінен болады. Дегенмен, ластанбаған аймақтардағы өсімдіктердегі металдардың табиғи деңгейі айтарлықтай тұрақты болып көрінеді және белгілі бір

концентрация аралығында болады. Өсімдік құрамында ауыр металдардың жинақталу процестерін зерттеу, оның элементтік құрамын бағалауға мүмкіндік беретін өзекті ғылыми міндет болып табылады. Өсімдіктердің әртүрлі түрлерінің сезімталдығы және индикаторлық қасиеттері, сондай-ақ өсімдіктердің элементтік құрамына сәйкес қоршаған орта жағдайының өзгеруіне болжам жасау маңызды.

Қазіргі уақытта өсімдіктердің ең жаңа түрлерін – гипераккумуляторларды іздеу, сондай-ақ оларды нақты мәселелерді шешу үшін таңдау жүргізілуде. Фиторемедиация технологиялары қауіпті ластаушы заттармен ластанған ортаны тазарту үшін өсімдіктерді пайдаланады. Бұл процесс топырақ пен судан ауыр металдарды, пестицидтерді және басқа да зиянды заттардан арылтуға тиімді болуы мүмкін. Фиторемедиация қоршаған ортаның ластануымен күресудің экологиялық таза және тұрақты әдісін ұсынады, бірақ жақсы нәтижеге қол жеткізу үшін мұқият жоспарлау мен іске асыруды қажет етеді (Minyuk et al., 2008). Ол «жасыл өсімдіктерді және онымен байланысты микроорганизмдерді пайдалану, сонымен қатар топырақты құнарландыру және қоршаған ортадағы улы заттарды жою немесе залалсыздандыру үшін агрономиялық әдістер» ретінде анықталады (Kireeva et al., 2011). Бұл термин грек тіліндегі phyto (өсімдік) мен латын тіліндегі medicium (тепе-теңдікті қалпына келтіру) сөздерінің қоспасы. Осы технологияны зерттеу және қолдану белсенді дамып келеді. Фиторемедиация технологиясы тиімді болғанымен, ластанған кеңістікті қалпына келтіру дәрежесінің маңыздылығы әдебиеттерде толық көрсетілмеген. Дереккөздерде топырақтағы ауыр металдарға (мырыш, қорғасын, мыс, мышьяк) қатысты сәндік және мәдени өсімдіктердің фиторемедиациялық қабілеті анықталған. Ауыл шаруашылығы мақсатындағы топырақтардағы ауыр металдардың концентрациясын төмендету үшін гипераккумулятор өсімдіктерін пайдалану бойынша ұсыныстар талданған (Demin et al., 2022; Dushenkov et al., 1999; McCutcheon et al., 1995). Қазіргі заманғы мәліметтерге сәйкес, прототиптерден зерттеу үшін алынған барлық элементтердің мазмұны Кларк мәндеріне жақын, бірақ іс жүзінде фоннан аспайды (Kamnev et al., 2000; Tica et al., 2011). Топырақты ластайтын басым химиялық заттар – бензин(а)пирен, күкіртсутек, формальдегид, мырыш, нитраттар, қорғасын, кадмий. Сонымен, бұл әдіс – өсімдіктердің әртүрлі түрлерін қолдана отырып, ақаба суларды, топырақты және атмосфералық ауаны тазарту әдістерінің кешені және ластанған жерлерді тиімді қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Жалпы биоремедиация әдісінің бағыттарының бірі. Фиторемедиация принциптері мыналар: ризофилтрация (өсімдіктердің тамыр жүйесі арқылы тіршілік үшін қажет еріген химиялық элементтері бар суды сіңіруі), фитоэкстракция (ауыр металдармен ластанған топырақты тазарту үшін жоғары биомассалы өсімдіктерді қолданудың ұтымды әдісі), фитоволатилизация (су мен ұшпа химиялық элементтердің (As, Se) өсімдік жапырақтарымен булануы), фитостабилизация (химиялық қосылыстарды аз қозғалмалы түрге және белсенді формаға ауыстыру, бұл ластанудың таралу қаупін азайтады), фитодеградация (өсімдіктердің органикалық бөлігінің метаболикалық процестер кезінде ыдырауы, органикалық заттар тамыр секрецияларының әсерінен ыдырайтын кезде) және фитостимуляция (дезактивация процестеріне қатысатын симбиотикалық микробтарды қолдану).

Бұл процестер ластанған ортаға кешенді түрде әсер етеді (кесте1).

Кесте 1. Табиғи қоршаған ортаны тазартатын өсімдіктер

Өсімдіктер атауы	Жылдық өсімі	3-жылдық ағаштың биіктігі	Үлкен ағаштың максималды биіктігі
Павловния	3-5 м	10,5-15,5м	15-20 м
Гибридті тал	1,5-4 м	7,5-12 м	15-25 м
Қара терек	2,5-3,5м	9-12 м	20-25 м

Дельта тәрізді терек	2,5-3,5м	9-12 м	20-30 м
Техас қызыл емені	2-2,5 м	7.5-9 м	15-20 м
Қызыл эвкалипт	2-2,5	6-9 м	10-15 м
Жылауық тал	1,5-2,5 м	4,5-9 м	15-20 м

Далада топырақтың рН деңгейін реттеуді немесе синтетикалық хелаттарды қолдануды қамтитын индукцияланған гипераккумуляция арқылы қорғасынның сіңуін де, қозғалысын да жақсартуға бағытталған зерттеулер жүргізілді. Жалпы, өсімдікте биомасса неғұрлым көп болса, соғұрлым көп металл жиналуы мүмкін, өйткені металдың сіңуі жалпы биомассаға байланысты (US Environmental Protection Agency, 2004).

"Жасыл өсімдіктерді" қолдана отырып, фиторемедиацияның ластанған ортада тепе-теңдікті қалпына келтірудің артықшылықтары бар. Бұл жаңа, арзан технология және эстетикалық, жасыл өсімдіктердің тіндеріндегі қоршаған ортадан әртүрлі элементтер мен қосылыстарды сіңірудің қабілетін пайдаланады. Фиторемедиация технологиясы ластаушы заттардың кең ауқымына, соның ішінде металдар мен радионуклидтерге, сондай-ақ хлорланған еріткіштер, полициклді ароматты көмірсутектер, пестицидтер, жарылғыш заттар және беттік белсенді заттар сияқты органикалық қосылыстарға қолданылады. Дегенмен, фиторемедиация технологиясы әлі де дамудың бастапқы сатысында және оны толық көлемде қолдану әлі де жеткіліксіз. Барлық жаңа технологиялар сияқты, мұқият әрекет ету маңызды. Табиғи гипераккумуляторлардың барлық түрлері болғандықтан, тиімді фиторемедиаторларды таңдау мақсатында осы технологияны басқа түрлерге енгізу немесе табиғи гипераккумуляторлардың биомассасын арттыру үшін генетикалық модификацияны қолдануға болады. Зиянды табиғи ортада тепе-теңдікті қалпына келтіру үшін фиторемедиацияны қолданудың артықшылықтары шығындардан әлдеқайда көп сияқты. (Clemens et al., 2002). Бұл артықшылықтар қаншалықты кең болса да, биоремедиация үшін өсімдіктерді пайдаланудың ықтимал шығындарын елемеуге болмайды. Фиторемедиацияға қатысты кейбір кемшіліктерге оның өсімдіктердің көптеген түрлерін өсіруді шектейтін климаттық шектеулер, сондай-ақ белгісіз ұзақ мерзімді экологиялық шығындар жатады (United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2004).

Сонымен, бұл технологияның ең үлкен артықшылығы – ол өсімдіктерге тән агрономиялық артықшылықтарды пайдаланады. Бұл артықшылықтарға жоғары биомасса, тығыз тамыр жүйесі жатады, олар экожүйені тұрақтандырады, ластаушы заттардың шайылу арқылы таралуын болдырмайды, қолайсыз қоршаған орта жағдайлары мен тұраралық бәсекелестікке төтеп беру қабілетін қамтамасыз етеді (Macek et al., 2004).

Фиторемедиацияның негізгі қолданылуы аз ластанған топырақтар мен су объектілері үшін қолданылады. Топырақты дезинфекциялауға қабілетті өсімдіктер топырақ бөлшектерінен ластаушы заттарды тамырымен сіңіреді, ластаушы заттарды олардың тамыр тіндерімен физикалық немесе химиялық байланыстырады (Garbisu, 2002).

Фиторемедиаторлардың тағы бір моделі трансгенді ағаштардың әртүрлі сорттарын қамтиды. Ағаштар ауыр металдарды тазарту үшін өте қолайлы, өйткені олардың үлкен биомассасының арқасында олар ластаушы заттардың жоғары концентрациясына төтеп бере алады. Сонымен қатар, олар эрозияны болдырмайды және ластаушы заттардың көпжылдық болуына байланысты таралуын азайтады (E.R.R.L. Johnson et al., 2001). Осы уақытқа дейінгі ғалымдар зерттеулері қалаларды көгалдандыру үшін қолданылатын сәндік өсімдіктердің әртүрлі түрлерінің қорғасынға қатысты жинақтау қабілетінің айырмашылықтарын зерттеді. Бұл түрлер металдардың шайылуы мен оларды азайту үшін фитостабилизациясында да маңызды рөл атқарады. Бұл типтік өсімдіктердің тығыз тамыр жүйесі бар, Pb, Cd, Zn, As, Cu және Ni сияқты ластаушы заттарды фитостабилизациялауда және жоюда тиімді болуы мүмкін (Roongtanakiat et al., 2010). Өсімдіктер ақырында биологиялық ыдырайды және ластаушы заттар қайтадан топырақ жүйесіне енеді (S. Abdulla, 2002). Гидропоникалық сынақтар Pb

жинақтайтын өсімдік түрлерін және төзімділік деңгейлерін анықтау үшін пайдалы болуы мүмкін өсімдіктерде транслокация 30%-дан аз (Wu, Hsu et al., 1999).

2. Материалдар мен әдістер

Фиторемедиация – бұл өсімдіктердің қоршаған ортадағы элементтер мен қосылыстарды жинақтау, сондай-ақ әртүрлі қосылыстардан токсиндерді жою қабілетін пайдаланатын экологиялық қалпына келтірудің тиімді әдісі. Концентрация әсері гипераккумуляторлар деп аталатын белгілі бір өсімдіктердің химиялық заттарды биоаккумуляциялау қабілетінің нәтижесінде пайда болады. Фиторемедиациялық әдіспен ауыр металдарды залалсыздандыру мүмкін болмаса да, органикалық ластаушы заттарды жою әсері басқа әдістерден ерекшеленеді (Bieby Voijant Tangahu et al., 2011; Vassilev, 2002). Фиторемедиация әдістерін қолдана отырып, табиғи органы тазартатын өсімдіктерді зерттеу келесі кезеңдерді қамтиды. Зертханалық зерттеулер үшін 2025 жылдың сәуірінде топырақ үлгілері таңдалды. Топырақ сынамалары қалалық аймақ пен жақын аудандардан алынды. Топырақ сынамаларын алу МЕМСТ 17.4.4.02-2017 сәйкес конверт әдісімен жүргізілді. Зертханалық жағдайда қолданар алдында топырақтарға ауыр металдардың сапалық көрсеткіштері мен иондарының құрамын анықтау мақсатында талдау жасалды. Зерттеу барысында өсімдіктердің кейбіреулері әртүрлі дәрежеде топырақтан ауыр металдарды жинауға қабілетті екендігі анықталды, сондықтан фиторемедиатор функцияларын орындай алады (Kalimoldina et al., 2021; Kalimoldina et al., 2022).

Зерттеу барысында химиялық ластаушы заттарға төзімділікті анықтау үшін Павловнианы таңдадық, химиялық заттармен өңдеу арқылы бақылаулар жүргіздік. Топырақ құрамындағы сульфат иондарын турбидиметриялық әдіспен анықтау бойынша тәжірибелер жүргізілді. Әдістің негізіне сүйене отырып, $T_d = T_c + V / V_k$, осы формула бойынша T_d – сульфат иондарының лайлылығын, T_c - лайлылық дәрежесін, V – сульфат иондарының көлемін анықтадық (Ansona et al., 2019). Топырақ үлгілері зерттелетін нүктелерден алынды, олар 25 см тереңдіктен жиналды. Топырақ үлгілеріндегі ауыр металдар мен микроэлементтердің мөлшері әдіспен бірге анықталды. Талдау топырақтағы ауыр металдарды анықтау бойынша әдістемелік нұсқауларға сәйкес жүргізілді. Топырақ ерітіндісінің лайлану мәні жоғарылаған сайын сульфат концентрациясы төмендейді, лайлану дәрежесі артады. Ерітіндінің лайлануы әртүрлі концентрацияларда өзгереді. Топырақты зерттеуге арналған сынамалар Алматы қаласының қала маңындағы аймағынан алынды. Ол үшін 1 шаршы метр жерге 30-35 см тереңдіктен топырақ алынды. Топырақ беткі, орта және төменгі қабаттардан алынып, толығымен араласады. Көлеңкеде кептіріліп, содан кейін химиялық әдіспен өңделді.

Зертхана жағдайында жұмыс ерітінділерін дайындау үшін келесі реактивтер, қосалқы материалдар мен жабдықтар пайдаланылды:

- мырыш сульфаты 7-су, таза, МЕМСТ 4174-77;
- мыс сульфаты 5-су, таза, МЕМСТ 4185-78;
- сусыз қорғасын азот қышқылы, таза, МЕМСТ 4236-77;
- дистильденген су;
- аналитикалық таразы;
- зертханалық өлшеу ыдысы

Топыраққа енгізу мақсатында тұз ерітінділерін дайындау үшін жұмыс ерітінділерінің концентрациясы есептелді. Жұмыс ерітінділерін дайындауға арналған тұздарды таңдау және еріген заттардың концентрациясы зерттеу міндеттеріне және топырақтағы ауыр металл иондарының шекті рұқсат етілген концентрациясына байланысты болды (Ansona et al, 2017). Зертханалық тәжірибеде топырақтағы ауыр металл катиондарының әртүрлі концентрациясы бар мыс, мырыш және қорғасын нитраты сульфаттарының ерітінділері ластаушы заттар болды: 2 және 10 ШРК (мыс үшін ШРК = 3 мг/кг топырақ, қорғасын үшін ШРК = 32 мг/кг топырақ, мырыш үшін 23 мг/кг топырақ). Топырақтағы химиялық параметрлерді анықтау үшін топырақтан қышқыл ерітіндісі дайындалды. 50 мл топыраққа оның биіктігінің 1/3

бөлігіне стаканға салып, топыраққа азот қышқылының ерітіндісі құйылды (1:3). Стакандағы ерітіндіні резеңке ұшымен 3-5 минут бойы жақсылап араластырып, 50 мл колбаға сүзілді. Осылайша, "Феррум-тест" және "Купрум-тест" тест-жүйелерін қолдана отырып, фильтраттағы ауыр металл иондарын анықтау жүргізілді. Өлшенетін электрод өлшенетін ионның түрі және талданатын ерітіндінің температура диапазонына байланысты таңдалды. Ол үшін құрылғыны NO_3^- иондарының белсенділік бірліктерінде конфигурациялау қажет. Бұл жағдайда өлшеу электроды ретінде ЭМ-02.06.04 немесе соған ұқсас электродты қолдану ұсынылады. Орнату дайындық операцияларынан кейін жүзеге асырылады. Құрылғыны рХ белсенділігін өлшеу режимінде реттеу үшін температурасы бірдей екі бақылау ерітіндісі қолданылады. Бірінші бақылау ерітіндісі ретінде басына жақын, екіншісі өлшеу диапазонының соңына жақын ерітіндіні қолдану керек. Баптауды бақылау "өлшеу" режимінде үшінші бақылау ерітіндісі бойынша жүзеге асырылады. Бақылау ерітінділері өлшенетін ионның түріне байланысты тиісті әдістемелер бойынша дайындалады, мысалы, "Өсімдік шаруашылығы өніміндегі нитраттар мен нитриттерді анықтау бойынша әдістемелік нұсқаулар". Отырғызуға дейін және одан кейін топырақтың қышқылдығын анықтау топырақтың құнарлылығын бағалау әдістемесі бойынша, сондай-ақ топырақтағы фосфор мен калийдің жылжымалы түрлерін анықтау арқылы жүзеге асырылды. Топырақтың қышқылдығы (рН) МЕМСТ 26483-85 сәйкес КСІ сорғышында анықталды. Талдауға дайындық: осы зерттеу үшін топырақ үлгілері ылғалдан толығымен кептіріліп, содан кейін електен өткізілді. Содан кейін калий хлориді (KCl) = 1 моль/дм³ экстракциялық ерітіндісі дайындалды. Калий хлориді (75 г) 1000 см³ өлшеуіш колбада тазартылған сумен ерітілді. Талдау осылайша жүргізілді: салмағы 30 г топырақ сынамалары конус тәрізді колбаларға құйылды. Сынамаларға 75 см³ экстракциялық ерітінді қосылды, содан кейін 50 ерітінді бар топырақ бір минут бойы араластырылды. Қышқылдықты анықтау үшін рН ионометрі қолданылды. Құрылғының электродтары алынған ерітіндіге батырылды және суға батқаннан кейін 1 минуттан кейін қышқылдық туралы мәліметтер алынды. Зерттеу нәтижесінде алынған мәліметтер келтірілген (3-кесте).

Фосфор мен калий МЕМСТ 26204-91 сәйкес анықталды. Дайындық кезеңі: экстракциялық ерітінді дайындалды: сірке қышқылының ерітіндісі $\text{C}(\text{CH}_3\text{COOH}) = 0.5$ моль/дм³. Содан кейін бояу ерітіндісін дайындаймыз: 6 гр $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ 200 см³-те төмен температурада (шамамен 40°C) сұйылтылып, содан кейін 500 см³ күкірт қышқылының ерітіндісіне 5 моль/дм³ концентрациясында құйылады, 1 г аскорбин қышқылы алынған ерітіндінің 180 см³-де ериді, содан кейін тазартылған сумен 1дм³ белгісіне жеткізілді. 2 г калий фосфор қышқылы және 0,5 г калий хлориді экстракциялық ерітіндіде еріген. Талдау кезең-кезеңімен жүргізілді: салмағы 4 г топырақ сынамалары төрт колбаға салынды (әр топырақ үлгісіне 2 колба) және 100 см³ қосылды, араластырылды және қағаз сүзгілері арқылы сүзілді. Сорғыштардың 5 см³ ерітіндісі таңдалды және боялған ерітіндінің 45 см³ реактиві қосылды. Фотометрия 600-750 нм аймағында ең жоғары өткізу қабілеті бар қызыл жарық сүзгісін қолдана отырып, КФК-2 құрылғысына бекітілді.

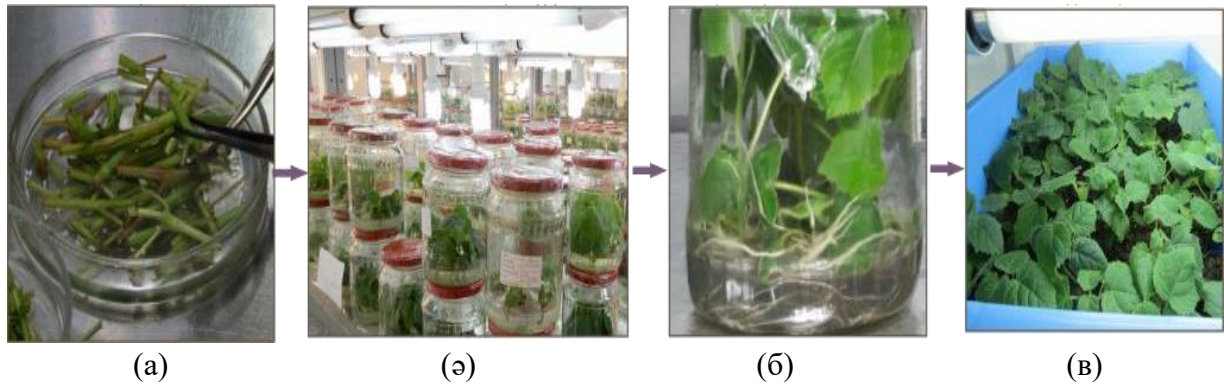
Биомониторинг зерттеудің қажетті элементі болып табылады.

Зерттеу нысаны тез өсетін Павловния ағашы болды. Нысанды таңдау өсімдіктің экологиялық сипаттамаларына негізделген. Зертханалық талдаулар нәтижесінде топырақ үшін қабылданған ШРК нормативтерімен салыстырғанда жауын-шашын кезінде ауыр металдар құрамының артуы байқалады, қышқыл топырақтардың ауданы ұлғаяда, мышьяк, мырыш, кадмий, никель, мыс, қорғасынның жинақталуы анықталған. (Medina et al., 2003; Anil et al., 2003). Сондай-ақ, Павловнияның өсу қарқыны, биомассаның жинақталуы ақаба сулар мен жауын-шашынға негізделген топырақ субстраттарында ауыр металдардың жиналуы бойынша түрлік ерекшелігі анықталды. Бұл нәтижелер техногендік топырақтар үшін өсімдіктерді селекциялық зерттеудің маңыздылығын көрсетеді.

3. Нәтижелер

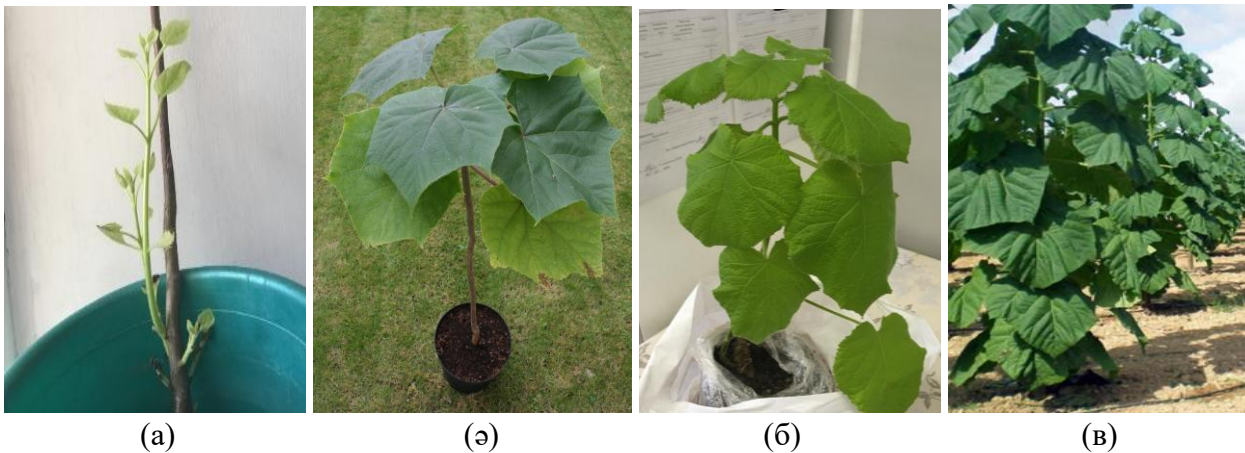
3.1. Фиторемедиация процесіне әртүрлі факторлардың (концентрация, температура, ылғалдылық, жарық, рН) әсерін зерттеу

Бірнеше тәжірибелік өсірілген көшеттер қоршаған ортаны тазарту үшін Павловния өсімдігін қолдану мүмкіндігін растады (сурет 1, 2).



Сурет 1. Павловнияның сулы ортада өсу кезеңдері:

- а) 10 күндік өскіннің үлгісі.
- ә) 15 күндік өскіннің үлгісі.
- б) 20-25 күндік өскіннің үлгісі.
- в) 60 күндік өскіннің үлгісі



Сурет 2. Павловнияның топырақта өсу кезеңдері:

- а) 20 күндік өскіннің үлгісі.
- ә) 40 күндік өскіннің үлгісі.
- б) 50 күндік өскіннің үлгісі.
- в) 90 күндік өскіннің үлгісі.

Алматы аймағында орналасқан ауыл шаруашылығы дақылдарын өсіру учаскесіндегі №1 топырақ сынамасы үшін жүргізілген зерттеулер нәтижесінде өсімдіктер үшін қолайлы деңгейден асатын топырақтың қышқылдығы анықталды және рН мәні 7.6 құрады, бұл өсімдіктердің темірді (Fe) сіңіруіне кедергі келтіретін ортаны білдіреді. Бұл микроэлементтер өсімдіктердің ферментативті жүйелерінің бөлігі болып табылады. Оның маңызды рөлі – тотығу және энергия алмасуын сақтау, сонымен қатар негізгі зат – хлорофиллдің түзілуіне қатысады. Алматы облысының Жетісу ауданындағы алқаптардан алынған №2 топырақ сынамасы қышқылдық деңгейі бойынша өсіруге қолайлы болып шықты және рН 8.0 құрады,

бірақ өсімдіктердің өсуі мен дамуына әсер ететін сілтілі орта да байқалады. Топырақ сынамаларының статистикалық мәліметтері 2-кестеге енгізілді.

Кесте 2. Үлгілердің сипаттамалары

№ үлгі	Тереңдігі, см	Қышқылдық, рН	Гумус, %	СО ₂ , %	Жылжымалы түрлері, мг/кг	
					Р ₂ О ₅	К ₂ О
№1 топырақ сынамасы	0-20	7,6	2,4	5,84	21	310
№2 топырақ сынамасы	0-20	8,0	1,8	2,36	15	313,6

2-кестеде берілген мәліметтерден үлгілердің сипаттамалары бірдей екендігі шығады.

Алынған нәтижелерге сүйене отырып, бірінші үлгінің жоғары сапалы құрамы туралы қорытынды жасауға болады. Химиялық ластаушы заттарды сіңірген кезде, кейде металл топырақтың органикалық заттарымен байланысады, бұл оны алу мүмкін емес өсімдік етеді. Топырақтың сапасы морфологиялық, химиялық және физикалық қасиеттерге байланысты. Олардың негізгілері: гумустың қалыңдығы, қарашіріктің пайызы, топырақтағы физикалық саз, гумустың шикізат қоры, топырақтағы азот, фосфор және калий сияқты элементтер, бөлшектердің мөлшері бойынша таралуы, қышқылдық және т.б.

Кесте 3. Топырақ ортасының өсімдіктердің өсуіне әсері

Топырақтың рН мәні	Өсімдік тіршілігіне әсері
>8,3	Көптеген өсімдіктер үшін тым сілтілі орта
7,5	Темірдің (Fe) болуы анықталды
7,2	6,8 – ден 7,2-ге дейін – дерлік бейтарап
7,0	6,0 – ден 7,5-ке дейін – көптеген өсімдіктер үшін қолайлы
6,8	
6,0	
5,5	Топырақтың микробиалды белсенділігінің төмендеуі
<4,6	Көптеген өсімдіктер үшін тым қышқыл орта

3-кестенің нәтижелері бойынша топырақтың рН 6,0-ден 7,5-ке дейін көптеген өсімдіктер үшін қолайлы, рН 5,5-те топырақтың микробиалды белсенділігі төмендейді. рН>8 сілтілі орта өсімдіктердің өсуінің баяулауына әкеледі. Сонымен, 3-кестеде көрсетілгендей рН 6,0-7,5 сәйкесінше қолайлы орта. Топырақтың қышқылдылық ортасы зертханалық иономер И-160МИ-де анықталды.

3.1.1. Өсімдіктердің ластаушы заттарды сіңіру және түрлендіру механизмдерін талдау

Қазіргі кездегі барлық әдістердің ішінде ауыр металдармен ластанған топырақты фиторемедиациялау технологиялары ең көп зерттелген болып табылады. Өсімдіктер ауыр металдарды сіңіргенде, кейде бұл металдар топырақтағы органикалық заттармен әрекеттеседі. Ауыр металл иондарын бақылау кезінде топырақ пен өсімдіктерді дайындау сәйкес жүргізілді. Қажетті концентрациядағы поллютант тұздарының ерітінділері дайындалды (ауыр металл тұздарының жұмыс ерітінділерін дайындау әдістемелік нұсқаулығы). 20x30x10 см пластикалық контейнерлерге 1 кг топырақ орналастырылды. Тәжірибе схемасына сәйкес топырақты мұқият ылғалдандырғаннан кейін әр контейнерге 50 мл ауыр металл ерітіндісі

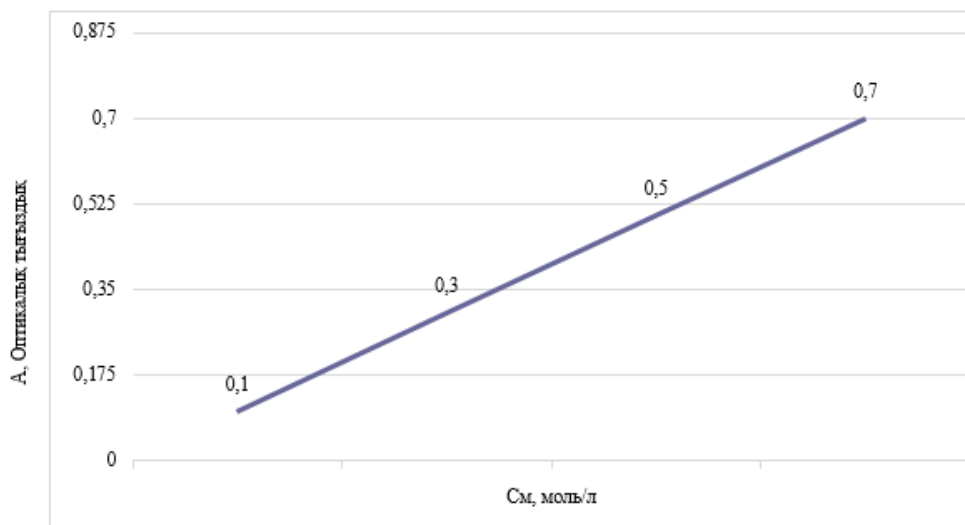
қосылды. Бұл зерттеуде фиторемедиацияның әлеуеті түрдің тазарту ерекшелігіне байланысты болды. Аталған зерттелген өсімдіктің фиторемедиацияға бейімділігі топырақта жинақталған ауыр металдардың болуына байланысты маңызды болды.

Мыстың нанобөлшектері аскорбин қышқылымен тотықсыздандыру арқылы алынды.

Жұмыс барысында аскорбин қышқылының тотықсыздандырғышы мен желатин тұрақтандырғышының қатысуымен сулы ортадағы мыс сульфатының әртүрлі концентрациядағы ерітінділерін қолдана отырып, онтайлы жағдайларды анықтау үшін мыстың бактерияға қарсы белсенділігіне әртүрлі факторлардың (қолданылатын реагенттердің концентрациясы, ортаның рН мәні) әсері зерттелді. Құрамында аскорбин қышқылына негізделген мыс сульфаты бар топырақтың қышқылға төзімділігін жақсарту үшін тұрақтандырылған бөлшектерде (шамамен 0.01 моль/л) концентрациялы ерітінді алудың қарапайым және экологиялық таза әдісі спектрофотометрде зерттелді. Өңделген топырақ үлгілерінің сіңіру спектрлері мыс нанобөлшектерінің беткі плазмондық резонансына сәйкес келетін 0.2-0.9 диапазонына тән мәндерді көрсетті (сурет 3). Максималды оптикалық тығыздық 0.58 ± 0.02 толқын ұзындығында байқалды, бұл 40-60 нм сфералық мыс нанобөлшектерінің әдеби деректеріне сәйкес келеді. Зертханалық сканерлеуші электронды микроскопия құрылымдық сипаттамалардың жақсаруын түсіндіретін мыс нанобөлшектері қосылған топырақ бөлшектерінің тұрақты агрегаттарының түзілуі анықталды.

3.2. Деректерді талдау әдістері (статистикалық өңдеу, графиктер мен диаграммалар)

Бөлшектердің жарықты талғамды сіңіруіне қасиетіне сәйкес оптикалық тығыздығы максималды мәнге ие болатын толқын ұзындығын таңдай отыра, зерттелетін компоненттің концентрациясы есептелді.



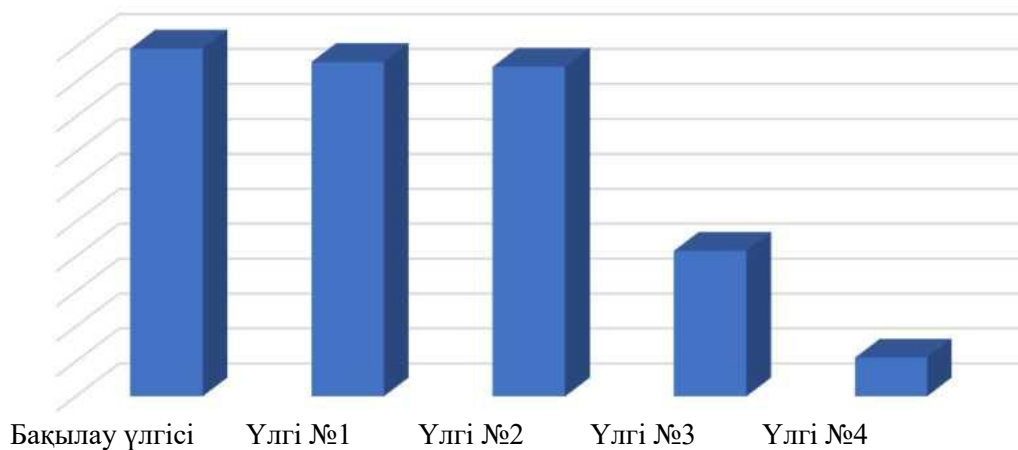
Сурет 3. Мыс сульфатының концентрациясының оптикалық тығыздыққа әсері

Алматы технологиялық университеті «Азық-түлік қауіпсіздігі ФЗИ» топырақ пен өсімдік материалындағы ауыр металдар спектрофотометриялық әдісімен анықталды. Ауыр металдардың жылжымалы формаларын өңдеуден кейін 60 күннен кейін қорғасын мен кадмий иондарының концентрациясының тиісінше 45% және 52% төмендегенін көрсетті (кесте 4).

Кесте 4. Топырақтың құрамындағы ауыр металдардың көрсеткіші

Көрсеткіштер атауы, өлшем бірлігі	Нәтижелері	НҚ
Ауыр металдар: -Pb, мг/кг -Cd, мг/кг	2,0516±0,0052 3,1571±0,045	МЕМСТ Р 53381-2009 МЕМСТ Р 50686-94

Өңделген топырақ учаскелері айқын бактерицидтік қасиеттерге ие. Мыстың нанобөлшектерін қалыптастырудың оңтайлы шарттары және оларды топырақ учаскелеріне қолдану анықталды. Өңделген топыраққа микробқа қарсы қасиеттерді беретіні және оның беріктік сипаттамаларын жақсартатыны анықталды. Мыстың нанобөлшектерінің бактерияға қарсы қасиеттерін анықтау үшін бірқатар зерттеулер жүргізілді. Бұл зерттеу үшін топырақ учаскелері микробқа қарсы қасиеттерді сынау үшін алынған мыс нанобөлшектерінің ерітінділерімен өңделді.



Сурет 4. Мыс нанобөлшектерінің әртүрлі концентрацияларымен өңдеуге дейін және өңдеуден кейін топырақтағы бактериялардың болу көрсеткіштері: №1 - 0,01 г/л, №2 - 0,1 г/л, №3 - 0,3 г/л, №4 - 0,5 г/л

Мыс нанобөлшектерімен өңделген топырақ үлгілерінің бактерияға қарсы қасиеттерін зерттеу үшін бактериялары бар үлгілер Петри табақшасына орналастырылды және бактериялардың азаю аймағы анықталды. Мыстың нанобөлшектерінің бактерияға қарсы қасиеттерін анықтау үшін де микробиологиялық зерттеулер жүргізілді.

Нәтижелер стандартты микроскопия мыс нанобөлшектерімен өңделген бақылау үлгісінде микробтарды анықтамағанын, ал өңделмеген үлгідегі бактериялар саны рұқсат етілген шектен асып кеткенін көрсетті (сурет 4). Бұл жағдайда мыстың биожетімділігінің артуы байқалмады, бұл қолданылатын әдістің экологиялық қауіпсіздігін көрсетеді.

Кесте 5. CuSO₄ ерітіндісінің концентрациясынан оптикалық тығыздықтың өзгеруі

C _{CuSO₄} , моль/л	0,1	0,15	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
AU	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Кестелік мәліметтерден мыс сульфатының концентрациясының жоғарылауына байланысты үлгінің оптикалық тығыздығы артатыны көрінеді (кесте 5).

Кесте 6. Бастапқы заттардың концентрациясы

№	Заттың бастапқы концентрациясы, моль/л		
	Желатин	CuSO ₄	C ₆ H ₈ O ₆
1	0,05	0,1	0,05
2	0,1	0,15	0,1
3	0,2	0,3	0,3
4	0,05	0,4	0,1
5	0,1	0,5	0,1
6	0,2	0,6	0,1
7	0,3	0,7	0,2

6-кестеден көрініп тұрғандай, өсімдіктің өсуінің оңтайлы шарты – шамамен 0,3 моль/л ерітіндінің концентрациясы.

4. Талдау

Зерттеу нәтижелері бойынша топырақ үлгілеріндегі ауыр металдардан фиторемедиация әдісін қолдана отырып, топырақ үлгілерінің сапалық көрсеткіштері және Павловния сорбциялық қасиеттері анықталды. Химиялық ластаушы заттардың ластануы әсіресе автомобиль жолының жанында жиі байқалады, бұл осы жұмыстың нәтижесі. Осылайша, Алматы облысында топыраққа экологиялық рұқсат етілген әсер ету деңгейінің артуы байқалады және оның сарқылуы мен ластануының нақты қаупі бар. Автотранспорт шығарындыларынан бөлінетін ауыр металдармен жер учаскелерінің ластануының ұлғаю үрдісі белгіленді, Алматы қаласы жағдайында осы көрсеткіштер бойынша топырақ мониторингі қажет. Жоғарыда айтылғандардан ластаушы заттардың, әсіресе металдардың өсімдіктердегі биоаккумуляциясы тұрақтандырғыштарға әсер етуі мүмкін және зардап шеккен өсімдік материалын тазартқыш заттармен өңдеуді қажет етеді.

5. Қорытынды

Қазіргі уақытта антропогендік жүктеменің артуы нәтижесінде қоршаған ортаның ластану мәселелерін шешуге байланысты перспективалы бағыттардың бірі өсімдіктердің қоршаған ортадан (ауа, су немесе топырақ) зиянды заттарды сіңіру және оларды тіндерінде жинақтау немесе метаболиттерге айналатын физиологиялық процестер кезінде бейтараптандыру қабілетіне негізделген фиторемедиация болып табылады. Фиторемедиациялық потенциал зерттеу барысында анықталды, топырақтағы тәжірибе нұсқалары бойынша мышьяк пен қорғасынның жалпы құрамындағы елеулі өзгерістер болған жоқ, дегенмен соңғы кезеңде (тамызда) өсімдік материалында мышьяқтың жоғары мөлшері анықталды.

Осылайша, фиторемедиация әдісінің барлық артықшылықтары мен шектеулері зерттеліп, эксперименталды түрде көрсетілді. Нәтижелер топырақтың экологиялық қауіпсіздігі мен құнарлылығын қамтамасыз ететін Павловния өсімдігін табиғи фиторемедиант ретінде дәлелдейді. Табиғи ортадан поллютанттарды жою үшін фиторемедиация әдісі қолайлы ортаны қалпына келтірудің қолданыстағы әдістеріне балама болып табылады.

Зерттеу жұмысының нәтижесінде келесі мақсаттарға қол жеткізілді:

-табиғатты ұтымды пайдаланудағы фиторемедиация технологиясы бойынша Павловния өсімдігін зерттеу және анықтау;

- Павловния фиторемедианттарының қоршаған ортаның сапалық көрсеткіштеріне әсерін зерттеу.

Осылайша, табиғи тазартқыштардың әртүрлі концентрациядағы химиялық реагенттерді сіңіру қасиеттері, сондай-ақ химиялық ластану кезіндегі топырақ параметрлерінің қоршаған ортаға әсері бар екендігі анықталды.

Аскорбин қышқылын тотықсыздандыру арқылы тұрақтандырылған 0.01 моль/л концентрациясында мыс нанобөлшектерін қолдану анықталды:

1. Патогендік микрофлораға қарсы айқын бактерицидтік қасиеттерді қамтамасыз етеді
2. Топырақтың физика-механикалық өнімділігін жақсартады
3. Пайдалы микроорганизмдерге теріс әсер етпейді
4. Ауыр металдардың иммобилизациясына ықпал етеді

Зерттеу нәтижелері бойынша физика-химиялық талдау әдістері қолданылды. Нәтижелер наноматериалдарды пайдалана отырып, ластанған топырақты ремедиациялаудың кешенді технологияларын құруға перспективалар ашады.

Бұл жұмыста Павловния өсімдігінің Алматы қаласының тау бөктеріндегі аймағының топырақ-климаттық жағдайларында өзінің физикалық қасиеттері мен әлеуетті құнарлылық деңгейі бойынша фиторемедиация жағдайларын толығымен қанағаттандыратыны көрсетілген.

6. Қосымша материалдар: қосымша материал жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация - Л.К.; әдістеме - Ж.Ш.; бағдарламалық қамтамасыз ету - Г.Ж.; validation - Г.С.; формальды талдау - Ш.А., Г.Ж.; тергеу - Г.С.; ресурстар - Г.С., Ж.Ш.; деректер кураторы - Г.С., Ш.А.; жазу - түпнұсқа жоба - Л.К.; жазу - рецензиялау және редакциялау - Ж.Ш., Г.Ж.; визуализация - Ш.А., Г.Ж.; қадағалау - Л.К.; жобаны басқару - Л.К.; әдістеме - Ж.Ш.; бағдарламалық қамтамасыз ету - Л.К.; қаржыландыруды сатып алу қарастырылмаған.

8. Автор туралы ақпарат

Қалимолдина, Лайла - техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Алматы технологиялық университеті, Төле би 100, Алматы, Қазақстан, 050012; Kalimoldinal@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4397-9629>

Шаихова, Жанат - техника ғылымдарының магистрі, Алматы технологиялық университеті, Төлеби 100, Алматы, Төле би 100, Қазақстан, 050012; zh.shaikhova1965@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5909-4182>

Султангазиева, Гулбарам - ауылшаруашылығы ғылымдарының магистрі, Алматы технологиялық университеті, Төле би 100, Алматы, Қазақстан, 050012; gul-2012-61@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7724-9558>

Жақсыбаева, Гүлжан - PhD, Алматы технологиялық университеті, Төле би 100, Алматы, Қазақстан, 050012; zhaksybaeva.gulz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6516-7325>

Аскарова, Шинар - ауылшаруашылығы ғылымдарының кандидаты, Алматы технологиялық университеті, Төле би 100, Алматы, Қазақстан, 050012; askarova-1977@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9260-7616>

9. Қаржыландыру: бұл зерттеу сыртқы қаржыландыруды алған жоқ.

10. Алғыстар: Алматы технологиялық университетінің «Азық-түлік қауіпсіздігі ҒЗИ» қызметкерлеріне топырақ пен өсімдік материалындағы ауыр металдарды спектрофотометриялық әдісімен анықтағаны үшін алғыс айтамыз.

11. Мүдделер қақтығыстары: авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Anil, K., Gupta, Mohammad, Yunus and Pramod, Pandey, K. (2003). Bioremediation: Ecotechnology for the Present Centur. *EnviroNews*, 9(2). https://isebindia.com/01_04/03-04-2.html
2. Ancona, V., Barra, C. A., Campanale, C., De Caprariis, B., Grenni, P., Uricchio, V. F., & Borello, D. (2019). Gasification of poplar biomass produced in a contaminated area using bioremediation. *Journal of Environmental Management*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.067>
3. Ancona, V., Barra, C., Grenni, P., Di, L., Campanale, C., Calabrese, A., Uricchio, V. F., Mascolo, G., & Massacci, A. (2017). Plant-based bioremediation of an area historically contaminated with PCBs and heavy metals in Southern Italy. *New biotechnology*, 38 (Pt B), 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.09.006>
4. Bieby, V., Tangahu, S., Rozaimah, A., Hassan, B., Mushrifah, I., Nurina, A., & Muhammad, M. (2011). A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, 1687-806X. <https://doi.org/10.1155/2011/939161>
5. Clemens, S., Palmgren, M. G. & Kramer, U. (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*, 7(7), 309-314. [doi:10.1016/S1360-1385\(02\)02295-1](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02295-1)
6. Demin, A. V., Rybalchenko, I. V., Milkina, I. V., & Zhandarova, Yu. A. (2022). Technologies of sustainable development of territories: phytoremediation as an innovative method of rehabilitation of depressed territories (Tekhnologii ustoychivogo razvitiya territoriy: fitoremediatsiya kak innovatsionnyy metod reabilitatsii depressivnykh territoriy in Russian). *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: State and Municipal Administration (Byulleten' Universiteta Druzhby Narodov Rossii. Seriya: Gosudarstvennoe i Munitsipal'noe Upravlenie)*, 9(2). 124-136. <https://doi.org/10.22363/2312-8313-2022-9-2-24-136>
7. Dushenkov, V. (1999). Phytoremediation: the green revolution in ecology (Fitoremediatsiya: zelyonaya revolyutsiya v ekologii in Russian). *Chemistry and Life of the 21st century (Chimiya i Zhizn' 21 veka in Russian)*, 11-12, 48-49. <https://djuv.online/file/kex7oRV7pfh3G>
8. Garbisu, C. (2002). Phytoremediation: a technology using green plants to remove contaminants from polluted areas. *Reviews on Environmental Health*, 17(3), 173-188. <https://doi.org/10.1515/REVEH.2002.17.3.173>
9. Johnson, E. R. R. L. & Shilling, D. G. “Cogon Grass. Plant Conservation Kirchner, A. (2002). Mine-land restoration: phytoremediation of heavy-metal contaminated sites - a critical view”. *International Ecological Engineering Society*. http://www.iees.ch/EcoEng011/EcoEng011_R2.html
10. Kireeva, N. A., Grigoriadi, A. S., & Bagautdinov, F. Ya. (2011). Phytoremediation as a method of purification of soils contaminated with heavy metals (Fitoremediatsiya kak metod ochistki pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami in Russian). *Theoretical and Applied Ecology (Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya)*, 3, 4-16. <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=oofkoh>
11. Kamnev, A. A., & Van der Lelie, D. (2000). Chemical and biological parameters as tools to evaluate and improve heavy metal phytoremediation (Khimicheskie i biologicheskie parametry kak instrumenty dlya otsenki i uluchsheniya fitoremediatsii tyazhelykh metallov in Russian). *Bioscience Reports (Bionauchnye doklady)*, 20, 239-258. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1026436806319>
12. Kalimoldina, L. M., Sergibaeva, I. M. (2021). Phytoremediation as a biological method of reducing the harmful effects of motor transport on the environment (Fitoremediatsiya kak biologicheskiy metod snizheniya vrednogo vozdeystviya avtomobilnogo transporta na okruzhayushchuyu sredu in Russian). *International Turkish World Engineering and Science*

- Congress Bildiriler Kitabı Proceedings Book*. APA, 2021, 645-646. <https://teskongre.org/fm2021eng/kongre-programi/>
13. Kalimoldina, L. M., Sultangazieva, G. S., & Suleimenova, M. Sh. (2022). Contamination of soils with heavy metal in the urban area of Almaty. *Soil Science and Agrochemistry*, 3, 38-45. https://doi.org/10.51886/1999-40X_2022_3_38
 14. Medina, V. F., Marmiroli, M., Dietz, A. C., & Cutcheon, S. C. (2003). Plant tolerances to contaminants. *Phytoremediation: transformation and control of contaminants*. New York: JohnWiley, 189–32. https://www.researchgate.net/publication/229721192_PlantTolerances_toContaminants
 15. Macek, T., Francova, K., Kochankova, L., Lovecka, P., Ryslava, E., Rezek, J., Sura, M., Triska, J., Demnerova, K., & Mackova, M. (2004). Phytoremediation: biological cleaning of a polluted environment. *Reviews on Environmental. Ealth*, 19(1), 63-82. <https://doi.org/10.1515/reveh.2004.19.1.63>
 16. Minyuk, Z. P., & Sharovarov, G. A. (2008). Modern methods of cleaning polluted territories (Modern metody ochistki zagryaznennykh territoriy in Russian). *Bulletin of MDU named after A.A. Kulyashova (Vesnik MDU named after A.A. Kulyashova)*, 2-3(30), 173-178. <http://libr.msu.by/handle/123456789/14074>
 17. McCutcheon, S., Wolfe, N. L., Carreria, L., & Ou, T. (1995). Phytoremediation of hazardous wastes//Innovative technologies for site remediation and hazardous waste management. *Proceedings of the National Conference.Pittsburgh, Pennsylvania*, 597-604. https://www.researchgate.net/publication/255264707_Phytoremediation_of_hazardous_wases_Technical_report_23--26_July_1995
 18. Roongtanakiat, N. & Chairaj, P. (2010). Vetiver grass for remedying soil contaminated with heavy metals. http://www.google.com/Roongtanakiat+N+and+Chairaj+R=2001&meta=&aq=o&aqi=&aql=&oq=&gs_rfai=&fp=da1b4ba80a870679
 19. Mohammad, I. L., Zhen-li, H., Peter, J. S., & Xiao-e, Y. (2008). Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: progresses and perspectives. *J Zhejiang Univ Sci B*, 9(3), 210-220. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710633>
 20. Tica, D., Udovic, M., & Lestan, D. (2011). Immobilization of potentially toxic metals using different soil amendments. *Chemosphere*, 85, 577-583. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.085>
 21. US Environmental Protection Agency (2004). Lead-how lead affects the way we live and breath. office of air quality planning and standards. <http://www.epa.gov/air/urbanair/lead/index.html>
 22. United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2004). Hazard Summary. Lead Compounds. <http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/lead.html>
 23. Vassilev, A. (2002). Metal phytoextraction: state of art and perspectives (Metal fitoekstraktsiya: sostoyanie iskusstva i perspektivy in Russian). *Bulgarian J. of Agr. Sci*, 8, 125–140. <https://agrojournal.org/08/859.htm>
 24. Wu, J., Hsu, F. C. & Cunningham, S. D. (1999). Chelate-assisted pb phytoextraction: pb availability, uptake, and translocation constraints. *Environmental Science and Technology*, 33(11), 1898-1904. [doi:10.1021/es9809253](https://doi.org/10.1021/es9809253)

Study of phytoremediation application methods in green technology

Laila Kalimoldina, Zhanat Shaikhova, Gulbaram Sultangazieva, Gulzhan Zhaksybayeva, Shinar Askarova

Abstract. Environmental pollution was a global environmental hazard, and the current situation was of concern to the Government, scientists, and the public, necessitating the development of simple and

sufficiently effective technologies for the circulation of elements in nature that were converted into pollutants during economic processes.

The most suitable method for the currently known concept of environmental purification is phytoremediation, which is based on the hyperaccumulative ability of plants to extract radioactive or polluting elements from the substrate.

This research work is aimed at developing the basic elements of phytoremediation technology.

Since the processes involved in phytoremediation occur naturally, polluted areas are usually self-cleaned by plants without human intervention and are suitable for use in areas with low levels of pollution.

The purpose of the work is to study natural, environmentally friendly plants using the phytoremediation method. In the course of the research, an analytical review of modern scientific, technical, regulatory, and methodological literature was conducted, a research program was developed, appropriate methods were selected, and experiments were conducted in the laboratory and in the field. The results of laboratory and field experiments are analyzed.

Several field tests have confirmed the possibility of using Paulownia plants to purify the air environment of Almaty and the Almaty region. The results of the study show that the soil layer can be restored in areas contaminated with heavy metals (cadmium, lead, arsenic, and antimony) using a fast-growing Paulownia tree. All the advantages and limitations of the phytoremediation method have been investigated and experimentally demonstrated. The results of the study determine the acceptability of the phytoremediation method to reduce environmental impact in polluted soil.

Keywords: phytoremediation technology; Paulownia; environment; heavy metals; soil.

Изучение методов применения фиторемедиации в зеленой технологии

Лайла Калимолдина, Жанат Шаихова, Гулбарам Султангазиева, Гулжан Жақсыбаева, Шинар Аскарова

Аннотация. Загрязнение окружающей среды носит характер глобальной экологической опасности, нынешняя ситуация вызывает беспокойство у правительства, ученых, общественности и вызывает необходимость разработки простых и достаточно эффективных технологий круговорота в природе элементов, превращенных в загрязняющие вещества в ходе экономических процессов.

Наиболее подходящим методом для известной на сегодняшний день концепции очистки окружающей среды является фиторемедиация, в основе которой лежит гипераккумулятивная способность растений извлекать радиоактивные или загрязняющие элементы из субстрата.

Данная научно-исследовательская работа направлена на разработку основных элементов технологии фиторемедиации. Поскольку процессы, участвующие в фиторемедиации, происходят в естественных условиях, загрязненные районы, как правило, самоочищаются растениями без вмешательства человека и подходят для использования в районах с низким уровнем загрязнения.

Цель работы – изучение натуральных экологически чистых растений с использованием метода фиторемедиации. В ходе исследования был проведен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, разработана программа исследования, подобраны соответствующие методики и проведены опыты в лабораторных и полевых условиях. Проанализированы результаты лабораторных и полевых экспериментов. Несколько полевых испытаний подтвердили возможность использования растения Павлония для очистки воздушной среды города Алматы и Алматинской области. Результаты исследования показывают, что слой почвы может быть восстановлен на участках, загрязненных тяжелыми металлами (кадмием, свинцом, мышьяком и сурьмой), с помощью

быстрорастущего дерева Павловнии. Были исследованы и экспериментально продемонстрированы все преимущества и ограничения метода фиторемедиации. Результаты исследования определяют приемлемость метода фиторемедиации для снижения воздействия на окружающую среду в загрязненной почве.

Ключевые слова: технология фиторемедиации; окружающая среда; Павловния; тяжелые металлы; почва.

Justification for the necessity of regional environmental quality standards for water bodies: the Ilek River basin, Kazakhstan

Bauyrzhan Kapsalyamov, Gulzat Zholmuratova*

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;
kapsalyamov_ba@enu.kz, zholmuratova.enu@mail.ru

*Correspondence: zholmuratova.enu@mail.ru

Abstract. In arid and semi-arid regions, unified national water quality standards do not always ensure effective regulation of anthropogenic pressure on surface waters and may lead to inconsistencies in permissible discharge standards (PDS) calculations. This study substantiates the need for regional environmental quality standards using the Ilek River basin, one of the most impacted transboundary systems in Western Kazakhstan, as a case study.

The research applies a mass-balance approach to PDS calculation and evaluates the influence of background pollutant concentrations and hydrological variability on regulatory outcomes. Boron and hexavalent chromium (Cr(VI)), typical for the natural and technogenic conditions of the basin, were selected as key indicator substances. Long-term hydrochemical and hydrological data were analyzed to assess spatial and temporal variability under different discharge scenarios.

The results show that elevated background concentrations, especially of boron, significantly affect calculated PDS values. Under such conditions, unified standards may produce negative PDS values, formally indicating the impossibility of discharge regulation regardless of actual anthropogenic input. This reveals the limitations of uniform regulatory approaches in hydrologically variable and environmentally heterogeneous regions.

The findings demonstrate that regionalized environmental quality standards, accounting for climatic conditions, background levels, hydrological regime, and ecosystem stability, are essential for scientifically sound discharge regulation and sustainable water resource management.

The practical significance of the study lies in the applicability of the proposed approach for improving environmental regulation and water management practices.

Keywords: environmental quality standards; regionalization; permissible discharge standards; boron; hexavalent chromium (Cr(VI)); arid regions; Ilek River.

Citation: Kapsalyamov, B., Zholmuratova, G. (2026). Justification for the necessity of regional environmental quality standards for water bodies: the Ilek River basin, Kazakhstan. *Journal of Ecology and Sustainability*, 154(1), 109-122. <https://doi.org/10.32523/vry54642>

Academic Editor:
A. Zandybay

Received: 06.02.2026
 Revised: 13.03.2026
 Accepted: 24.03.2026
 Published: 31.03.2026



Copyright: © 2026 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

Environmental regulation of water bodies in the Republic of Kazakhstan has historically been based on the application of unified maximum permissible concentrations (MPCs) of pollutants, developed primarily within a sanitary–hygienic framework. These standards are

aimed at protecting human health and, as a rule, do not take into account regional natural and climatic conditions, hydrological variability, or the geochemical characteristics of river basins, which are especially pronounced in arid and semi-arid regions of Central Asia (Chapman, 1996; Vörösmarty et al., 2010).

In practical water protection management, MPC values are used as the basic criterion for calculating permissible discharge standards (PDS), which represent one of the key instruments for regulating anthropogenic pressure on water bodies. According to the current methodology, PDS is defined as the maximum allowable mass of a pollutant that may enter a water body without violating established water quality standards at the downstream control section (United Nations Economic Commission for Europe, 2019; World Health Organization, 2017). In simplified form, the PDS calculation can be expressed as:

$$PDS = (C_{perm} - C_{bg}) \cdot Q \cdot K \quad (1)$$

C_{perm} - is the permissible concentration of a pollutant in the water body (water quality standard),

C_{bg} - is the background concentration upstream,

Q - is the river discharge at the control section,

K - is the dilution and transformation coefficient.

The key parameter in this equation is C_{perm} , since its value directly determines the possibility or impossibility of regulated wastewater discharge.

In the baseline approximation, $K = 1$ was assumed.

1.1. Problems associated with the use of unified MPCs in PDS calculations

In the river basins of Kazakhstan, situations frequently occur in which background concentrations of certain pollutants exceed established MPC values. This is particularly typical for substances with a pronounced natural or natural–technogenic origin, such as boron, sulfates, chlorides, and, in some areas, chromium compounds (United Nations Environment Programme, 2019; World Bank, 2021; Asian Development Bank, 2020). In such cases, the following condition is observed: $C_{bg} \geq C_{perm}$

which results in zero or negative PDS values: $PDS \leq 0$

From a management perspective, this outcome implies a formal prohibition of discharge regardless of the actual presence or absence of an anthropogenic pollution source. As a result, the PDS mechanism loses its primary function - regulation of incremental anthropogenic load - and is transformed into an instrument of formal non-compliance.

Figure 1 illustrates the formation of a “management deadlock” in PDS calculations:

When the condition $C_{bg} \geq C_{perm}$ is fulfilled, PDS calculations yield negative values, making normative regulation of anthropogenic pressure on the water body practically impossible.

$MPC < \text{background concentration} \rightarrow \text{negative PDS} \rightarrow \text{impossibility of regulatory control}$

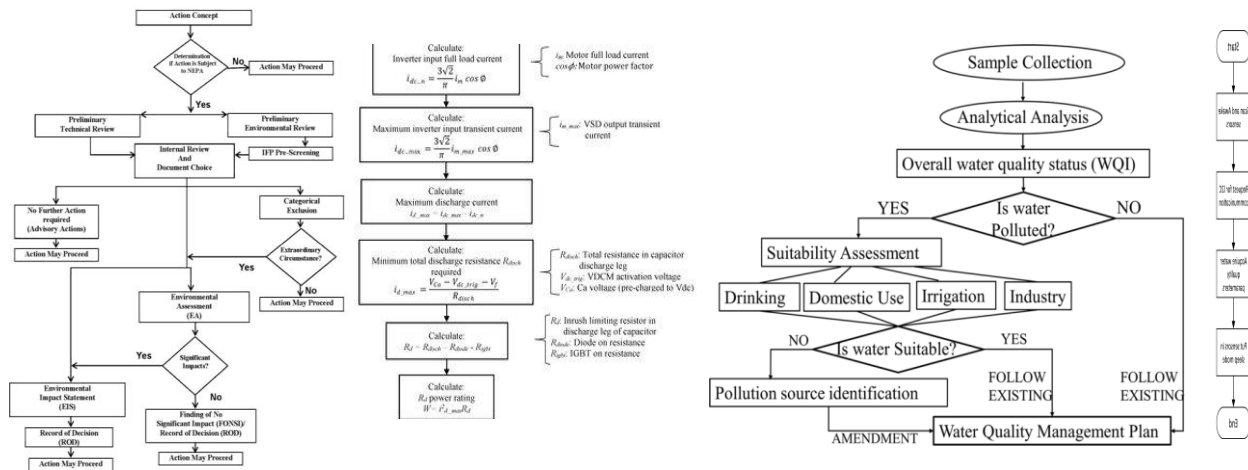


Figure 1. Conceptual scheme of interactions between hydrological regime, water quality, and discharge regulation (Source: authors' own elaboration)

1.2. Arid conditions as a factor of systematic errors in water quality regulation

A significant part of the territory of Kazakhstan is characterized by:

- high evaporation rates,
- prolonged low-flow periods,
- concentration of dissolved substances,
- a substantial contribution of groundwater inflow and saline geological formations (Falkenmark and Rockström, 2004; Vörösmarty et al., 2010; World Bank, 2021).

Under such conditions, unified MPC values that are not adjusted to regional background levels cease to reflect actual ecological risks. This problem is especially evident in the Ilek River basin - a transboundary water body subjected to long-term technogenic impact and characterized by complex natural and geochemical conditions (Berdenov et al., 2022; Utepov et al., 2021; Dyussebayeva et al., 2023; Solodova et al., 2021; RSE Kazhydromet, 2024).

A comparison of unified water quality standards and background concentrations for priority pollutants (boron, Cr(VI), mineralization, sulfates, and chlorides) in the Ilek River basin is presented in Table 1.

Table 1. Comparison of unified water quality standards and background concentrations in the Ilek River basin

Parameter	Range of background concentrations, (C _{bg}), mg/L	Unified water quality standard (MPC), mg/L	Relationship between C _{bg} and MPC	Environmental and management interpretation
Boron (B)	0.6 – 1.2	0.5	$C_{bg} \geq MPC$	Background concentrations frequently exceed the MPC, resulting in negative PDS values and a formal prohibition of discharges

Hexavalent chromium (Cr(VI))	0.0005 – 0.003	0.01	Cbg < MPC	PDS can be formally calculated; however, migration forms and redox transformation Cr(VI) → Cr(III) are not considered
Total mineralization (total dissolved solids)	800 – 1500	1000	Cbg ≈ MPC	High natural mineralization of arid rivers leads to recurrent borderline exceedances
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	250 – 600	500	Cbg ≤/≥MPC	Pronounced seasonal variability; concentrations increase during low-flow periods

Note. The ranges of background concentrations presented in the table are based on published hydrochemical monitoring data for the Ilek River basin and adjacent arid territories of Western Kazakhstan. Unified water quality standards (MPCs) are given in accordance with the currently applicable sanitary–hygienic and water protection regulations of the Republic of Kazakhstan. The relationship between background concentrations Cbg and MPC values determines the sign and magnitude of the concentration difference $\Delta C = C_{perm} - C_{bg}$, which is used in the calculation of permissible discharge standards (PDS).

1.3. Inconsistency of the sanitary-based approach with ecosystem requirements

International practice in environmental regulation over recent decades demonstrates a gradual transition from the sanitary–hygienic concept toward ecosystem-based and risk-oriented approaches. Within this framework, Environmental Quality Standards (EQS):

- are established with consideration of the sensitivity of aquatic organisms;
- are adapted to regional environmental conditions;

are used as target indicators of ecosystem status (European Commission, 2000; European Environment Agency, 2018; U.S. Environmental Protection Agency, 2016; United Nations Environment Programme, 2018; Hering et al., 2010).

In contrast, the application of unified maximum permissible concentrations (MPCs) without regional adaptation within the permissible discharge standards (PDS) system:

- distorts the assessment of anthropogenic contributions;
- complicates the implementation of environmental protection measures;
- creates conflicts between regulatory authorities and water users;
- reduces confidence in environmental monitoring results.

A comparison of water quality regulation concepts - MPCs (sanitary-based approach) versus EQS (ecosystem-based approach) - is presented in Table 2.

Table 2. Comparison of the sanitary–hygienic water quality regulation concept (MPC) and the ecosystem-based approach using Environmental Quality Standards (EQS)

MPC (sanitary-based approach)	EQS (ecosystem-based approach)
Objective: Protection of human health	Objective: Conservation of aquatic ecosystems
Regulatory object: Water as a resource	Regulatory object: Aquatic ecosystem
Primary criterion: Unified concentration values (without regional adaptation)	Primary criterion: Ecological risk and sensitivity of aquatic biota

Consideration of background concentrations: Formal or absent	Consideration of background concentrations: Mandatory
Hydrology and climate: Practically not considered	Hydrology and climate: Considered (seasonality, aridity)
Link with PDS: PDS values may be ≤ 0	Link with PDS: PDS values are controllable and achievable
Management outcome: Formal control and conflicts with water users	Management outcome: Effective load management and reduction of ecological risk

It is shown that the use of unified maximum permissible concentrations (MPCs) without consideration of regional natural conditions and background concentrations limits the possibility of correct calculation of permissible discharge standards (PDS). In contrast, the ecosystem-based approach ensures the controllability of anthropogenic loads and establishes a direct link between water quality regulation and ecological risk.

The comparative analysis of water quality regulation concepts (Table 2) demonstrates that the transition from the sanitary–hygienic MPC model to ecosystem-oriented Environmental Quality Standards (EQS) represents a key prerequisite for eliminating methodological inconsistencies in PDS calculations in arid river basins.

In modern environmental regulation systems, large industrial enterprises are increasingly regulated through integrated environmental permits based on Best Available Techniques (BAT). However, even under BAT-based regulation, the calculation of permissible discharge standards remains dependent on the applied environmental quality standards. If unified standards do not reflect regional natural background concentrations, regulatory inconsistencies may arise even when advanced treatment technologies are applied. Therefore, the development of regional environmental quality standards may complement existing regulatory instruments and improve the practical implementation of integrated environmental permitting systems. In recent years, the environmental regulatory framework in the Republic of Kazakhstan has been undergoing significant modernization. In accordance with the new Environmental Code of the Republic of Kazakhstan (2021), the Ministry of Ecology and Natural Resources has initiated the development of environmental quality standards for environmental components, including surface water bodies. In addition, environmental regulation for Category I enterprises is currently implemented through integrated environmental permits based on the principles of Best Available Techniques (BAT). These regulatory developments highlight the growing importance of regionally adapted environmental quality standards in Kazakhstan.

Scientific novelty of the study lies in the methodological justification of the necessity of regional environmental quality standards for water bodies in arid regions. Unlike traditional regulatory approaches based on unified maximum permissible concentrations, the proposed framework demonstrates how elevated natural background concentrations may lead to negative permissible discharge standards and create a regulatory management deadlock. The study shows that the regionalization of environmental quality standards allows the restoration of the physical and managerial meaning of permissible discharge calculations under conditions of hydrological variability and natural geochemical specificity of river basins.

1.4. Aim and objectives of the study

The aim of this study is to substantiate the necessity of developing regional environmental water quality standards using the Ilel River basin as a case study, as a tool for ensuring the correct calculation of permissible discharge standards and sustainable water resource management.

To achieve this aim, the following objectives were addressed:

1. To analyze the influence of background pollutant concentrations and hydrological variability on permissible discharge standard calculations.

2. To perform demonstrative PDS calculations for boron and hexavalent chromium under different river discharge scenarios.
3. To identify methodological limitations associated with the use of unified water quality standards.
4. To justify the advantages of regional environmental quality standards from ecological and management perspectives.

2. Materials and Methods

2.1. Study area and conceptual framework

The object of the study is the Ilek River basin (Republic of Kazakhstan), for which unified environmental water quality standards without regional adaptation are traditionally applied in water protection practice. The methodological basis of this study is to demonstrate how the selection of a unified water quality standard (C_{perm}) in comparison with a regionally adapted standard affects the results of permissible discharge standard (PDS) calculations under conditions of elevated background pollutant concentrations (C_{bg})

The calculations were performed using a mass-balance approach for a control section located downstream of the discharge point. This approach corresponds to the commonly applied practice of discharge regulation and surface water quality management.

2.2. Input parameters and river discharge scenarios

To account for hydrological variability typical of steppe and arid rivers, three river discharge scenarios were considered in the calculations:

$$Q \in \{Q_{low}, Q_{avg}, Q_{high}\} = \{3, 5, 7\} \text{ m}^3/\text{s} \quad (2)$$

The following substances were selected as priority pollutants:

boron (B) - an element with a pronounced natural and natural–technogenic origin in the Ilek River basin;

hexavalent chromium (Cr(VI)) — a highly toxic pollutant characteristic of technogenically impacted areas.

The selection of these substances is justified by their environmental significance and their frequent use as indicator pollutants in regional water quality assessments.

2.3. Method for calculating permissible discharge standards (PDS)

2.3.1. Concentration difference as a determining parameter

The main calculation parameter in determining permissible discharge standards is the difference between the permissible and background concentrations:

$$\Delta C = C_{perm} - C_{bg} \quad (3)$$

where C_{perm} - is the permissible concentration of a pollutant in the water body (either a unified or a regionally adapted water quality standard); C_{bg} - is the background concentration upstream of the discharge point.

When the condition $\Delta C < 0$ is satisfied, the PDS calculation yields negative values, indicating the impossibility of normative discharge regulation within the framework of the applied water quality standard.

2.3.2. Mass-based form of PDS calculation

Under the assumption of complete mixing of wastewater and river water at the control section and in the absence of explicit consideration of pollutant transformation processes, the basic formula for calculating permissible discharge standards is expressed as:

$$PDS = \Delta C \cdot Q \cdot K \quad (4)$$

Q is the river discharge at the control section (m³/s); K - is an integrated coefficient accounting for dilution, transformation, and self-purification processes.

In the present study, a baseline approximation with K = 1 was adopted. Considering that 1 mg/L is equivalent to 1 g/m³, the daily permissible discharge standard was calculated using the following expression:

$$PDS_{day} \text{ (kg day}^{-1}\text{)} = 86.4 \cdot (C_{perm} - C_{bg}) \cdot Q \cdot K \quad (5)$$

2.4. Assumptions and limitations of the method

Since the objective of this study is to provide a methodological justification for the necessity of regional water quality standards, the following assumptions were adopted in the calculations:

- complete mixing of wastewater and river water at the control section (single-box model);
- stationary hydrological conditions for each discharge scenario;
- absence of explicit consideration of pollutant transformation and decay processes (K = 1);
- background concentrations represent natural and natural–technogenic conditions upstream of the discharge point;
- for hexavalent chromium, redox transformations (Cr(VI) → Cr(III)) were not considered and are regarded as a subject for further research.

The adopted assumptions are sufficient to identify the fundamental dependence of permissible discharge standards on the relationship between permissible (C_{perm}) and background (C_{bg}) concentrations.

It should also be noted that the calculations presented in this study are conceptual and intended to demonstrate the regulatory implications of the relationship between background concentrations and applied water quality standards. The model does not include detailed hydrodynamic processes, pollutant transformation kinetics, or spatial heterogeneity of river systems. These aspects may be considered in future studies using more complex hydrochemical and ecological modeling approaches.

2.5. Input data table

Table 3 presents the input parameters and boundary conditions applied in the PDS calculation framework.

Table 3. Input parameters used for permissible discharge standard (PDS) calculations in the Ilek River basin

Parameter	Symbol	Unit	Value	Notes
River discharge (low flow)	Q_{low}	m ³ /s	3	Low-flow scenario
River discharge (average)	Q_{avg}	m ³ /s	5	Baseline scenario
River discharge (high)	Q_{high}	m ³ /s	7	Conditionally high-flow scenario
Background boron concentration	$C_{bg}(B)$	mg/L	0.8	Elevated regional background
Unified boron standard	$C_{perm}(B)$	mg/L	0.5	MPC

Regional boron standard	$C_{perm,reg}(B)$	mg/L	1.0	Demonstrative value
Background Cr(VI) concentration	$C_{bg}(Cr(VI))$	mg/L	0.001	Low background level

2.6. Output calculation parameters

For each pollutant and for each river discharge scenario, the following parameters were determined:

- concentration difference, ΔC (mg/L);
- daily permissible discharge standard, PDS_{day} (kg/day);
- sign and magnitude of PDS values as indicators of the validity of normative discharge regulation.

3. Results

3.1. Results of permissible discharge standard (PDS) calculations

Based on the mass-balance equation for permissible discharge standard calculation:

$$PDS_{day} \text{ (kg day}^{-1}\text{)} = 86.4 \cdot (C_{perm} - C_{bg}) \cdot Q \cdot K \tag{6}$$

Daily permissible discharge standards were calculated for boron (B) and hexavalent chromium (Cr(VI)) under three river discharge scenarios ($Q=3, 5, 7 \text{ m}^3/\text{s}$).

The calculations were performed using a transformation coefficient of $K = 1$, which corresponds to the baseline assumption of complete mixing and the absence of explicit consideration of pollutant transformation processes.

The calculated PDS values for the considered discharge scenarios are summarized in Table 4.

Table 4. Results of permissible discharge standard (PDS) calculations for priority pollutants in the Ilek River basin

Pollutant	Water quality standard	Q, m ³ /s	$\Delta C=C_{perm}- C_{bg}$, mg/L	PDS _{day} , kg/day
Boron (B)	Unified (MPC = 0.5 mg/L)	3	-0.3	-77.76
		5	-0.3	-129.60
		7	-0.3	-181.44
Boron (B)	Regional (1.0 mg/L)	3	+0.2	51.84
		5	+0.2	86.40
		7	+0.2	120.96
Cr(VI)	Unified (0.01 mg/L)	3	+0.009	2.33
		5	+0.009	3.89
		7	+0.009	5.44

3.2. Interpretation of calculation results

The calculation results demonstrate fundamentally different PDS behavior for the analyzed pollutants depending on the relationship between background concentrations and water quality standards.

For boron, when the unified water quality standard (MPC = 0.5 mg/L) is applied, the concentration difference ΔC takes negative values under all river discharge scenarios. This leads to

negative values of PDS_{day}, the absolute magnitude of which increases linearly with increasing discharge. These results indicate a formal absence of permissible discharge regardless of hydrological conditions.

When a regional water quality standard for boron (C_{perm}, reg = 1.0 mg/L) is used, the concentration difference becomes positive, resulting in positive PDS values. In this case, PDS_{day} increases proportionally with river discharge, which corresponds to the mass-balance logic of the calculation and reflects the influence of river water availability on allowable anthropogenic load.

For Cr(VI), under the selected input parameters, the concentration difference remains positive for all discharge scenarios. The calculated PDS_{day} values increase linearly with increasing Q, indicating the absence of formal inconsistency between background concentrations and the applied water quality standard within the adopted calculation framework.

The conceptual scheme illustrating the relationship between hydrological regime, water quality, and the environmental regulation system - determining permissible discharge calculations and the need for regional environmental water quality standards - is presented in Figure 2. The scheme demonstrates that variability in river discharge and background pollutant concentrations directly affects both the magnitude and the sign of PDS values, thereby defining the limitations of applying unified water quality standards.

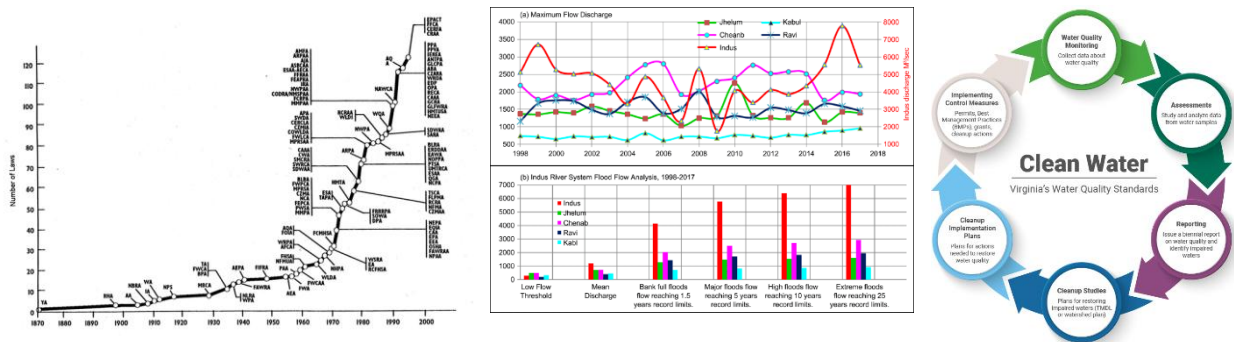


Figure 2. Conceptual scheme illustrating the interaction between hydrological regime, water quality, and discharge regulation: (a) long-term dynamics of water discharge; (b) structure of water quality regulation system. (Source: authors' own elaboration)

The scheme presented in the figure illustrates the role of hydrological variability and background hydrochemical conditions in the formation of permissible discharge standards used within the water resources management system.

It is evident that the application of unified water quality standards without regional adaptation may lead to calculation inconsistencies and managerial constraints. In contrast, regional environmental water quality standards ensure consistency between hydrological conditions, ecological risk, and regulated anthropogenic load.

3.3. Intermediate conclusions from the results

The obtained calculation results confirm that both the sign and magnitude of permissible discharge standards are largely determined by the relationship between background pollutant concentrations and applied water quality standards. When background concentrations exceed unified water quality standards, PDS calculations yield negative values. In contrast, the application of regionally adapted standards ensures physically and mathematically consistent results.

4. Discussion

4.1. Formation of a "management deadlock" zone in discharge regulation

The results of permissible discharge standard calculations presented in the Results section (Table 4), in combination with the conceptual scheme shown in Figure 1, indicate the formation of a

so-called «management deadlock» zone within the system of environmental regulation of water bodies. This zone arises when background pollutant concentrations exceed unified water quality standards (MPCs), resulting in the condition $C_{bg} > C_{perm}$ and, consequently, in negative PDS values.

As shown in Figure 1, under such conditions, the calculation of permissible discharge standards loses its managerial meaning: instead of limiting the incremental anthropogenic load, a formal prohibition of discharges is imposed regardless of the actual contribution of the water user. The negative PDS_{day} values obtained for boron across the entire range of river discharge scenarios ($Q = 3\text{--}7 \text{ m}^3/\text{s}$) demonstrate that an increase in river water availability does not remove the system from the management deadlock zone, but only increases the absolute magnitude of the negative calculated standard.

Thus, the hydrological factor alone is unable to compensate for the methodological inconsistency between unified water quality standards and the regional natural–geochemical background (Chapman, 1996; Meybeck and Helmer, 1989; Falkenmark and Rockström, 2004).

4.2. Relationship between the management deadlock zone and hydrological variability

The conceptual scheme presented in Figure 2 makes it possible to consider the management deadlock zone within a broader context of interactions between the hydrological regime, water quality, and the environmental management system. Hydrological variability - expressed through low-flow, average, and high-flow conditions - characteristic of arid and semi-arid regions, directly affects the dilution capacity of river systems and the magnitude of permissible pollutant loads (Vörösmarty et al., 2010; United Nations Economic Commission for Europe, 2019; World Health Organization, 2017). However, as demonstrated by the calculation results, this mechanism is not fully realized when unified MPC values are applied.

Under conditions of elevated background concentrations - typical for steppe rivers with intense evaporation, significant groundwater contribution, and specific geochemical characteristics of catchments - the regulation system becomes insensitive to changes in river discharge. This contradicts the fundamental logic of water resources management, according to which an increase in water availability should be accompanied by an increase in permissible anthropogenic load under unchanged ecological risk (United Nations Environment Programme, 2019; World Bank, 2021).

Thus, the management deadlock zone represents a mismatch between hydrological reality and the normative model used for permissible discharge standard calculations.

Similar challenges associated with elevated background concentrations and water quality regulation have also been reported in other arid and semi-arid river systems worldwide. Studies of rivers in Central Asia, Australia, and parts of the western United States demonstrate that natural mineralization and geochemical background often exceed unified regulatory thresholds. These examples further support the necessity of regional environmental quality standards adapted to local hydrochemical conditions.

4.3. Management implications of negative PDS values

From a management perspective, negative permissible discharge standard values indicate:

- the impossibility of establishing an allowable discharge limit;
- the absence of differentiation between natural background and anthropogenic contributions;
- the formalization of environmental requirements without linkage to actual ecological effects.

Within this zone, environmental regulation is transformed from a water quality management instrument into a mechanism for recording normative non-compliance. This leads to an increase in conflicts between regulatory authorities and water users, as well as a decline in confidence in monitoring results and calculation procedures (Asian Development Bank, 2020; Berdenov et al., 2022).

4.4. Role of regional water quality standards in overcoming the management deadlock

A comparison of permissible discharge standard calculations for boron using unified and regionally adapted water quality standards (Table 4) demonstrates that the regionalization of standards allows the system to be removed from the management deadlock zone. When a regional standard ($C_{perm, reg}$) is applied, the concentration difference ΔC becomes positive, and PDS values exhibit a linear dependence on river discharge. This behavior corresponds to the mass-balance logic of the calculation and restores the physical meaning of discharge regulation.

This result is consistent with international practice in the application of Environmental Quality Standards (EQS), within which standards are established with consideration of background concentrations, ecosystem sensitivity, and hydrological variability (Singh, 1995; U.S. Environmental Protection Agency, 1991). In this context, regional environmental water quality standards may be regarded as a key element in the transition from a sanitary–hygienic regulatory model to ecosystem-based and risk-oriented water resources management.

From an ecosystem perspective, the use of regionally adapted environmental quality standards is also important for maintaining the stability of aquatic ecosystems in arid river basins. Elevated background concentrations of certain elements, such as boron or mineralization components, may represent natural geochemical conditions rather than anthropogenic pollution. In such cases, environmental regulation based solely on unified sanitary standards may incorrectly interpret natural hydrochemical features as ecological degradation. Therefore, ecosystem-oriented standards that consider natural background levels are essential for balanced environmental management in arid regions.

4.5. Summary of the Discussion

Thus, the management deadlock zone observed in permissible discharge standard calculations is a consequence of methodological inconsistency between unified water quality standards and regional natural conditions, rather than an indicator of actual ecological degradation. Elimination of this zone is possible only through the implementation of regional environmental water quality standards that ensure consistency between the hydrological regime, background concentrations, and regulated anthropogenic loads within an integrated environmental regulation framework.

5. Conclusion

The conducted analysis demonstrated that the application of unified water quality standards in permissible discharge standard calculations for the Ilek River basin leads to the formation of a management deadlock zone caused by the exceedance of background pollutant concentrations over established regulatory values. Under such conditions, PDS calculations lose their regulatory function and do not allow differentiation between natural and anthropogenic contributions to water quality formation.

The calculation results confirm that hydrological variability alone does not ensure removal from the management deadlock zone if water quality standards are not aligned with regional natural and geochemical conditions. The use of unified MPC values in arid and semi-arid basins results in a formal prohibition of discharges regardless of actual ecological risk and the level of technological wastewater treatment.

It is shown that the implementation of regional environmental water quality standards is a necessary prerequisite for restoring both the physical and managerial meaning of permissible discharge calculations. Regionalization of standards enables a transition from formal control to risk-oriented water resources management that integrates hydrological regime, background concentrations, and allowable anthropogenic load, which constitutes a key requirement for sustainable water use in the Republic of Kazakhstan.

Future research may focus on the development of quantitative methodologies for determining regional environmental quality standards and on the integration of hydrochemical monitoring with ecosystem-based assessment of water bodies.

6. Supplementary Materials: no supplementary materials.

7. Author Contributions

Conceptualization – G.Zh., B.K.; methodology – B.K.; formal analysis – G.Zh.; investigation – G.Zh.; writing – original draft preparation – G.Zh.; writing – review and editing – B.K.; supervision – B.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information

Kapsalyamov, Bauyrzhan – doctor of technical sciences, professor, Management and Engineering in the field of environmental protection, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; kapsalyamov_ba@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3674-8200>

Zholmuratova, Gulzat – PhD student, Management and Engineering in the field of environmental protection, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; zholmuratova.enu@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3803-7855>

9. Funding: this research received no external funding.

10. Acknowledgments: the authors acknowledge the administrative and technical support provided during the preparation of this manuscript.

11. Conflicts of Interest: the authors declare no conflict of interest.

12. References

1. Acreman, M. C., & Dunbar, M. J. (2004). Defining environmental river flow requirements - a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(5), 861–876. <https://doi.org/10.5194/hess-8-861-2004>
2. Asian Development Bank. (2020). Water sector financing and management in Central Asia. Manila: Asian Development Bank.
3. Berdenov, Z. G., Safarov, R. Z., Mendybaev, E. Kh., Shomanova, Zh. K., & Ilies, 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*, 6, 45–55. <https://doi.org/10.32014/2518-170X.216>
4. Chapman, D. (1996). Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. World Health Organization; UNESCO; UNEP.
5. Chapman, D., & Kimstach, V. (1996). Selection of water quality variables. In D. Chapman (Ed.), *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring* (2nd ed., pp. 59–126). E & FN Spon. <https://doi.org/10.4324/NOE0419216001.ch3>
6. Dyussebayeva, N., Idrissova, G., Turebekova, A., Zhakupova, S., Abdieva, G., & Issayeva, A. (2023). Water elemental composition and toxicity in Kazakhstan's transboundary rivers. *Central Asian Journal of Water Research*, 9(1), 1–17. <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2023-R1.v9-1/1-17>
7. European Commission. (2000). Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy (Water Framework Directive). Official Journal of the European Communities.
8. European Environment Agency. (2018). Environmental quality standards in surface waters. EEA.
9. Falkenmark, M., & Rockström, J. (2004). Balancing water for humans and nature: The new approach in ecohydrology. Earthscan.
10. Meybeck, M. (2003). Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 358(1440), 1935–1955. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1379>

11. Meybeck, M., & Helmer, R. (1989). The quality of rivers: from pristine stage to global pollution. *Global and Planetary Change*, 1(4), 283–309. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(89\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0921-8181(89)90007-0)
12. Mugisha, S., Berg, S. V., & Muhairwe, W. T. (2007). Use of internal incentive contracts to improve water utility performance: the case of NWSC in Uganda. *Water Policy*, 9(3), 271–284. <https://doi.org/10.2166/wp.2007.010>
13. OECD. (2015). Water resources allocation: Sharing risks and opportunities. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264229631-en>
14. RSE Kazhydromet. (2024). Report on the state of the environment of Aktobe region for 2023. Aktobe: Kazhydromet.
15. Singh, V. P. (1995). Hydrologic modeling. New York: McGraw-Hill.
16. Solodova, E., Ilarri, J. R., Tanybayeva, A., Rysmagambetova, A., & Pavlichenko, L. (2021). Assessment of boron content changes in the surface water of the Ilek River valley (Aktobe, Kazakhstan). *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-1491.77>
17. United Nations Economic Commission for Europe. (2019). Guidance on water quality standards and objectives. UNECE.
18. United Nations Environment Programme. (2019). Global environment outlook 6. Nairobi: UNEP.
19. U.S. Environmental Protection Agency. (1991). Technical guidance for water quality-based toxics control (EPA/505/2-90-001). EPA.
20. U.S. Environmental Protection Agency. (2016). National recommended water quality criteria. EPA.
21. Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), 284–288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>
22. Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
23. World Bank. (2021). Water security for Central Asia: The costs of inaction. Washington, DC: World Bank.
24. World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). WHO Press.
25. Hering, D., Borja, A., Carstensen, J., Carvalho, L., Elliott, M., Feld, C. K., Heiskanen, A. S., Johnson, R. K., Moe, J., Pont, D., Solheim, A. L., & van de Bund, W. (2010). The European water framework directive at the age of 10: a critical review of the achievements with recommendations for the future. *Science of the Total Environment*, 408(19), 4007–4019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.05.031>

Су объектілерінің экологиялық сапасына арналған өңірлік стандарттардың қажеттілігі: Елек өзені алабы, Қазақстан

Бауыржан Капсаямов, Гүлзат Жолмуратова

Андатпа. Қазақстан Республикасының қуаң және шөлейт аймақтарында су объектілерінің экологиялық сапасына қойылатын бірыңғай стандарттарды қолдану антропогендік жүктемені тиімді реттеуді әрдайым қамтамасыз ете бермейді және рұқсат етілген төгінді нормативтерін (РТН) есептеу барысында әдістемелік қайшылықтарға әкелуі мүмкін. Бұл зерттеу Батыс Қазақстандағы антропогендік әсері жоғары трансшекаралық су жүйелерінің бірі болып саналатын Елек өзені алабының мысалында су объектілері үшін өңірлік экологиялық сапа стандарттарын әзірлеу қажеттілігін негіздеуге бағытталған. Зерттеу РТН есептеудің

баланстық тәсіліне негізделіп, ластаушы заттардың фондық концентрациялары мен өзен ағынының гидрологиялық өзгергіштігінің төгінділерді реттеу нәтижелеріне әсерін талдауды қамтиды. Зерттеліп отырған алаптың табиғи-техногендік жағдайларына тән ластаушы заттар ретінде бор және алты валентті хром (Cr(VI)) басым индикаторлық заттар ретінде таңдалды. Зерттеу нәтижелері бордың табиғи және өңірлік фондық концентрациялары жоғары болған жағдайда бірыңғай экологиялық сапа стандарттарын қолдану теріс мәнді РТН көрсеткіштеріне әкелетінін, яғни экологиялық реттеу жүйесінің формалды түрде жүзеге аспайтынын көрсетеді. Алынған нәтижелер табиғи-климаттық жағдайларды, фондық концентрацияларды және су экожүйелерінің тұрақтылығын ескере отырып, экологиялық сапа стандарттарын өңірлендіру Қазақстанда экологиялық және басқарушылық тұрғыдан негізделген төгінділерді реттеу мен су ресурстарын тұрақты басқарудың қажетті алғышарттарының бірі екенін растайды. Зерттеудің практикалық маңызы ұсынылған тәсілді су ресурстарын басқару жүйесін жетілдіруде қолдану мүмкіндігімен айқындалады.

Түйін сөздер: экологиялық сапа стандарттары; өңірлендіру; рұқсат етілген төгінді нормативтері; бор; алты валентті хром (Cr(VI)); қуаң аймақтар; Елек өзені.

Обоснование необходимости региональных стандартов экологического качества водных объектов: бассейн реки Илек, Казахстан

Бауыржан Капсалямов, Гүлзат Жолмуратова

Аннотация. В аридных и семиаридных регионах Республики Казахстан применение единых стандартов экологического качества водных объектов не всегда обеспечивает эффективное регулирование антропогенной нагрузки и может приводить к методологическим противоречиям при расчёте нормативов допустимых сбросов (НДС). Настоящее исследование направлено на обоснование необходимости разработки региональных стандартов экологического качества водных объектов на примере бассейна реки Илек - одной из наиболее антропогенно нагруженных трансграничных водных систем Западного Казахстана. Исследование основано на балансовом подходе к расчёту НДС и включает анализ влияния фоновых концентраций загрязняющих веществ и гидрологической изменчивости речного стока на результаты регулирования сбросов. В качестве приоритетных индикаторных веществ выбраны бор и шестивалентный хром (Cr(VI)), характерные для природно-техногенных условий исследуемого бассейна. Полученные результаты показывают, что при повышенных природных и региональных фоновых концентрациях бора применение единых стандартов качества воды приводит к отрицательным значениям НДС, что делает систему экологического регулирования формально невыполнимой. Сделанные выводы подтверждают, что регионализация стандартов экологического качества с учётом природно-климатических условий, фоновых концентраций и устойчивости водных экосистем является необходимым условием экологически и управленчески обоснованного регулирования сбросов и устойчивого управления водными ресурсами в Республике Казахстан. Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенного подхода при совершенствовании системы экологического регулирования водных ресурсов.

Ключевые слова: экологические стандарты качества; регионализация; нормативы допустимых сбросов; бор; шестивалентный хром (Cr(VI)); аридные регионы; река Илек.

Long-term phytoplankton and periphyton dynamics as indicators of ecological recovery in a hypertrophic lake: lake Durowskie, Poland

Beata Messyasz, Boguslawa Leska*

Adam Mickiewicz University, Poznań, Poland; messyasz@amu.edu.pl,
bogunial@amu.edu.pl

*Correspondence: bogunial@amu.edu.pl

Abstract. Long-term eutrophication remains one of the major pressures affecting freshwater lake ecosystems in Europe. Lake Durowskie (north-western Poland) has experienced sustained nutrient loading from agricultural runoff, urban activities, and hydrological connections with upstream lakes, resulting in a hypertrophic state. Since 2009, restoration measures combined with systematic ecological monitoring have been implemented to improve the lake's ecological condition. This study evaluates long-term phytoplankton and periphyton dynamics as indicators of ecological recovery in Lake Durowskie during 2008–2025. Samples were collected from multiple lake and inflow sites and analysed in terms of taxonomic composition, abundance, biomass, and ecological characteristics. Ecological status was assessed using biological indices, including the Shannon–Wiener diversity index (H'), Pielou evenness index (E), Jaccard similarity index, Nygaard mixed trophic index, and the diatom index (DI). The results indicate relatively high phytoplankton diversity and evenness across the lake. Chlorophyta and Bacillariophyceae contributed most to species richness, whereas total biomass was largely influenced by dinoflagellates, particularly *Ceratium hirundinella* and *Peridiniopsis berolinense*. Long-term observations revealed increasing algal species richness since 2022 and low Jaccard similarity values (17–25%), indicating significant community restructuring. Although the Nygaard index consistently classified the lake as hypertrophic, improvements in the periphyton diatom index at several sites suggest gradual ecological improvement. Overall, the results indicate a transitional recovery phase under persistent eutrophic pressure and confirm the value of phytoplankton and periphyton as indicators for long-term monitoring of hypertrophic lake ecosystems.

Citation: Messyasz, B., Leska, B. (2026). Long-term phytoplankton and periphyton dynamics as indicators of ecological recovery in a hypertrophic lake: lake Durowskie, Poland. *Journal of Ecology and Sustainability*, 154(1), 123-138. <https://doi.org/10.32523/tvts8f92>

Academic Editor:
A. Zandybay

Received: 06.02.2026

Revised: 16.03.2026

Accepted: 24.03.2026

Published: 31.03.2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Keywords: phytoplankton; periphyton; eutrophication; ecological recovery; long-term monitoring; bioindicators; diatom index; hypertrophic lake; Lake Durowskie

1. Introduction

Eutrophication remains one of the most widespread and persistent pressures on freshwater ecosystems worldwide, particularly in temperate regions of Europe (Xu et al., 2022). Excessive nutrient inputs from agricultural runoff, urbanisation, and altered hydrological connectivity promote high primary production, frequent algal blooms, and long-term degradation of ecological status in lakes (Xu et al., 2022; Yan et al., 2024).

Even when restoration measures are implemented, the ecological response of eutrophic and hypertrophic lakes is often non-linear, requiring long-term biological monitoring to reliably assess recovery trajectories (Jeppesen et al., 2005; Reyjol et al., 2014).

Algal communities, including phytoplankton and periphyton, are widely recognised as sensitive bioindicators of environmental change in freshwater ecosystems (Jakovljević et al., 2021; Messyasz & Wu, 2017). Due to their short life cycles and direct dependence on nutrient availability, light conditions, and water chemistry, algae respond rapidly to both anthropogenic pressures and restoration efforts. Changes in algal taxonomic composition, biomass distribution, and diversity indices provide valuable insights into trophic status, ecosystem stability, and successional processes (Reynolds, 2006; Padišák et al., 2009; Karpowicz et al., 2025). Consequently, algal-based indices, such as diversity metrics, trophic indices, and diatom-based indicators, are increasingly applied in ecological status assessments and water management frameworks (Tokatlı et al., 2020; European Commission, 2000; Birk et al., 2013; Blanco, 2024).

Long-term datasets are particularly valuable for distinguishing between short-term variability and genuine ecological recovery (Li et al., 2025; Reynolds, 2006). Recent studies highlight the importance of long-term ecological monitoring in evaluating restoration success in eutrophic lakes, particularly under conditions of persistent nutrient loading (Poikane et al., 2016; Carvalho et al., 2020; Hilt et al., 2017). While reductions in nutrient concentrations may occur relatively quickly, biological communities often respond with a delay, exhibiting complex restructuring processes rather than simple linear improvement (Li et al., 2025; Karpowicz et al., 2025). Declining community similarity, shifts in dominant functional groups, and divergence between abundance- and biomass-based patterns are frequently observed during transitional phases of recovery. Therefore, integrating phytoplankton and periphyton analyses over extended time periods is essential for understanding ecosystem trajectories in hypertrophic lakes.

Lake Durowskie, located in north-western Poland, represents a characteristic example of a small urban lake subjected to long-term eutrophication driven by agricultural inflow, urban pressure, and hydrological connections with upstream lakes (Xu et al., 2022; Reyjol et al., 2014). Since 2009, the lake has been the focus of continuous ecological monitoring combined with restoration measures aimed at improving water quality. This unique long-term dataset provides an opportunity to evaluate how algal communities respond to sustained management efforts under persistent eutrophic conditions (Li et al., 2025; Reynolds, 2006).

The present study aims to assess long-term phytoplankton and periphyton dynamics as indicators of ecological recovery in Lake Durowskie over the period 2008–2025. By combining taxonomic analyses with multiple algal-based indices, this study seeks to characterise spatial and temporal changes in algal community structure, evaluate trends in ecological status under continued hypertrophic pressure (Xu et al., 2022; Bennion et al., 2004; Li et al., 2025; Birk et al., 2013), and assess the usefulness of phytoplankton and periphyton as complementary bioindicators in long-term lake monitoring and sustainable ecosystem management (Li et al., 2025; Tokatlı et al., 2020; Blanco, 2024; Van den Brink et al., 2011).

2. Materials and Methods

2.1. Study area

The study was conducted in Lake Durowskie, located in north-western Poland within the town of Wągrowiec (52°49'06" N, 17°12'01" E) (Figure 1). Lake Durowskie is a post-glacial, lowland lake strongly influenced by anthropogenic pressure due to intensive agriculture in the catchment area, urban development along the shoreline, and hydrological connectivity with upstream lakes. This connectivity promotes continuous nutrient inflow and contributes to the lake's long-term hypertrophic condition.

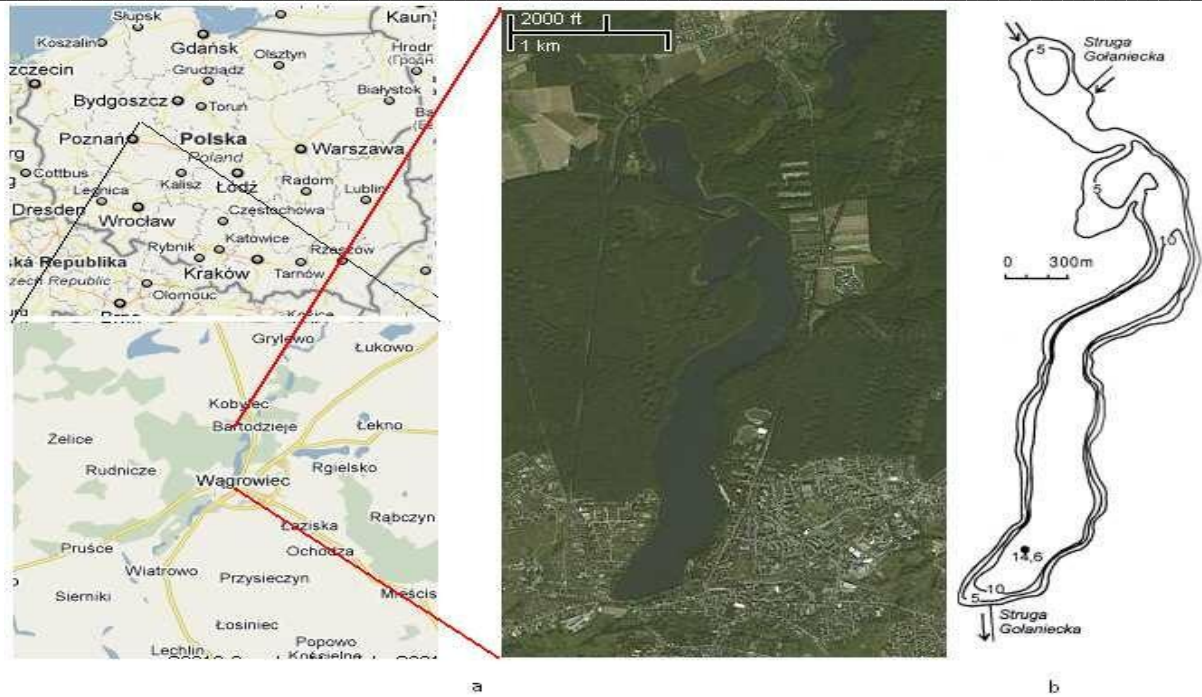


Figure 1. Location of Lake Durowskie (north-western Poland) and satellite view of the study area (Source: authors)

The morphometric and hydrological characteristics of Lake Durowskie are presented in Table 1, while the land-use structure of the direct catchment area is summarized in Table 2. The dominance of agricultural and forested areas indicates a mixed-type catchment, where diffuse pollution plays a key role in shaping the trophic status of the lake.

Table 1. Morphometric and hydrological characteristics of Lake Durowskie

Parameter	Value
Surface area	143.7 ha
Volume	$11.32 \times 10^6 \text{ m}^3$
Maximum depth	14.6 m
Mean depth	7.9 m
Total catchment area	23.610 ha
Direct catchment area	1.581 ha

Table 2. Land-use structure of the direct catchment area

Land use type	Share (%)
Urban	8.25
Agriculture	33.52
Forest	58.26

2.2. Sampling and monitoring

Field investigations were carried out in June 2025 as part of the long-term ecological monitoring program. The sampling design ensured coverage of inflow, central, aeration, and littoral zones.

Phytoplankton: 8 sampling stations

Periphyton: 12 sampling stations

Water samples (30 L) were collected from the epilimnion layer (0–3 m) and concentrated using plankton nets. Periphyton samples were obtained by scraping submerged stones along the shoreline. All samples were preserved with Lugol’s iodine solution(Figure 2).

Physicochemical parameters (temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen) were measured in situ using a YSI 556 multiparameter probe. Water transparency was determined with a Secchi disk.

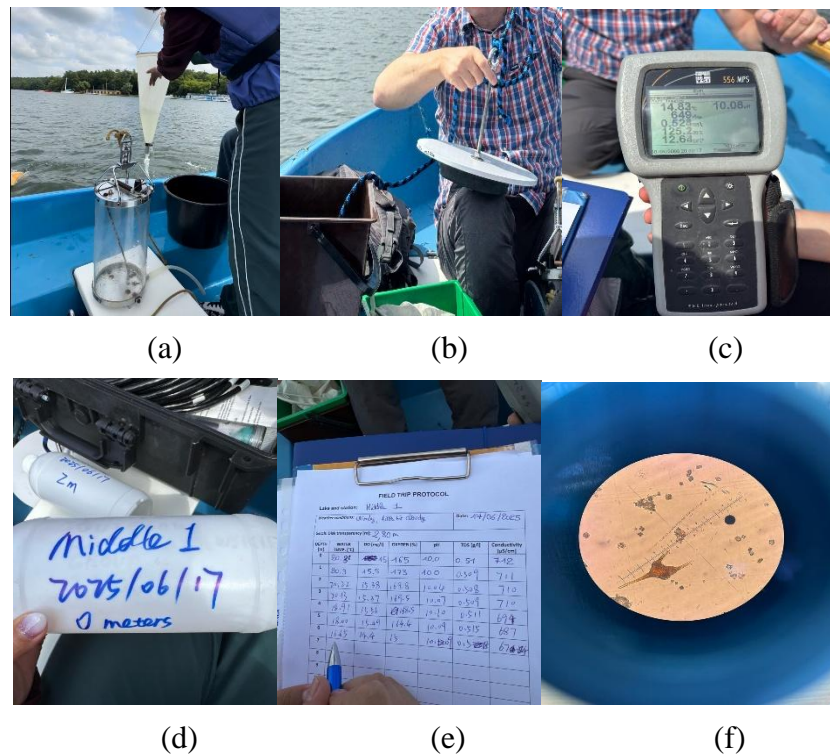


Figure 2. Field sampling procedures and *in situ* measurements during the monitoring campaign

- (a) Water sampling for phytoplankton analysis (Source: authors)
- (b) water transparency measurement using Secchi disk;
- (c) in situ measurements of physicochemical parameters using a multiparameter probe (YSI 556);
- (d) sample labeling;
- (e) field protocol documentation;
- (f) representative phytoplankton taxa under light microscopy.

2.3. Laboratory analysis

Algal taxa were identified to the lowest possible taxonomic level using light microscopy and standard taxonomic keys(Rimet & Bouchez, 2012). Quantitative analysis was conducted by counting individual algal cells in subsamples. Phytoplankton abundance was expressed as individuals per litre (ind. L⁻¹) using appropriate concentration factors.

Biomass was estimated based on species-specific biovolume calculations, where algal cells were approximated using geometric models. Biomass values were expressed in mg L⁻¹ and rounded to three decimal places.

2.4. Biological indices

Biological assessment followed the principles of the EU Water Framework Directive, with emphasis on biological quality elements (Scott et al., 2005).

2.4.1. Phytoplankton indices

The following indices were applied:

Shannon–Wiener diversity index (H') – assessment of species diversity;

Evenness index (E) – evaluation of species distribution uniformity;

Jaccard similarity index (SJ) – long-term comparison of species composition (2008–2025);

Nygaard trophic index – determination of trophic state, with trophic status classification based on threshold values presented in Table 3.

Table 3. Classification of trophic status based on Nygaard index

Trophic status	Index value
Oligotrophic	< 1.0
Mesotrophic	1.0–3.0
Eutrophic	3.0–5.0
Hypertrophic	> 5.0

The Nygaard index classification was used to interpret phytoplankton-based trophic status.

2.4.2. Periphyton and diatom index

The ecological status was assessed using the Diatom Index (DI), based on species-specific sensitivity, tolerance ranges, and relative abundance (Poikane et al., 2016), with ecological status classes defined according to the classification scheme presented in Table 4.

Table 4. Ecological status classification according to diatom index

Ecological status	Diatom index
Very good	> 0.83
Good	0.55–0.83
Moderate	0.30–0.55
Poor	0.15–0.30
Bad	< 0.15

This classification was applied to interpret diatom-based ecological status across sampling sites.

2.5. Data analysis framework

Data processing included quantitative and qualitative analysis of phytoplankton and periphyton communities. Phytoplankton density (ind. L^{-1}) and biomass (mg L^{-1}) were calculated using species-specific biovolume estimates.

Descriptive statistical analysis was applied to summarize spatial patterns in species richness, abundance, and biomass. Diversity indices were calculated for each sampling station. Long-term trends in species richness and trophic indices were interpreted using comparative analysis of monitoring data collected between 2008 and 2025.

3. Results

3.1. Phytoplankton structure and diversity

Phytoplankton communities of Lake Durowskie in 2025 exhibited high taxonomic richness and pronounced spatial heterogeneity. In total, 86 phytoplankton taxa belonging to seven major algal groups were identified, including *Bacillariophyceae*, *Chlorophyta*, *Cyanobacteria*, *Cryptophyta*, *Dinophyta*, *Euglenophyta*, and *Chrysophyceae*.

Species richness was highest in the inflow zone, where 46 taxa were recorded, whereas central pelagic stations showed lower values ranging from 13 to 27 taxa. This pattern indicates that the inflow

acts as an important source of phytoplankton diversity, continuously supplying taxa to the lake ecosystem.

Chlorophyta and *Bacillariophyceae* dominated the phytoplankton community at all sampling sites, together accounting for more than 65% of the total species pool (Figure 3). This taxonomic structure is characteristic of eutrophic lowland lakes exposed to sustained nutrient loading.

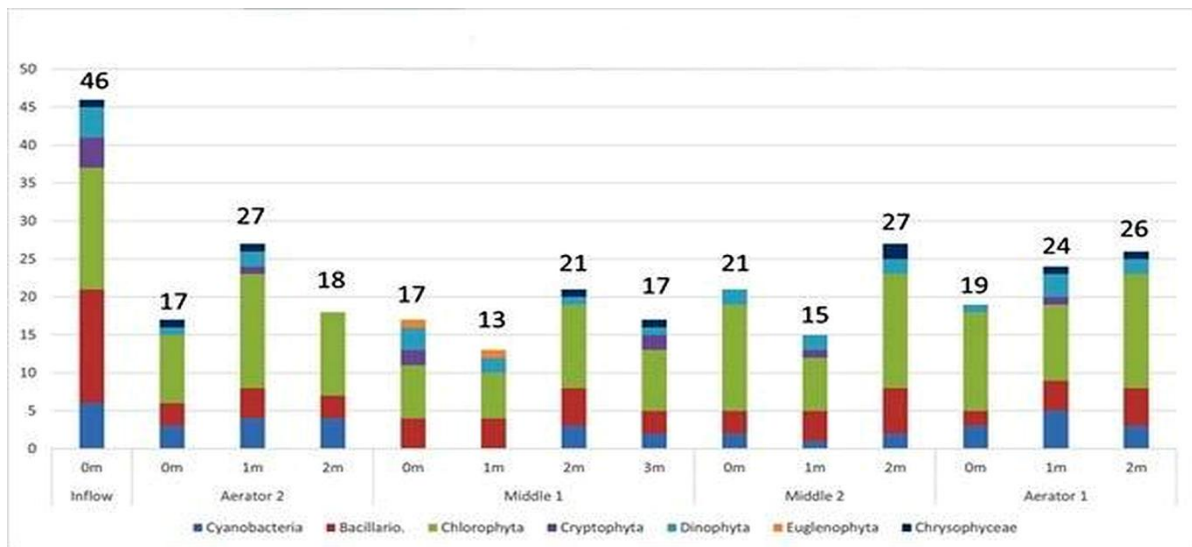


Figure 3. Number of Phytoplankton Species at each site and depth. The belonging group of the species is indicated with different colors (Source: authors)

Figure 3 shows a higher number of species in the inflow (46) than in the lake (13-27). This indicates that the inflow acts as an additional source of phytoplankton species for the lake ecosystem. *Chlorophyta* and *Bacillariophyceae* groups contribute to more than 65% of the number of the phytoplankton species at every site.

Phytoplankton diversity, expressed by the Shannon–Wiener index, varied among sampling zones. The highest values were observed in the inflow (approaching 5.0), whereas lake stations showed moderate to high diversity levels ranging from 2.5 to 3.5 (Figure 4). Elevated diversity in the inflow reflects reduced dominance and higher environmental heterogeneity compared to the central lake basin. Evenness index values were consistently high across all sites (0.63–0.83), indicating a relatively balanced distribution of species abundances and the absence of strong dominance patterns. Overall, these results suggest a structurally complex phytoplankton community despite the persistence of eutrophic conditions.

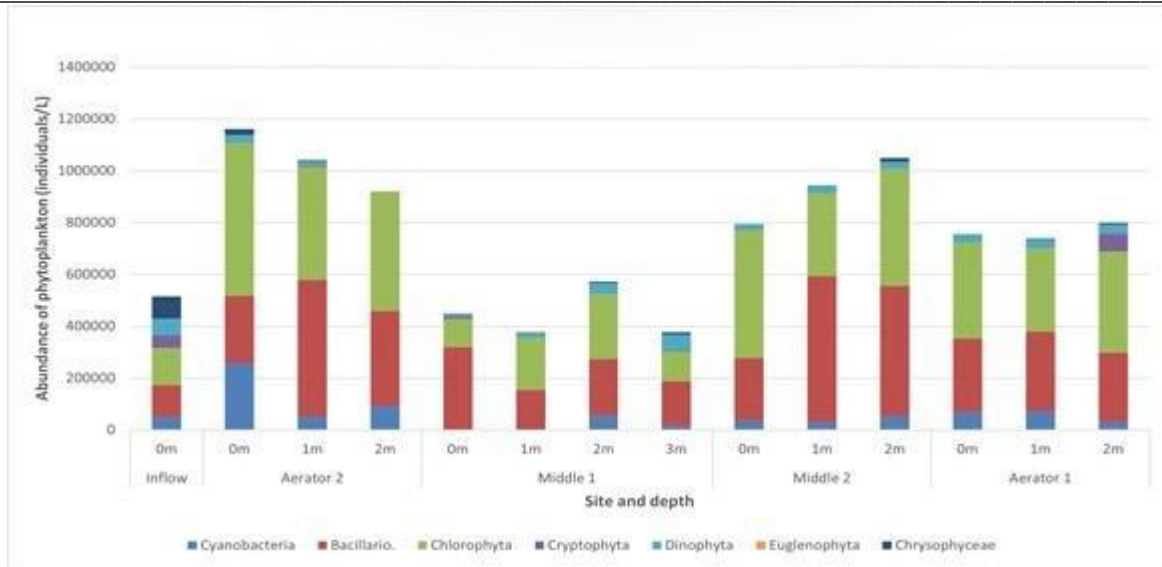
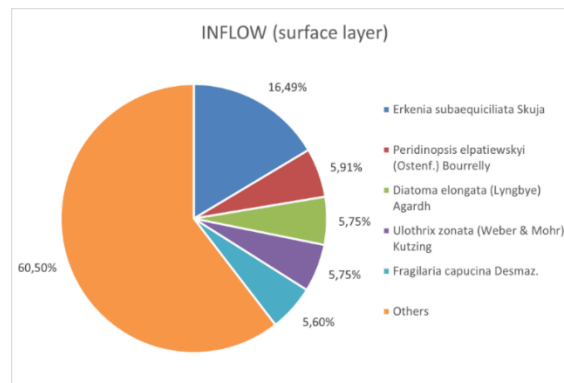


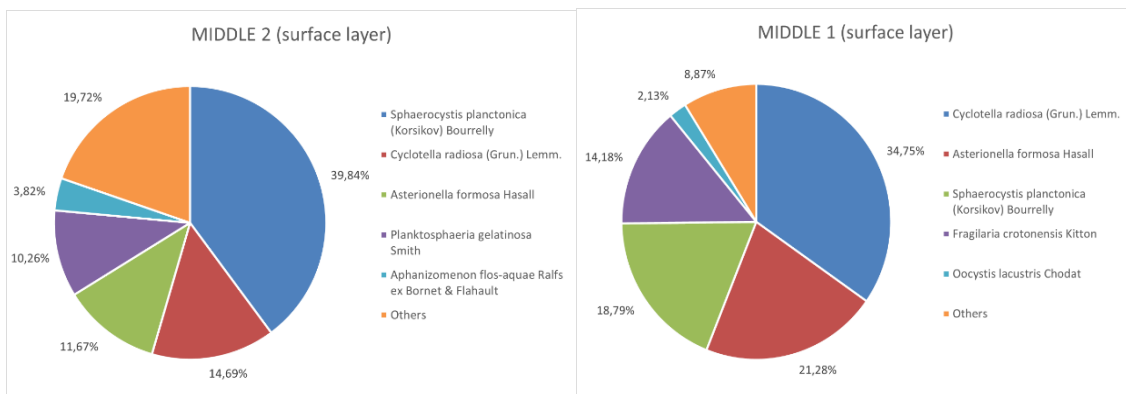
Figure 4. Phytoplankton group abundance for each site and depth (Source: authors)

Figure 4 shows that the most abundant phytoplankton groups are *Bacillariophyceae* and *Chlorophyta* at lake stations, whereas no single dominant group was observed in the inflow.

As illustrated in Figure 5, at the inflow station, phytoplankton abundance was characterised by the dominance of a limited number of taxa, while the remaining species together accounted for more than 60% of the total abundance.



(a)



(b)

(c)

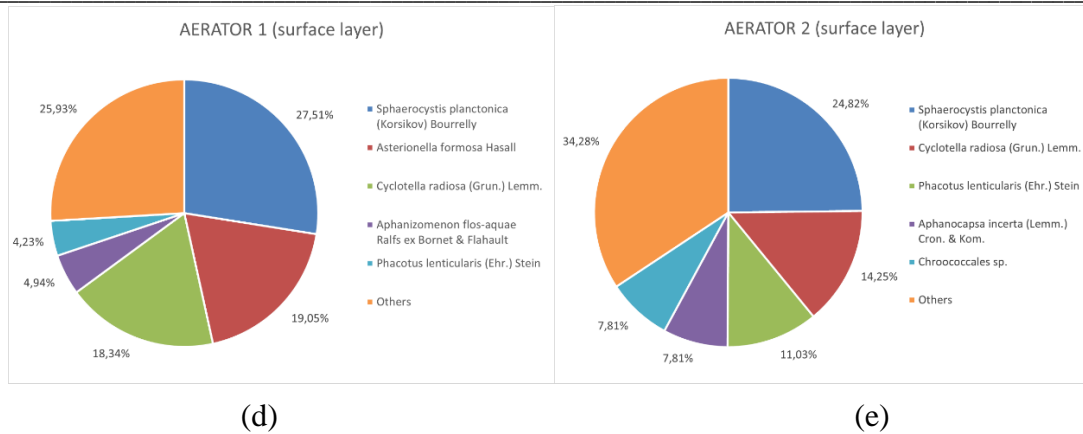


Figure 5. Relative abundance of the five dominant phytoplankton species at different sampling sites in the surface layer (0 m depth): (a) inflow station; (b) site 2; (c) site 3; (d) site 4; (e) site 5 (Source: authors)

3.2. Periphyton and diatom index

Periphyton communities of Lake Durowskie in June 2025 were dominated by benthic diatoms, demonstrating clear spatial variation in species composition and dominance patterns among sampling sites (Table 5). The assemblages were characterised by a limited number of dominant taxa accompanied by a diverse group of less abundant species.

Table 5. Relative abundance (%) of dominant diatom taxa in periphyton communities of Lake Durowskie in June 2025. No diatoms were recorded at site 12

Taxon	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Site 11	Site 12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Achnanthes lanceolata	–	–	–	–	6.77	–	–	–	–	–	–	–
Achnanthes laterostrata	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Achnanthes minutissima Kütz.	35.00	32.77	44.03	38.14	37.00	39.80	38.84	43.10	48.00	39.43	14.00	–
Amphora pediculus (Kütz.) Grunow	–	–	–	1.93	5.01	–	28.76	3.47	–	–	–	–
Cocconeis pediculus	3.75	7.60	–	–	–	3.56	–	–	–	–	–	–
Cocconeis placentula Ehr.	20.50	18.29	15.34	13.96	15.54	11.60	13.17	21.88	17.00	29.43	18.00	–
Gomphonema mesodon (Ehr.) Kütz.	–	–	–	–	–	–	–	–	7.00	9.30	–	–
Diatoma tenuis	16.00	10.68	11.93	8.47	5.01	8.92	–	–	–	–	–	–

Continuation of the Table 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>Diatoma vulgare</i>	6.65	7.05	7.06	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Fragilaria capucina</i> (Desm.) Rabenhorst	–	–	5.68	–	–	–	–	–	6.00	–	–	–
<i>Fragilaria capucina</i> var. <i>vaucheriae</i>	–	–	–	–	8.02	–	4.05	–	–	–	8.00	–
<i>Fragilaria virescens</i>	–	–	–	–	–	5.56	–	–	–	–	–	–
<i>Gomphonema parvulum</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	6.00	–
<i>Gomphonema pumilum</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Navicula cari</i>	10.75	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Witzschia dissipata</i>	–	–	–	–	–	5.56	–	3.47	–	–	7.00	–
<i>Witzschia palea</i> (Kütz.) W. Sm.	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Across most sites, *Achnanthes minutissima* represented the most abundant diatom species, reaching particularly high relative contributions at sites 3-9, where its share exceeded 35–48%. This widespread dominance reflects the high ecological tolerance of this species and its adaptability to eutrophic and environmentally variable conditions. *Achnanthes lanceolata* and *Achnanthes laterostrata* occurred sporadically with low relative abundance.

Cymbella microcephala was another frequent and ecologically important taxon, contributing between approximately 12% and 27% at several sites, suggesting relatively stable littoral habitats with sufficient oxygen availability. Other taxa, including *Diatoma tenuis*, *Fragilaria capucina*, *Gomphonema parvulum*, *Gomphonema pumilum*, *Navicula cari*, and *Nitzschia* spp., occurred with moderate to low relative abundance and contributed to local-scale differentiation of periphyton communities.

No diatom species were recorded at site 12, indicating unfavourable conditions for periphyton development at this station.

Diatom Index values revealed pronounced spatial variability in ecological status along the littoral zone. In 2025, several stations achieved good ecological status, while other sites remained within moderate or poor classes, indicating partial improvement of benthic ecological conditions under persistent eutrophic pressure.

3.3. Long-term dynamics (2008–2025)

Long-term analysis revealed pronounced temporal changes in the phytoplankton communities of Lake Durowskie over the period 2008–2025. Total species richness increased markedly after 2022, with 2025 exhibiting the highest number of recorded taxa since the beginning of the monitoring programme (Figure 6). This trend indicates a gradual increase in community complexity and may reflect the cumulative effects of restoration measures implemented in the lake since 2009. This

increase indicates an ongoing restructuring of phytoplankton assemblages rather than a return to earlier community states.

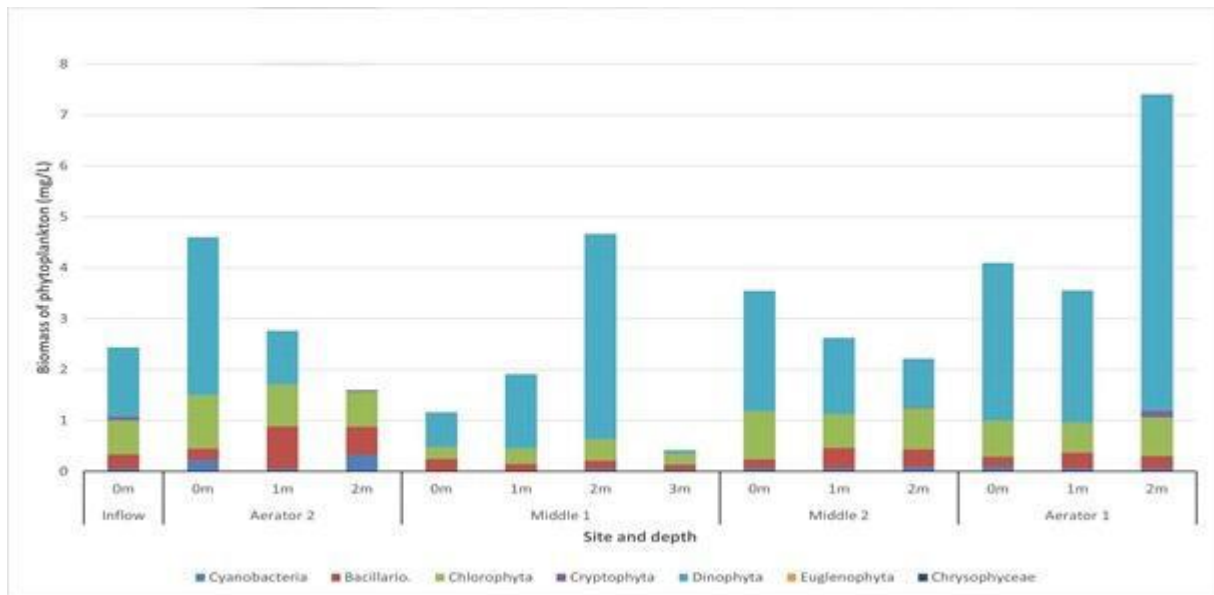


Figure 6. Shows that Dinophyta and Chlorophyta dominate phytoplankton biomass across all sites and depths (Source: authors)

In particular, dinoflagellates contributed disproportionately to total biomass, reflecting their large cell size and high biovolume, despite relatively moderate numerical abundance. This divergence between abundance- and biomass-based patterns highlights the importance of considering multiple metrics when assessing ecological change.

Community similarity analysis further confirmed the dynamic nature of phytoplankton succession. Jaccard similarity values between 2025 and earlier monitoring years ranged from 17% to 25%, indicating low resemblance to historical assemblages and high species turnover. Such low similarity suggests continuous species replacement and adaptive reorganisation under sustained environmental pressure.

Despite increasing taxonomic richness, the Nygaard mixed trophic index remained consistently high across all stations in 2025, with values ranging from 5.7 to 11.5 (Table 6), corresponding to eutrophic and hypertrophic conditions. These values were comparable to those observed in 2023–2024, demonstrating that nutrient enrichment continues to exert strong control over phytoplankton structure and ecosystem functioning.

Table 6. Nygaard mixed trophic index values at sampling sites in Lake Durowskie in 2025

Methods	Cyanobacteria	Chlorococcales	Centric diatoms	Euglenoids	Desmids	Mixed Index
Inflow	6	10	1	0	3	5,7
Aerotor 2	7	14	1	0	3	11,0
Middle 1	4	9	1	1	3	5,0
Middle 2	3	13	2	0	4	9,0
Aerotor 1	6	15	2	0	2	11,5

Overall, the long-term dynamics of phytoplankton in Lake Durowskie indicate a transitional ecological state, characterised by increasing biodiversity, high species turnover, and persistent

eutrophic conditions. These patterns suggest that biological reorganisation is occurring under long-term management, although full trophic recovery has not yet been achieved.

4. Discussion

4.1. Phytoplankton

The phytoplankton community of Lake Durowskie exhibits clear spatial and temporal patterns typical of eutrophic to hypertrophic lake ecosystems undergoing long-term management. One of the most prominent features is the role of the inflow as a major biodiversity source. Significantly higher species richness and diversity at the inflow compared to pelagic lake stations indicate continuous introduction of taxa into the lake, promoting spatial heterogeneity and contributing to community complexity.

A marked discrepancy between numerical dominance and biomass dominance was observed. While Chlorophyta and *Bacillariophyceae* dominated phytoplankton assemblages in terms of species richness and abundance, phytoplankton biomass was largely controlled by dinoflagellates, particularly *Ceratium hirundinella* and *Peridiniopsis berolinense*. This pattern reflects the large cell size and high biovolume of dinoflagellates, allowing them to dominate biomass despite relatively low abundance. Such divergence between abundance- and biomass-based metrics is well documented in eutrophic lakes and has important implications for energy flow and trophic interactions (Reynolds, 2012).

Long-term analysis revealed increasing phytoplankton biodiversity since 2022, with 2025 showing the highest total number of recorded taxa since the beginning of monitoring. At the same time, declining Jaccard similarity values indicate substantial species turnover and ongoing community restructuring rather than recovery toward historical assemblages. This combination of increasing diversity and low similarity suggests a transitional ecological state characterized by dynamic reorganization under persistent environmental pressure.

Similar transitional dynamics have been reported in other European lakes undergoing restoration, where biological communities often respond more slowly than physicochemical parameters (Jeppesen et al., 2005; Carvalho et al., 2020). These findings confirm that biological indicators provide essential information on ecosystem recovery processes.

Despite these biological changes, the Nygaard mixed trophic index consistently classified the lake as eutrophic to hypertrophic. This confirms that nutrient enrichment remains a dominant driver of ecosystem functioning. The coexistence of high biodiversity with persistent eutrophy highlights the non-linear response of phytoplankton communities to management measures and emphasizes that biological recovery may precede detectable improvements in trophic status (Reynolds, 2012).

4.2. Periphyton

Periphyton communities provided complementary insights into ecological conditions, particularly in littoral zones. The dominance of *Achnanthes minutissima* and *Cymbella microcephala* across most sampling sites reflects the prevalence of taxa tolerant to eutrophic conditions and variable environmental stress. Nevertheless, spatial differences in dominance patterns indicate local-scale habitat differentiation (Van den Brink et al., 2011)

Diatom index values demonstrated a clear improvement in ecological status at several littoral sites in 2025 compared to previous years, with multiple stations shifting from moderate or poor to good ecological classes. These changes suggest that benthic communities may respond more rapidly to environmental improvement than pelagic phytoplankton, making periphyton a sensitive early indicator of ecological recovery.

Ecological preference analyses showed persistent dominance of eutrophic indicator species, confirming sustained nutrient enrichment. However, the increasing contribution of mesotrophic taxa suggests partial alleviation of eutrophication pressure. High proportions of oxygen-demanding species across sites indicate favourable oxygen conditions, while dominance of alkaliphilous taxa reflects stable alkaline pH typical of productive eutrophic lakes.

Overall, periphyton-based assessment indicates gradual improvement of nearshore ecological conditions, even though eutrophication remains the defining characteristic of the lake (Feio & Dolédec, 2012; Ma et al., 2019; Ramezani et al., 2014).

Descriptive statistical analysis and comparative evaluation of long-term monitoring data revealed a gradual increase in phytoplankton species richness after 2022, accompanied by substantial community turnover. These trends suggest that biological restructuring is occurring despite the persistence of hypertrophic conditions.

5. Conclusion

Phytoplankton communities of Lake Durowskie are characterized by high taxonomic diversity, with diatoms and green algae dominating in terms of abundance, while dinoflagellates - particularly *Ceratium hirundinella* - control phytoplankton biomass. Diversity and evenness indices indicate structurally complex communities with limited dominance, despite persistently high nutrient levels.

Periphyton-based diatom indices reveal significant improvement at several littoral sites compared to previous years, supporting the conclusion that ecological conditions are gradually improving, especially in nearshore zones. However, low Jaccard similarity values demonstrate substantial community restructuring rather than recovery toward historical assemblages.

The Nygaard trophic index confirms that Lake Durowskie remains in an eutrophic to hypertrophic state. Taken together, the results indicate a transitional ecological phase characterized by persistent eutrophication accompanied by increasing biodiversity and partial biological recovery. Continued long-term monitoring and nutrient load reduction remain essential to consolidate ecological improvements and prevent future degradation.

These findings highlight the importance of long-term biological monitoring for evaluating the effectiveness of lake restoration strategies.

6. Supplementary Materials: not supplementary materials.

7. Author Contributions

Conceptualization – B.M., B.L.; methodology – B.M., B.L.; formal analysis – B.M.; Investigation – B.M.; data curation – B.M.; writing – original draft preparation – B.M.; writing – review and editing – B.L.; visualization – B.M.; supervision – B.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information

Messyasz, Beata – researcher, Department of Hydrobiology, Institute of Environmental Biology, Adam Mickiewicz University, Umultowska 89, Poznań, Poland, 61-614; messyasz@amu.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-4371-3591>

Leska, Boguslawa – Adam Mickiewicz University, full professor, PhD, DSc, Faculty of Chemistry, Uniwersytetu Poznańskiego 8, Poznań, Poland, 61-614; bogunial@amu.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-9504-5265>

9. Funding: this research received no external funding.

10. Acknowledgements: the authors acknowledge the administrative and technical support provided during the preparation of this manuscript.

11. Conflicts of Interest: the authors declare no conflicts of interest.

12. References

1. Benhassane, L., Oubraim, S., Mounjid, J., Fadlaoui, S., & Loudiki, M. (2020). Monitoring impacts of human activities on Bouskoura stream (periurban of Casablanca, Morocco): bio-ecology of

- epilithic diatoms. *Nature Environment and Pollution Technology*, 19(5), 1913–1930. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2020.v19i05.016>
2. Birk, S., Willby, N. J., Kelly, M. G., Bonne, W., Borja, Á., Poikane, S., & van de Bund, W. (2013). Intercalibrating classifications of ecological status: Europe's quest for common management objectives for aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 454–455, 490–499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.037>
 3. Blanco, S. (2024). What do diatom indices indicate? Modelling the specific pollution sensitivity index. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 29449–29459. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33115-1>
 4. Carvalho, L., Mackay, E. B., Cardoso, A. C., Baattrup-Pedersen, A., Birk, S., Blackstock, K. L., Borics, G., Borja, Á., Feld, C. K., Ferreira, M. T., Globevnik, L., Grizzetti, B., Hendry, S., Hering, D., Kelly, M., Langaas, S., Meissner, K., Panagopoulos, Y., Penning, E., Rouillard, J., & Solheim, A. L. (2019). Protecting and restoring Europe's waters: an analysis of the future development needs of the Water Framework Directive. *Science of the Total Environment*, 658, 1228–1238. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.255>
 5. Dondajewska, R., Kowalczywska-Madura, K., Gołdyn, R., Kozak, A., Messyasz, B., & Cerbin, S. (2019). Long-term water quality changes as a result of a sustainable restoration - a case study of dimictic Lake Durowskie. *Water*, 11(3), 616. <https://doi.org/10.3390/w11030616>
 6. European Commission. (2000). Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy (Water Framework Directive). *Official Journal of the European Communities*, L327, 1–73.
 7. Feio, M. J., & Dolédec, S. (2012). Integration of invertebrate traits into predictive models for indirect assessment of stream functional integrity: a case study in Portugal. *Ecological Indicators*, 19, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.09.039>
 8. Jakovljević, O. S., Popović, S. S., Živić, I. M., Stojanović, K. Z., Vidaković, D. P., Naunovic, Z. Z., & Krizmanić, J. Ž. (2021). Epilithic diatoms in environmental bioindication and trout farm's effects on ecological quality assessment of rivers. *Ecological Indicators*, 129, 107847. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107847>
 9. Karpowicz, M., Kuczyńska-Kippen, N., Sługocki, Ł., Czerniawski, R., Bogacka-Kapusta, E., & Ejsmont-Karabin, J. (2025). Zooplankton as indicators of lake trophic status: novel universal metrics from 224 temperate lakes. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114236>
 10. Li, X., Deng, Y., Yang, Z., Liu, X., & Chang, J. (2025). A case study supporting plankton communities as bio-indicators of water quality after lake restoration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119772>
 11. Ma, D., Chen, S., Lu, J., & Liao, H. (2019). Study of the effect of periphyton nutrient removal on eutrophic lake water quality. *Ecological Engineering*, 127, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.02.014>
 12. Messyasz, B., & Treska, E. (2019). Benthic diatoms as valuable indicators of anthropogenic eutrophication in biomonitoring of ribbon lake. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 26(4), 709–726. <https://doi.org/10.1515/eces-2019-0014>
 13. Messyasz, B., & Wu, N.-C. (2017). Macroinvertebrates and ecological assessment of Lake Durowskie (Poland). *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 418, 15. <https://doi.org/10.1051/kmae/2017013>
 14. Padisák, J., Crossetti, L. O., & Naselli-Flores, L. (2009). Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia*, 621, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9645-0>
 15. Poikane, S., Kelly, M. G., Salas Herrero, F., Cantonati, M., Portielje, R., Phillips, G., Søndergaard, M., Willby, N., & van den Berg, M. (2016). Benthic algal assessment of ecological status in European lakes and rivers: challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 568, 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.027>

16. Ramezani, J., Rennebeck, L., Closs, G. P., & Matthaеi, C. D. (2014). Effects of fine sediment addition and removal on stream invertebrates and fish: a reach-scale experiment. *Freshwater Biology*, 59, 258–271. <https://doi.org/10.1111/fwb.12456>
17. Reynolds, C. S. (2006). The ecology of phytoplankton. Cambridge University Press.
18. Reynolds, C. S. (2012). Phytoplankton responses to a changing climate. *Hydrobiologia*, 698, 5–16. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1149-2>
19. Reynolds, C. S., Huszar, V., Kruk, C., Naselli-Flores, L., & Melo, S. (2002). Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 24(5), 417–428. <https://doi.org/10.1093/plankt/24.5.417>
20. Reyjol, Y., Argillier, C., Bonne, W., Borja, Á., Buijse, A. D., Cardoso, A. C., Daufresne, M., Kernan, M., Ferreira, M. T., Poikane, S., Prat, N., Solheim, A. L., Stroffek, S., Usseglio-Polatera, P., Villeneuve, B., & van de Bund, W. (2014). Assessing ecological status in the context of the European Water Framework Directive: where do we go from here? *Science of the Total Environment*, 497–498, 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.119>
21. Rimet, F., & Bouchez, A. (2012). Biomonitoring river diatoms: implications of taxonomic resolution. *Ecological Indicators*, 15, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.09.014>
22. Tokatlı, C., Solak, C. N., & Yılmaz, E. (2020). Water quality assessment by means of bio-indication: a case study of the Ergene River using biological diatom index. *Arabian Journal of Science and Engineering*, 45, 43–51. <https://doi.org/10.26650/ASE2020646725>
23. Van den Brink, P. J., Alexander, A. C., Desrosiers, M., Goedkoop, W., Goethals, P. L. M., Liess, M., Dyer, S. D., & Forbes, V. E. (2011). Traits-based approaches in bioassessment and ecological risk assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7, 198–208. <https://doi.org/10.1002/ieam.1097>
24. Xu, M., Wang, R., Dong, X., Zhang, Q., & Yang, X. (2022). Intensive human impacts drive the declines in heterogeneity of diatom communities in shallow lakes of East China. *Ecological Indicators*, 140, 108994. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108994>
25. Yan, G., Yin, X., Wang, X., & Huang, M. (2024). Can relative abundance of diatoms (RAD) serve as an indicator for the water quality assessment in river-connected lakes? A case study at Dongting Lake. *Environmental Sciences Europe*, 36, 106. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00927-4>

Гипертрофты көлдің экологиялық қалпына келуінің индикаторлары ретінде фитопланктон мен перифитонның ұзақ мерзімді динамикасы: Дуровское көлі, Польша

Beata Messyasz, Boguslawa Leska

Аңдатпа. Ұзақ мерзімді эвтрофикация Еуропадағы тұщы су көлдері экожүйелеріне әсер ететін негізгі экологиялық қысымдардың бірі болып табылады. Солтүстік-батыс Польшада орналасқан Дуровское көлі ауылшаруашылық ағындыларының, қалалық қызметтің және жоғары ағыста орналасқан көлдермен гидрологиялық байланысының әсерінен қоректік заттардың тұрақты түсуіне ұшырап, гипертрофты күйге жеткен. 2009 жылдан бастап көлдің экологиялық жағдайын жақсартуға бағытталған қалпына келтіру шаралары жүйелі экологиялық мониторингпен қатар жүргізілуде. Бұл зерттеу 2008–2025 жылдар аралығында Дуровское көліндегі фитопланктон мен перифитон қауымдастықтарының ұзақ мерзімді динамикасын экожүйенің экологиялық қалпына келуінің индикаторлары ретінде бағалауға бағытталған. Үлгілер көлдің әртүрлі учаскелерінен және құятын ағындардан жиналып, таксономиялық құрамы, молшылығы, биомассасы және экологиялық сипаттамалары бойынша талданды. Экологиялық жағдай Шеннон–Уивер әртүрлілік индексі (H'), Пиелу теңестірілу индексі (E), Жаккар ұқсастық индексі, Нюгардтың аралас трофикалық индексі және

диатомдық индекс (DI) сияқты биологиялық индекстерді қолдану арқылы бағаланды. Нәтижелер көл бойынша фитопланктонның салыстырмалы түрде жоғары түрлік әртүрлілігі мен теңестірілуін көрсетті. Түрлік байлықта *Chlorophyta* мен *Bacillariophyceae* басым болды, ал жалпы биомассаның қалыптасуына негізінен динофлагеллаттар, әсіресе *Ceratium hirundinella* және *Peridiniopsis berolinense* түрлері әсер етті. Ұзақ мерзімді бақылаулар 2022 жылдан бастап балдырлардың түрлік байлығының артқанын және Жаккар ұқсастық индексінің төмен мәндерін (17–25%) көрсетті, бұл қауымдастық құрылымының елеулі қайта қалыптасуын білдіреді. Нюгард индексі көлді тұрақты түрде гипертрофты деп сипаттағанымен, перифитонның диатомдық индексінің кейбір учаскелерде жақсаруы экологиялық жағдайдың біртіндеп жақсаруын көрсетеді. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер эвтрофтық қысым сақталған жағдайда көл экожүйесінің өтпелі қалпына келу кезеңінде екенін көрсетеді және фитопланктон мен перифитонның гипертрофты көлдерді ұзақ мерзімді мониторингте бағалау үшін маңызды индикаторлар екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: фитопланктон; перифитон; эвтрофикация; экологиялық қалпына келу; ұзақ мерзімді мониторинг; биоиндикаторлар; диатомдық индекс; гипертрофты көл; Дуровское көлі.

Долгосрочная динамика фитопланктона и перифитона как индикаторов экологического восстановления гипертрофного озера: озеро Дуровское, Польша

Beata Messyas, Boguslaw Leska

Аннотация. Длительная эвтрофикация остается одним из наиболее значимых факторов экологического давления на экосистемы пресноводных озер Европы. Озеро Дуровское, расположенное в северо-западной части Польши, на протяжении длительного времени подвергалось поступлению избыточных биогенных веществ вследствие сельскохозяйственного стока, урбанизированной деятельности и гидрологической связанности с вышерасположенными озерами, что привело к формированию гипертрофного состояния. С 2009 года на озере реализуются мероприятия по восстановлению, сопровождаемые систематическим экологическим мониторингом, направленные на улучшение его экологического состояния. Настоящее исследование посвящено оценке долгосрочной динамики фитопланктона и перифитона в качестве биологических индикаторов экологического восстановления озера Дуровского за период 2008–2025 гг. Отбор проб фитопланктона и перифитона осуществлялся на различных участках озера и в притоках, после чего проводился анализ их таксономического состава, численности, биомассы и экологических характеристик. Для оценки пространственно-временных изменений экологического состояния применялся комплекс биологических индексов, включая индекс разнообразия Шеннона–Уивера (H'), индекс выравненности Пиелу (E), индекс сходства Жаккара, смешанный трофический индекс Нюгарда и диатомовый индекс (DI). Результаты показали высокое видовое разнообразие и выравненность фитопланктона. По видовому богатству доминировали *Chlorophyta* и *Bacillariophyceae*, тогда как формирование общей биомассы в значительной степени определялось динофлагеллятами, прежде всего *Ceratium hirundinella* и *Peridiniopsis berolinense*. С 2022 года отмечено увеличение общего числа видов водорослей и низкие значения индекса Жаккара (17–25%), что свидетельствует о значительной перестройке сообществ. Несмотря на сохранение гипертрофной классификации по индексу Нюгарда, диатомовый индекс перифитона на ряде участков указывает на постепенное улучшение экологических условий. В целом полученные результаты

свидетельствуют о переходной стадии экологического восстановления озера при сохраняющемся эвтрофном давлении и подтверждают высокую информативность фитопланктона и перифитона как биоиндикаторов для долгосрочного мониторинга и устойчивого управления гипертрофными озерными экосистемами.

Ключевые слова: фитопланктон; перифитон; эвтрофикация; экологическое восстановление; долгосрочный мониторинг; биоиндикаторы; диатомовый индекс; гипертрофное озеро; озеро Дуровское.

Жер асты суының нақты деңгейлерін анықтау әдістеріӘдеубай Сейітқазиев¹, Жақсыбай Тулеубаев², Гулнар Зияева^{2*}, Қыдыралы Мұсабеков¹¹Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, Тараз, Қазақстан, adeubai@mail.ru, musabekov55@mail.ru²М.Х.Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан, tuleubayev51@mail.ru, gk.ziyaeva@dulaty.kz*Корреспонденция: gk.ziyaeva@dulaty.kz

Аңдатпа. Суармалы жерлердегі судың жетіспеушілігі және олардың егістік алқаптарындағы қозғалыс процестерін нақты зерттеулер негізінде қарастырылуы маңызды. Егіс алқаптарында судың көтерілуіне әсер ететін факторларды анықтау әдістері нақты деректер арқылы көрсетілген. Жерасты сулары деңгейінің мониторингі нәтижесінде алынған деректерге статистикалық талдау жасалды. Жер асты суларының орташа көтерілу қарқыны олардың орналасу тереңдігіне тікелей байланысты екендігі анықталды. Мұнда су деңгейінің динамикасына ылғалдылық коэффициенті, топырақтың тығыздығы мен кеуектілігі, фильтрациялық қасиеттері, сондай-ақ инфильтрацияланатын су көлемі айтарлықтай әсер етеді. Топырақ құрылымына қарай оның қалыңдығына, тығыздығына, тұздылық дәрежесіне байланысты жерасты суларының минералдану деңгейі, маусымдық булану көрсеткіштері мен капиллярлық көтерілу биіктігі және жер асты суларының жату тереңдігі мен ықтимал шекті деңгейлері айқындалды. Келтірілген зерттеу нәтижелері ауыл шаруашылығы алқаптарында жүргізілген эксперименттік жұмыстардың деректеріне негізделген. Мұнда жер асты сулары деңгейінің жоғарылауы мелиорацияда маңызды рөл атқарады. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, далалық зерттеулердің гидрогеологиялық негіздемесі, суару жүйелерінің режимін, мелиоративтік іс-шараларды жоспарлауды және су ресурстарын кешенді пайдалануды қамтиды. Мелиоративтік шаралар және су ресурстарын кешенді пайдалану жерасты сулары режимінің гидродинамикалық және гидрохимиялық болжамдарына, сондай-ақ аэрация аймағы жыныстарының су-тұз режиміне негізделеді. Сонымен қатар алынған нәтижелер суармалы аумақтардың тұрақты өнімділігін сақтау үшін жер астысуларының деңгейін бақылаудың маңыздылығын көрсетеді. Ғылыми негізделген талдау мелиорациялық іс-шараларды оңтайландыруға және топырақтың қайталама тұздану қаупін төмендетуге мүмкіндік береді. Зерттеу қорытындылары су ресурстарын тиімді басқарудың өңірлік экологиялық қауіпсіздігі үшін шешуші фактор екенін дәлелдейді.

Дәйексөз: Сейітқазиев, Ә., Тулеубаев, Ж., Зияева, Г., Мұсабеков, Қ. (2026). Жер асты суының нақты деңгейлерін анықтау әдістері. *Journal of Ecology and Sustainability*, 154(1), 139-154. <https://doi.org/10.32523/y94nev64>

Академиялық редактор:
А. Зандыбай

Редакцияға түсті: 05.12.2025
Түзетілді: 20.02.2026
Қабылданды: 15.03.2026
Басылымға шықты: 31.03.2026



Copyright: © 2026 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/>)

Түйін сөздер: топырақ бетінен булану; сүзілу коэффициенті; құнарлылық; суармалы жер; ауа алмасу аймағы; топырақ тығыздығы.

1. Кіріспе

Суармалы егіс алқаптарындағы жер асты суының деңгейін анықтау, көбінесе, арнайы орнатылған пьезометрлік ұңғымалар (бақылау құдықтары) арқылы жүзеге асырылып келді.

Бұл мониторинг жұмыстары, әдетте, вегетациялық кезеңнің басында, ортасында және соңында бақыланып келді. Дегенмен, мұндай әдіс танаптың гидрогеологиялық жай-күйін толықтай сипаттауға жеткіліксіз және нақты деректерді көрсетпеуі мүмкін.

Оның негізгі себебі – жер бедерінің біркелкі еместігі, микробедердің (микрорельеф) гетерогенділігі. Танаптың ойпатты учаскелерінде беткі ағын суларының жиналуы мен инфильтрациясы қарқынды жүріп, топырақтың капиллярлық жүйесі арқылы жерасты суы топырақ түтікшелері арқылы жоғары көтеріледі. Егер суармалы немесе жақын жатқан грунт суларының минералдану деңгейі 1,5–3 г/л аралығында болса, онда қарқынды булану процестерінің әсерінен аталған алқаптарда топырақтың қайталама тұздану қаупі күрт артады. Бұл өз кезегінде егістік жерлердің мелиоративтік жағдайының нашарлауына және өнімділіктің төмендеуіне әкеп соғады.

Бұл жұмыс «BR24992867-Қазақстанның су шаруашылығы мен қайта өңдеу өнеркәсібін дамыту және басқару үшін ресурс үнемдеуші технологияларды әзірлеу, инновациялық инжинирингтік орталық құру» бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру негізінде орындалып отыр.

Топырақ деградациясы – бұл топырақ функцияларының өзгеруіне, оның құрамы мен қасиеттерінің сапалық нашарлауына, сондай-ақ жер ресурстарының табиғи-экономикалық маңыздылығының төмендеуіне әкеп соғатын табиғи және антропогендік процестердің жиынтығы. Жердің тозу процестерінің салдарынан ауыл шаруашылығы айналымынан едәуір алқаптар шығарылып, олардың мақсатты пайдаланылуы өзгереді.

Экономикалық тұрақсыздық жағдайында құнарлылықты сақтау мен жақсартуға бағытталған мелиоративтік іс-шаралардың толық көлемде жүргізілмеуі топырақ жамылғысының деградациялану қаупін одан әрі өршіте түсті. Бұл топырақ құнарлылығын сақтау мен арттыру және жер жағдайын жақсарту бойынша кешенді жұмыстарды толық жүзеге асыруға мүмкіндік бермейді.

Топырақтың тозуы көптеген факторларға байланысты. Ауыл шаруашылығы алқаптарының қазіргі жай-күйі көпфакторлы антропогендік жүктемемен сипатталады. Алқаптардың құрылымында келесідей зақымдалған жерлердің үлесі басым: батпақтанған жерлер – шамамен 12%; су эрозиясына ұшыраған алқаптар–19%; дефляцияланған (жел эрозиясы) топырақтар–10%; тұзды және сор кешендері–18%-дан астам. Қазіргі уақытта жердің сапасына әсер ететін ауылшаруашылық өндірісінің негізгі экологиялық шығындары антропогендік әсерлердің жиынтығымен сипатталады, тозу процестерінің қарқындылығы уақыт бірлігіндегі топырақ қасиеттерінің теріс динамикасымен, яғни оның сапалық көрсеткіштерінің өзгеру жылдамдығымен анықталады (Deng et al., 2015; Duan et al., 2015; Durasov et al., 1981).

Тозуды бағалау критерийі ретінде қайтымдылық қарастырылады, ол тозу үрдісінде өзгерген топырақтың қасиеттерін қалпына келтіру мүмкіндігін білдіреді. Бұл тозудың түріне және дәрежесіне байланысты. Оның кейбір түрлері үшін (қышқылдану, топырақтың шаршауы және т.б.) топырақтың оңтайлы қасиеттерін толық қалпына келтіруге үлкен шығындарсыз қол жеткізуге болады. Тозудың басқа түрлері үшін (су эрозиясы, дефляция және т.б.) олардың салдарын жою өте қиын немесе мүмкін емес. Топырақтың тозуы агроландшафтардың, оның ішінде топырақ жамылғысының бұзылуы тұрғысынан қарастырылуы керек, сәйкесінше агроландшафтардың физикалық, биологиялық, геохимиялық, гидрогеологиялық және гидрологиялық бүлінуін бөліп көрсетеді. Бұл түрлерге көбінесе бір-бірімен байланысты тиісті түрлер жатады (Duan et al., 2015; Durasov et al., 1981; Gromotovich et al., 1987; Hoffan, 1986; Karpenko et al., 2017).

Топырақтың тығыздалуы мен технологиялық жағдайлардың нашарлауы ауылшаруашылығы техникасының өнімділігін 5-10%-ға төмендетеді. Сонымен қатар,

қоректік заттардың шайылуына байланысты тыңайтқыштарға жұмсалатын шығындар шамамен 1,5 есеге артады, өйткені деградация дәрежесіне байланысты тыңайтқыш нормаларын арттыру қажеттілігі келесідей сипатталады: әлсіз деградацияланған жерлерде – 10%-ға; орташа зақымдалған жерлерде –30%-ға; күшті деградацияланған жерлерде –1,5-2 есеге арттыру қажет.

Жалпы егістік алқаптарының (17 млн га) құнарлылығын жоғалту көрсеткіштері деградация деңгейіне қарай: әлсіз дәрежеде 5-10%, орташа дәрежеде (9 млн га) 20-30%, ал күшті дәрежеде (7 млн га) 50-60%-ға дейін жетеді. Қатты тығыздалған топырақтарда өнімділіктің төмендеуі 50%-ды құрайды (Duan et al., 2015; Durasov et al., 1981; Gromotovich et al., 1987; Hoffan, 1986; Karpenko et al., 2017).

2. Материалдар мен әдістер

Деградациялық процестердің алдын алу мақсатында ауыл шаруашылығы дақылдарын өсірудің топырақ қорғау технологиялары әзірленді. Бұл технологиялардың негізі – топырақ бетінде өсімдік қалдықтары мен сабанды (6 т/га дейін) сақтай отырып, мульчирлеуші (қалдықсыз) өңдеу әдісін қолдану. Аталған әдіс эрозияға қарсы техниканы пайдалану арқылы топырақ құнарын сенімді қорғауды, өндірістік шығындарды оңтайландыруды және алқаптардың өнімділігін арттыруды қамтамасыз етеді.

Жер қыртысындағы жер асты суының гидродинамикалық режимі әр түрлі деңгейде болады. Көбінесе, жердің еңістігіне сәйкес топырақ құрамындағы ылғал латеральды (көлбеу) бағытта қозғалысқа түседі, бұл процестің қарқындылығы топырақтың гранулометриялық (механикалық) құрамына тікелей тәуелді. Біз құмдақты, жеңіл саздақты және орташа саздақты топырақтардағы судың жоғарыдан (жер бетінен) төмен сүзілуін (q), сондай-ақ осы бағыттағы топырақтың сүзілу коэффициенттерін (k_i), топырақтың орналасу қалыңдықтарына (Δh_i) сәйкес анықтаймыз.

Жер асты суының сулы қабаттағы шығыны жыныстардың сүзілу қасиетіне, жер асты суының қозғалу бағытындағы еңістігіне және сулы қабаттың қалыңдығына тікелей байланысты болады. Әрбір қалыңдық үшін Дарси формуласы төмендегідей:

$$q = k_i \frac{\Delta h_i}{m_i} = \text{const} \tag{1}$$

Әрбір үш түрлі қалыңдық үшін және бұларды бірінен соң бірін тізбектеп, (1) теңдеуді құрап, H_0 шамасын анықтаймыз. H_0 – уақыт аралығындағы құмның үстіңгі жабындысындағы, жер асты суы деңгейінің нақты көтерілуі, ол төмендегі өрнекпен орындалады (Seitkaziyeu et al., 2013; Seitkaziyeu, 2013; Seitkaziyeu, 2002; Seitkaziyeu, 2007; Seitkaziyeu, 2011):

$$H_0 + q * \left(\frac{1}{k_1} * \sum_{i=2}^3 m_i - \sum_{i=2}^3 \frac{m_i}{k_i} \right) \tag{2}$$

мұндағы H – құм бетіндегі уақыт кезеңіне сәйкес келетін арын.

Кесте 1. Жер асты суы деңгейінің орташа көтерілуі

i	H, м	Δh_i , м	K_i , м/тәу.	m_i	$q = \text{const}$ м/тәу.	H_0 , м
1	3	0,8	0,5	1,0	0,4	1,44
2	3	0,5	0,4	1,0	0,2	
3	3	0,2	0,3	1,0	0,06	

(2) өрнектен кез келген n қабаттар үшін жер асты суының жоғарғы бетіндегі бөліктегі байланысқан жыныстардың H_0 шамасын анық білеміз. Сонымен қатар, H арындарды және судың шығынын төмендегі өрнекпен анықталады.

$$H_0 = \frac{H + q * \left(\frac{1}{k_1} * \sum_{i=2}^n m_i - \sum_{i=2}^n \frac{m_i}{k_i} \right)}{1 + \frac{q}{k_i}} \quad (3)$$

Кесте 2. Жер асты суы деңгейінің орташа көтерілуі

№	H, м	Δh_i , м	K_i , м/тәу.	m_i	$q = \text{const}$ м/тәу.	H_0 , м
1	3	0,8	0,5	1,5	0,267	1,663
2	3	0,5	0,4	1,5	0,133	
3	3	0,2	0,3	1,5	0,04	

(2) және (3) өрнектерден екі белгісіз: H_0 нақты шамасы және сүзінді судың шамасы q . Бұл шамаларды көп жылдық зерттеулер мәліметтеріне сүйеніп, нәтижелерін 1–2-кестелер түрінде бердік. Бұл кестелердегі мәліметтерде арын деңгейі, топырақтың сүзілу коэффициенттері бірдей, тек, топырақтың ылғалды өткізу қалыңдықтары ($m_i=1.0; 1,5$ м) әр түрлі. Осыған сәйкес, белгілі бір уақыт аралығындағы жер асты суы деңгейлері әр түрлі болып келеді.

Жер асты суының шекті (мүмкін) тереңдігін анықтау үшін, табиғи жағдайдағы жер асты суы тереңдігін және сынақты (шекте) тереңдігін анықтау қажет. Мұндай жағдайда топырақ ауаландыру аймағында табиғи ылғалдылықтан ең төменгі ылғал сыйымдылығына дейінгі аралықта қанығады.

Ауаландыру аймағына дейінгі топырақтың қанығуына қажетті судың көлемі 4-теңдеу бойынша анықталады:

$$W_x = \frac{\beta_{\text{етыс}} - W_0 * \gamma}{100} = \frac{(n-8) - \mu - W_0 * \gamma}{100} \quad (4)$$

мұндағы: $\beta_{\text{етыс}}$ - топырақтағы ең төменгі ылғал сыйымдылығы; W_0 - топырақтағы табиғи ылғалдылық; γ – топырақтың тығыздығы; μ – топырақтағы судың (ылғалдың) қайтарылу коэффициенті.

Мұндай көлемдегі суды анықтағаннан кейін, бір жыл ішіндегі топырақтың қанығуындағы жер асты суының көтерілуін (h) жеңіл түрде былай есептейміз:

$$h = \frac{W \cdot 365}{W_x} \quad (5)$$

мұндағы: W – жер асты суының сіңірілген көлемі, м/тәу.

Тасөткел сілеміндегі ғылыми-зерттеу жұмыстардың мәліметтеріне (Seitkazyev, 1999; 2002; 2016; 2019; 2020; Karpenko et al., 2017) сүйеніп, жер асты суының мүмкін тереңдігін төмендегі 3-кесте түрінде береміз.

3. Нәтижелер

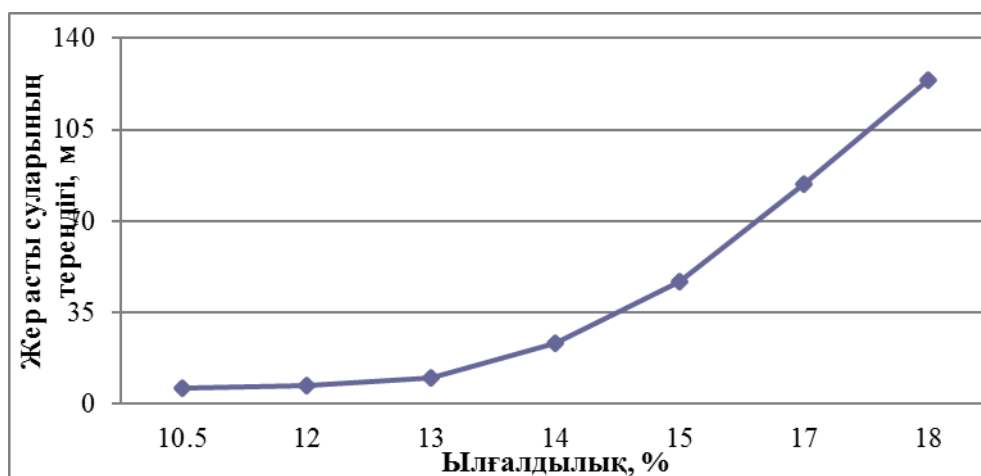
Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде суармалы егістік алқаптарында жер асты сулары деңгейінің көтерілуі тек мелиоративтік емес, сонымен қатар экологиялық қауіп тудыратын фактор екені анықталды. Кесте-3 деректері бойынша кеуектілігі 44–50% болатын топырақтарда жер асты суының көтерілу шамасы ауаландыру аймағының толық қанығуына және табиғи газ алмасу режимінің бұзылуына әкеледі.

Кесте 3. Жер асты суының көтерілуін анықтау

Кеуектілік, P, %	Табиғи ылғалдылық, W_0 , %	Топырақтың тығыздығы γ , т/м ³	Жер астысуының сіңірілу қорегі W, м/сут	Қанығуға қажетті судың көлемі, W_x , м	Жер астысуының көтерілуі, h, м
50	10,5	1,37	0,0013	0,13	3,65
48	12	1,41	0,0015	0,091	6,02
46	13	1,43	0,0016	0,054	10,81
45	14	1,45	0,0017	0,005	23,0
44	15	1,46	0,0025	0,021	43,4
44	17	1,46	0,0028	0,012	85,2
44	18	1,45	0,0030	0,009	121,7
Орташа мән	45,86	14,21	1,43	0,00206	0,046
Стандартты ауытқу	2,34	2,67	0,03	0,00069	0,048

Топырақ тығыздығының 1,37 т/м³-тен 1,46 т/м³-ке дейін артуы сүзілгіштік қабілеттің төмендеуіне, нәтижесінде инфильтрациялық сулардың жиналуына себеп болады. Бұл жағдай топырақтың аэробты күйінен анаэробты күйге ауысуын жеделдетіп, биологиялық белсенділіктің төмендеуіне және органикалық заттардың минералдану үдерісінің баяулауына әкеледі.

Сурет 1-де көрсетілгендей, жер асты суының көтерілуі белгілі бір шектен кейін экспоненциалды сипат алады. Бұл экологиялық тұрғыдан аса қауіпті, себебі су деңгейінің шамалы ғана көтерілуі тұздардың капиллярлық жолмен өсімдік тамыры жайылған қабатқа жылдам көтерілуіне және топырақ бетінің екінші реттік тұздануына әкеледі.



Сурет 1. Жер асты суының көтерілуін анықтау, м

Жоғарыдағы 3-кестедегі топырақтың механикалық құрамын негізге алып, монолиттік зерттеулер бойынша белгілі бір нақты уақыт (30, 60, 90 тәулік) аралығындағы жер асты суының көтерілу мүмкіндігін анықтау қажеттілігі туындайды. Өйткені, дақылдарды суару алдында, ортасында және соңында, сонымен қатар тұзданған жерлерді шаю кезеңінде белгілі бір маусым аралығында (күзде, көктемде) егіс танаптарында судың көтерілуін бақылау, танапты жыртыуға егіс танаптарын өңдеу, жақсарту жұмыстарын жүргізуде қажеттілігі көп.

Көп жылдық тәжірибелерде, егер жер асты суы деңгейі жер бетінен 1,8–2,0 м тереңдікте байқалса, бұл жерді өңдеу әлі ертерек болатындығын ескерсек, жоғарыдағы–кестеде орташа саздақтың балшыққа дейінгі аралықта су жер бетіне түгелдей келіп тұр. Олай болса, мұндай тәжірибелік мәліметтер жерді ластанудан алдын-ала сақтауға және іркілген суды өсімдік тамыры жайылған қабаттан ығыстырудың шараларын қолдануға мүмкіндік береді.

Тұзданған топырақты жерлердегі ең маңызды факторлардың бірі жер асты сулары деңгейінен болатын булану процесі. Әр түрлі топырақ топтары үшін, олардың сулы-физикалық қасиеттеріне, тұздардың химиялық құрамымен тұздану дәрежесіне, жер асты суының тереңдігіне және жергілікті метеобекеттердің деректеріне (ауа температурасы, атмосфералық жауын-шашын мөлшері, ауаның салыстырмалы ылғалдылығы және т.б.) сүйеніп, жер асты суының минералдану деңгейі ескеріле отырып есептелді. (An et al., 2011; Raiymbekov, 2022; Sokolenko et al., 1981; Duan et al., 2015; Seitkazyev et al., 2018, 2020; Arakelyan, 1980).

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде жер асты суларының шекті деңгейін анықтай отырып, өсімдік тамыры жайылған қабаттағы өсімдікке қажетті нақты ылғал мөлшерін анықтауға толық мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бұл көрсеткішті айқындау топырақтың генетикалық қабаттарындағы, антропогендік ластануды, деградациялық құрғау процестерін және су ресурстарының негізсіз шығынын болдырмаудың шараларын жүйелі түрде қолдану мүмкіндігіне негіз болады.

Минералданған жер асты және ирригациялық сулардың гидрологиялық режимі жағдайында, екіншілік тұздануға бейім суармалы алқаптардағы жер асты суларының рұқсат етілген шекті тереңдігі (кризистік деңгейі) көптеген табиғи-антропогендік факторлардың интегралдық әсерімен сипатталады. Атап айтқанда, бұл процесс келесі параметрлерге тікелей тәуелді (Khachatryan et al., 1991; Zagumennyu, 1962; Blaylock, 1994; Durasov et al., 1981): топырақтың тұздану түрі, жер асты және суару суларының құрамы мен минералдануы, маусымдық кезеңде топырақтың жоғарғы беткі қабатының тұздануының мүмкін болатын ұлғаюы, маусым үшін суғару және буланудың мөлшері, капиллярлық көтерілудің биіктігі және топырақтың тұздануына байланысты анықталады (Khachatryan et al., 1991; Zagumennyu, 1962; Blaylock, 1994; Durasov et al., 1981) [6-12]. Осы факторларды ескере отырып, жер асты суларының тереңдігі келесі теңдеумен анықталды:

$$H_{\text{мүм}} \geq \left[1 - \left(\frac{0.356 \cdot \gamma \cdot h \cdot 10^5 - Q_6 M_{\text{тол}}}{I_0 M_{\text{ы}}} \right) 0.67 \right] \cdot H_{\text{к}} \quad (6)$$

$H_{\text{мүм}}$ – жер асты суының орналасуына байланысты мүмкін тереңдік, м; S_6 – тұздардың құрамы, %; γ – топырақ тығыздығы, т/м³; h – топырақ қабаты, м; Q_6 – суландыру мөлшері, м³/га; $M_{\text{тол}}$ – судың минералдылығы, г/л; I_0 – маусым кезіндегі буланғыштық, м³/га; $H_{\text{к}}$ – капиллярлық көтерілу биіктігі, м; $M_{\text{ы}}$ – жер асты суының минералдылығы, М_ы ,г/л.

Жоғарыда келтірілген деректерді кешенді түрде талдау жер асты суларының деңгейлік режимін (динамикасын) нақты болжауға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде егіс танабына қандай дақыл егуге болатынын толық болжауға жағдай жасады. Әсіресе топырақтың ластануы мен ондағы топырақтың қандай тұздармен қаншалықты тұзданғанын білу біз үшін өте қажет.

Зерттеу нәтижелері (4-кесте) ауыр механикалық құрамды (саздақтар, балшықтар) топырақтарда жер асты суларының жату тереңдігінің жоғары екенін айқындады. Бұл фактор аумақтарда экожүйенің деградацияға ұшырау қаупі басым екендігін көрсетеді, атап айтқанда: өсімдік жамылғысының сиреуіне; микробиологиялық белсенділіктің тежелуіне; агроландшафттардың экологиялық тұрақтылығының төмендеуіне әкеп соғады.

Топырақтың бұзылуы мен жер асты суының көтерілуі, оған байланысты ықпалдар төмендегі 4-кестеде толық көрсетіліп, суғару кезіндегі болатын қауіпті көрсеткіштерге байланысты көрсетілген.

Кесте 4. Жер асты суының орналасуына байланысты мүмкін тереңдік

Топырақ құрамы	Топырақ қабаты, h, м	Топырақтың тығыздығы, γ т/м ³	Тұздардың құрамы S _б , %	Судың минералдылығы, M _{тол} г/л	Жер асты суының минералдылығы, M _{гр} г/л	Суландыру мөлшері, O _{бр} , м ³ /га	Маусым кезіндегі буланғыштық, B, м ³ /га	Капиллярлық көтерілу биіктігі, H _{к.м.}	Жер асты суының орналасуындағы мүмкін тереңдік H _{м,м}
Жеңіл саздақ	0,30	1,25	0,28	0,7	1,5	4000	5000	1,1	0,20
Орташа саздақ	0,50	1,32	0,45	0,8	2	5000	4000	1,5	0,42
Саздақты	0,80	1,41	0,52	2	4	6000	3000	2,0	0,81
Балшық	1,0	1,47	0,70	6	7	7000	2000	3,0	1,67
Орташа мән		0,65	1,36	0,49	2,38	3,63	5500	3500	1,90
Стандартты ауытқу		0,31	0,10	0,18	2,47	2,53	1291	1291	0,79

Агротехникалық және топырақ-экологиялық шараларды жетілдіру арқылы жер ресурстарының жай-күйін жақсарту мақсатында іргелі зерттеулерге (Sokolenko et al., 1981; Khachatryan et al., 1991; Hoffan et al., 1986; Bresler et al., 1987; Deng et al., 1991; Gromotovich et al., 1987) негізделген эмпирикалық формулаларды тиімді қолдану қажеттілігі туындайды, яғни модельдеу әдістерін қолдану қажет. Бұл тәсіл өсімдіктің тамыр жаю қабатындағы улы тұздарды ығыстыруға және есептік қабаттардың қайта ластануын (тұздануын) болдырмауға бағытталған.

Зерттеу барысында қойылатын талаптарды ескере отырып, келесі параметрлерге терең жүйелі талдау жасау маңызды:

- топырақтың химиялық және физикалық сипаттамасы: тұздану дәрежесі, тұздардың химиялық құрамы және топырақтың су-физикалық қасиеттері;

- гидрофизикалық көрсеткіштер: топырақтың су өткізгіштік қабілеті, ылғал және жылу алмасу динамикасы;

- инженерлік-мелиоративтік инфрақұрылым: нысандағы кәрізді-коллекторлы желілердің жұмыс істеу тиімділігі мен техникалық көрсеткіштері.

Жер асты суларының орналасу тереңдігін мониторингтеу нәтижесінде суармалы егіншілік алқаптарындағы мелиоративтік жағдайды сипаттайтын заңдылықтар анықталды. Осыған байланысты, келесі функционалдық реттеу жұмыстары жүзеге асырылады:

- әр түрлі гидрогеологиялық жағдайларға сәйкес мелиоративтік шаралардың қолдану барысында жерасты суларының тепе-теңдігі мен олардың орналасу тереңдігіне тікелей байланысты;

-қарастырылатын сұрақтар суландыру жүйелерінің техникалық жетістігіне және су қорларын тиімді пайдалануы мен олардың техникалық және экономикалық тиімділігін арттыруына сәйкестендіріп орындайды;

-комплексі шешім қабылдауда жер асты суларын пайдалану мен мәселені шешуді реттеуде суармалы жерлердің гидрогеологиялық жағдайларын толық ескеруді талап етеді;

-гидрогеологиялық болжамдар құрастыруда экологиялық жағдайларды қорғау қарастырылады.

Жер асты суының оңтайлы тәртібі (құбылымы) төмендегідей жағдайларды ескеру қажет:

1. Жер асты суларының деңгейі тұрақты (5-6 м) тереңдікте болған жағдайда, топырақтың түзілу үдерісі автоморфты жағдайды қамтамасыз етеді.

2. Тұзы аз, сілтілік емес жер асты сулары шамамен 1,5-2 м тереңдікте орналасқан жерде, батпақтанусыз шалғындық топырақтар қалыптасады.

3. Жер асты суларының минералдану деңгейі су тартқыш қондырғыларды пайдалану кезеңінде оңтайлы су-тұз режимін сақтауды қамтамасыз ететін тереңдікте қалыптасады.

Осыған байланысты аталған көрсеткіш «сындық тереңдік» деп аталады. Бұл параметр климаттық жағдайларға, топырақтың капиллярлық қасиеттеріне, жер асты суларының минералдану дәрежесі мен химиялық құрамына, сондай-ақ суару режимі мен өзге де антропогендік факторларға тікелей тәуелді.

Мелиорациялық іс-шараларды жүргізу барысында басты стратегиялық міндет - топырақтың белсенді қабатында екінші қайтара тұздану мен батпақтану үдерістерін болдырмау және ауылшаруашылығы дақылдарының өнімділігін арттыру мақсатында жер асты сулар деңгейінің оңтайлы гидродинамикалық режимін анықтау болып табылады.

Суару жоспарланған немесе суаруға арналған аймақтардағы грунттық сулардың режимі мен балансына болжам жасау үшін келесі кешенді бастапқы мәліметтерді талдау қажет:

А) аймақтардың геоморфологиялық-геологиялық және гидрогеологиялық жағдайларының сипаттамасы және осы жағдайларды талдау;

Б) гидрометеорологиялық және гидрологиялық жағдайлардың сипаттамасы және олардың талдауы (атмосфералық жауын-шашын, булану деңгейі, үстіртін ағын және т.б.)

В) су шаруашылығы және гидромелиоративтік жағдайлардың қазіргі жай-күйін саралау және олардың талдауы;

Г) болжамға дейінгі кезеңдегі жер асты суларының режимі мен балансындағы ерекшеліктерін айқындау;

Д) грунттық су деңгейін модельдеудің тиімді әдістемесін таңдау.

Топырақ суларының гидрохимиялық режимін қалыптастыру ауаландыру аймағындағы тау жыныстарының литологиялық құрамына және суда жеңіл еритін тұздардың мөлшеріне байланысты. Топырақ суларының деңгейі көтерілгеннен кейін олардың булануға қатысуы, минералдануы және химиялық құрамы ауаландыру аймағының тау жыныстарының тұз құбылымына едәуір әсер етеді. Суару алғаш басталған жылдарда топырақ суларының гидрохимиялық құбылымында белгілі бір заңдылықтар көрініс табады.

Жер асты суларының қозғалыс жылдамдығы геологиялық құрылымға, тау жыныстарының литологиялық құрамына, геоструктуралық факторларға және жалпы гидродинамикалық жағдайларға байланысты. Жер асты суларының минералдану деңгейі мен химиялық құрамының түрінің ауысуы қорек алу аймағынан ағып шығу (дренаж) аймағына қарай жүзеге асады. Суармалы алқаптарда инфильтрациялық қоректену мөлшеріне табиғи факторлармен қатар, антропогендік факторлар (суару нормасы, техникасы және мерзімі) шешуші әсер етеді.

Гидродинамикалық жағдайлар, табиғи дренаждылық дәрежесі төмен және су өткізгіштігі нашар сазды-балшықты қабаттар арқылы жүзеге асатын сулы горизонттардың гидравликалық өзара байланысы жер асты суларының деңгейлік және гидрохимиялық режимдерінің қалыптасуын негіздейді. Суармалы аймақтарда басты әсерге инфильтрациялық

қоректенудің мөлшері ие, ол табиғи факторлардан бөлек суару нормаларына, мерзімдеріне және техникасына байланысты.

Тұздардың еруі суарылатын жағдайда тұздардың миграциясына айтарлықтай әсер етеді. Гипс, кальцит, доломит, галит, глауберит, мираблит және басқа да еритін тұздар мен минералдар болатын жыныстардағы жер асты суларының қозғалысы оларды шаюмен қатар жүреді. Қатты фазаның тұздарының еру жылдамдығы жер асты судың құрамына, олардың қозғалыс жылдамдығына және еритін тұздардың қасиеттеріне байланысты. Тұздардың шығарылуы фильтрациялық ағын мен диффузиялық тасымалдану арқылы жүзеге асады. Тұздардың қатты фазадан сұйық фазаға өту жылдамдығы судың химиялық агрессивтілігіне, ағын жылдамдығына және минералдардың физикалық-химиялық қасиеттеріне негізделеді.

Жүргізілген зерттеулердің сандық мәліметтері 5-кестеде және 2-суретте келірілген. Графикалық және кестелік деректерді интерпретациялау нәтижесінде жер асты суларының бетінен буланудың ең жоғары мәнделері су деңгейі 1 метрге дейінгі тереңдікте болғанда байқалатыны анықталды. Ал буланудың минималды мәнделері I топтағы топырақтар үшін шамамен 2 м тереңдікте, ал қалған топтары үшін 3 м тереңдікке сәйкес келеді.

Кесте 5. Тұздардың бетінен булануға және жер асты суларының пайда болу тереңдігіне тәуелділігі (Durasov et al., 1981; Gromotovich et al., 1987; Hoffan, 1986; Karpenko et al., 2017)

Жер асты суының минералдылығы, г/л	Бастапқы тұздану 0-1,0 м		Жер асты суының орналасу тереңдігі, м					Ескерту
	%	т/га	0,5	0,75	1	1,5	2	
Жер асты суы бетінен булану, м ³			1370	958	644	227	0	γ=1.37 т/м ³ ; n=0.7; H _{срк} =2м.
1,5	0,35	48	2,06	1,44	0,97	0,34	0,00	
			0,66	0,46	0,31	0,11	0,00	
2	0,6	82	2,74	1,92	1,29	0,45	0,00	
			1,13	0,79	0,53	0,19	0,00	
3	1	137	4,11	2,28	1,93	0,68	0,00	
			1,88	1,31	0,88	0,31	0,00	
5	1,5	206	6,85	4,79	3,22	1,13	0,00	
			2,82	1,97	1,32	0,47	0,00	
10	2	274	13,70	9,58	6,44	2,27	0,00	
			3,75	2,63	1,76	0,62	0,00	

5-кестедегі эмпирикалық мәліметтерді саралау барысында жер асты суларының минералдану деңгейі мен олардың орналасу тереңдігі арасындағы айқын корреляциялық тәуелділік анықталды. Су деңгейі жер бетіне жақындаған сайын булану қарқындылығының экспоненциалды түрде жоғарылайтыны байқалады. Тереңдік 0,5–1,0 м аралығында болғанда булану көлемі ең жоғары мәнделерге жетеді, ал 1,5–2,0 м тереңдікте булану көрсеткіштері күрт

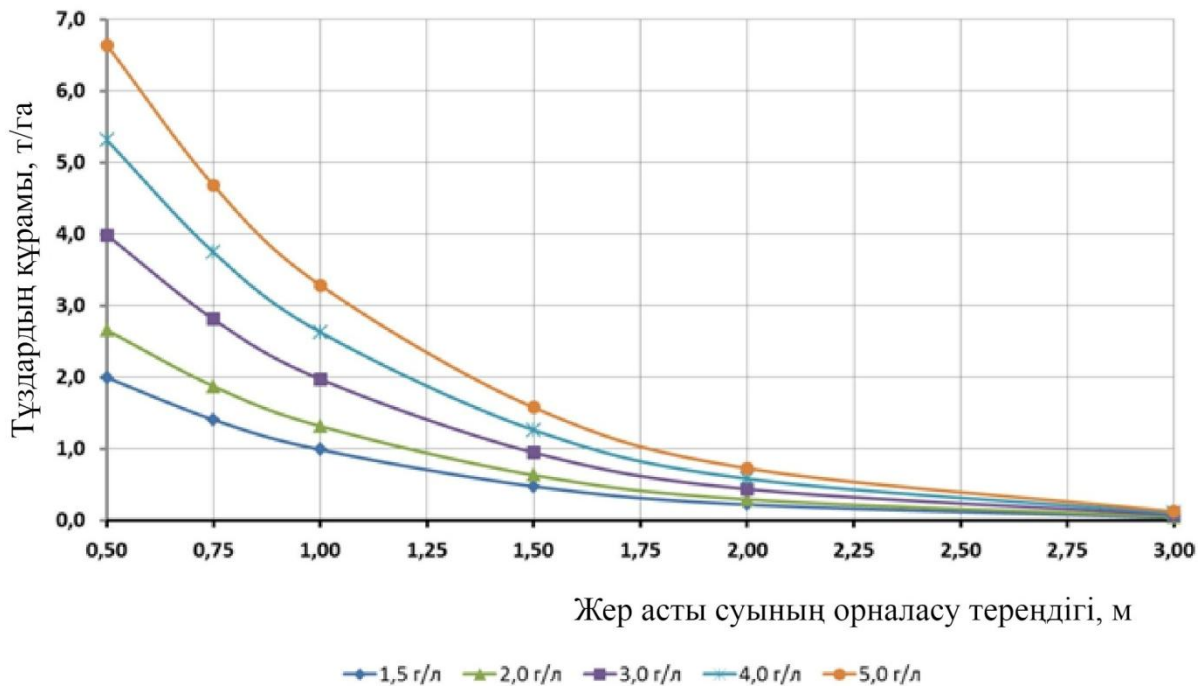
төмендейді немесе мүлдем байқалмайды. Бұл құбылыс капиллярлық көтерілу процесінің әлсіреуімен және топырақ қабатының су өткізгіштік қасиеттерінің өзгеруімен түсіндіріледі.

6-кестеде 5-кесте мәліметтері негізінде есептелген арифметикалық орташа мән мен стандартты ауытқу көрсеткіштері берілген. Статистикалық өңдеу нәтижелері беткі қабаттағы тұздардың булану қарқындылығы мен жер асты суларының орналасу тереңдігі арасындағы корреляциялық тәуелділікті жалпылама сипаттайды.

Кесте-6. Кесте деректері бойынша жалпыланған статистикалық көрсеткіштер

Көрсеткіш	Орташа мән	Стандартты ауытқу
Жер асты суының минералдылығы, г/л	3,70	3,26
Бастапқы тұздану, %	0,89	0,63
Бастапқы тұздану, т/га	149,4	86,55
Жер асты суы бетінен булану, м ³	82,16	394,45

Алынған параметрлер қарастырылып отырған гидрогеологиялық процестердің типтік заңдылықтары мен олардың өзгергіштік дәрежесін айқындайды.



Сурет 2. Жер асты суының орналасу тереңдігі

Тәжірибелік мәліметтерді статистикалық өңдеу нәтижелері жер асты суларының булану қарқындылығы мен олардың орналасу тереңдігі арасындағы өзара байланыстың экспоненциалды сипатқа ие екендігін айқындады. Аталған заңдылық келесі математикалық теңдеумен сипатталады:

$$E_e = E_0 \left(1 - \frac{H}{H_{\text{тск}}}\right) e^{-nH} \quad (7)$$

мұндағы: E_e -жер асты суларының булануы, м; E_0 -топырақ бетінің булануы, м; Н-жер асты суларының пайда болу тереңдігі; $H_{\text{тск}}$ -топырақтың су көтеру қабілеті, м; n-топырақтың су-физикалық қасиеттерін ескеретін параметр ($n = 0,7-1,5$)

Микрокеуектік құрылымдардағы ылғал тасымалының физикалық табиғаты күрделі әрі көпфакторлы болып табылады. Оған фазалық ауысулар (булану мен конденсация), осмостық құбылыстар, сорбциялық үдерістер және сазды минералдардың кристаллдық торындағы ион алмасулары тікелей әсер етеді. Дисперсті жүйелердегі иондардың бекітілу беріктігі су молекулаларының құрылымындағы сутектік байланыстардың энергетикалық деңгейіне тәуелді.

Саздақты қоңыр топырақтардағы тұздардың миграциясының судың фазалық күйіне сәйкес үш саласын (гравитациялық, капиллярлық және байланысқан) қарастыру қажет. Бұл салалар өзара байланысты болғанымен, олардағы тұз тасымалының динамикасы мен қарқындылығы әртүрлі параметрлермен сипатталады.

Қатты дисперсті (қышқылдық қасиеті жоғары) топырақтарды шаю кезінде минералдардың бөлінуі төмен деңгейде байқалады, бұл қолданылған су көлемі мен сүзілген ерітінді мөлшері арасындағы сәйкессіздікті тудырады. Бұл феномен ерітінділердің кеуекті ортадан конвективті тасымал арқылы ығысуымен түсіндіріледі.

Жүргізілген гидрогеологиялық зерттеулердің нәтижелері топырақ типтері мен олардың гранулометриялық құрамының сүзілу (фльтрация) процестеріне айтарлықтай әсер ететіндігін дәлелдейді. Әсіресе, тұзданған топырақ горизонттарындағы сүзілу динамикасы тұзсыздандыру технологияларының тиімділігі мен шаю режимдерін айқындайтын негізгі фактор болып табылады.

4. Талдау

Алынған нәтижелерді экологиялық тұрғыда талдау жер асты сулары режимінің өзгеруі суармалы агроландшафттардың тұрақтылығына тікелей әсер ететінін көрсетті. Жер асты суы деңгейінің 1,5–2,0 м-ден жоғары көтерілуі ауаландыру аймағының қысқаруына, топырақтағы газ алмасу процестерінің бұзылуына және өсімдік тамырларының оттегімен қамтамасыз етілуінің төмендеуіне әкеледі.

Экологиялық тұрғыдан алғанда, жер асты суларының минералдануы 2–4 г/л және одан жоғары болған жағдайда олардың бетке жақын орналасуы топырақтың тұздануын күшейтіп, фитоуытты орта қалыптастырады. Бұл жағдай өсімдіктердің физиологиялық стрессін арттырып, ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігінің төмендеуіне және биологиялық әртүрліліктің азаюына себеп болады.

Топырақтың тығыздалуы мен сүзілгіштігінің төмендеуі нәтижесінде қалыптасатын ылғалдың артық жиналуы органикалық қалдықтардың ыдырау үдерістерін өзгертеді, парниктік газдардың (метан, азот тотығы) бөлінуін күшейтуі мүмкін. Осылайша, жер асты сулары режимінің бұзылуы жергілікті деңгейде климаттық факторларға да жанама әсер етеді.

Жер асты суларының деңгейін ғылыми негізде реттеу экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің маңызды шарты болып табылады. Суару нормаларын оңтайландыру, дренаж жүйелерін жетілдіру және жер асты суларының тұрақты мониторингі агроэкожүйелердің деграациясын болдырмауға мүмкіндік береді. Бұл шаралар топырақтың экологиялық функцияларын сақтап, су ресурстарын ұтымды пайдалануға және өңірлік экологиялық тепе-теңдікті қамтамасыз етуге бағытталған.

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері жер асты сулары деңгейін басқару тек агротехникалық міндет ғана емес, сонымен қатар экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің негізгі тетігі екенін дәлелдейді. Суармалы жерлердегі жер асты суларының оңтайлы тәртібі топырақтың ұзақ мерзімді құнарлылығын, агроландшафттардың тұрақтылығын және өңірдің экологиялық қауіпсіздігін сақтаудың шешуші факторы болып табылады.

5. Қорытынды

Зерттеу барысында топырақтың гранулометриялық құрамы мен сулы-физикалық қасиеттеріне (әсіресе кеуектілігіне) негізделі отырып, жер асты сулардың деңгейлік режимі мен ықтимал орналасу тереңдігі анықталды. Бұл ретте судың минералдану дәрежесі, суару нормасы, маусымдық буландыру қарқындылығы және капиллярлық көтерілу процестері есепке алынды. Белгілі бір уақыт интервалындағы топырақ бетінің жабындысындағы ылғалдың жоғары бағытталған миграциясы мен топырақтың қанығу дәрежесіне сәйкес жер асты сулары деңгейінің көтерілу динамикасы нақтыланады. Жер асты суларының орташа көтерілу деңгейі топырақтың гидрофизикалық сипаттамаларына тікелей тәуелді екендігі дәлелденді.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация - Ә.С., Ж.Т.; әдістемесі - Қ.М.; бағдарламалық қамтамасыз ету - Г.З.; валидация - Ә.С., Ж.Т.; формалды талдау - Г.З.; зерттеу - Ә.С.; ресурстар - Г.З.; деректерді өңдеу - Ж.Т.; жазу - түпнұсқа жобасын дайындау, Ә.С.; жазу - шолу және өңдеу - Ж.Т.; визуализация - Қ.М.; жетекшілік - Ә.С. Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасымен танысып, келісті.

8. Автор туралы ақпарат

Сейітқазиев, Әдеубай - профессор, Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, Қ. Сәтпаев көшесі, 28, Тараз, Қазақстан, 080003, adeubai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2044-2442>

Түлеубаев, Жақсыбай - профессор, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Жамбыл даңғылы, 16А, Тараз, Қазақстан, 080003, tuleubayev51@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1563-1361>

Зияева, Гулнар - қауымдастырылған профессор, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Жамбыл даңғылы, 16А, Тараз, Қазақстан, 080003, gk.ziyaeva@dulaty.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7260-2164>

Мұсабеков, Қыдыралы - доцент, Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті, Қ. Сәтпаев көшесі, 28, Тараз, Қазақстан, 080003, musabekov55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0217-6400>

9. Қаржыландыру: бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (бағдарламалық-мақсатты қаржыландыру гранты №BR24992867).

10. Алғыстар: бұл зерттеу жұмысын жүргізуге қолдау білдірген М.Х. Дулати атындағы Тараз университетінің Басқарма мүшесі - Ғылым және цифрландыру жөніндегі проректор С.А. Орынбаевқа және ғылым бөлімінің қызметкерлеріне алғыс білдіреміз.

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. An, L. S., Zhao, Q. S., Ye, S. Y., Liu, G. Q., & Ding X. G. (2011). Water-salt interactions factors and vegetation effects in the groundwater ecosystem in Yellow River Delta. *Advances in Water Science*, 22(5), 689–695.

2. Arakelyan, A. A. (1980). Evaporation of moisture from soil surface (Ispareniye vlagi s poverkhnosti pochvy in Russian). *Proceedings of the Armenian Agricultural Institute (Trudy Armyanskogo sel'skokhozyaystvennogo instituta)*, 35, 27–31.
3. Blaylock, A. D. (1994). Soil salinity, salt tolerance and growth potential of horticultural and landscape plants (Extension Bulletin B-988R). University of Wyoming Cooperative Extension Service. <http://www.wyomingextension.org/agpubs/pubs/WY988.PDF>
4. Bresler, E., Maknil, B. L., & Karter, D. L. (1987). Solonchaks and solonetz soils. (Solonchaki i solontsy in Russian), *Leningrad: Gidrometeoizdat (Leningrad, Gidrometeoizdat)*, 296 p.
5. Deng, B. S., Wahap, H., Dang, J. H., Zhang, Y. P., & Xuan, J. W. (2015). Soil salinity dynamics and its driving factors in arid regions. *Arid Land Geography*, 38(3), 599–607.
6. Duan, Y. H., Gan, Y. Q., Wang, Y. X., Deng, Y. M., Guo, X. X., & Dong, C. J. (2015). Temporal variation of groundwater level and arsenic concentration at Jiangnan Plain, central China. *Journal of Geochemical Exploration*, 149, 106–119. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375674214003914>
7. Durasov, A. M., & Tazabekov, T. T. (1981). Soils of Kazakhstan (Pochvy Kazakhstana in Russian) (152 p.). Alma-Ata: Kaynar.
8. Gromotovich, M. K., Lev, V. T. (1987). Drainage on saline lands of Uzbekistan (Drenazh na zasolennykh zemlyakh Uzbekistana in Russian), 120 p.
9. Hoffman, G. J., Howell, T. A., Solomon, K. H., & Dedrick, R. D. (1986). Soil salinity on irrigated lands. In *Management of Farm Irrigation Systems*. American Society of Agricultural Engineers.
10. Karpenko, N. P., & Seitkaziyeu, A. S. (2017). Ecological and meliorative justification of the water–salt regime of saline soils in the Talas irrigation massif of the Zhambyl Region (Ekologo-meliorativnoe obosnovanie vodno-solevogo rezhima zasolennykh pochv Talasskogo massiva orosheniya Zhambylskoi oblasti in Russian). *Scientific-Practical Journal of Environmental Management (Prirodoobustroistvo nauchno-prakticheskii zhurnal)*, 4, 73–79. https://drive.google.com/file/d/1SyFEVZZMdr0-k1OmgecR0v0hzEM7ilgl/view?usp=drive_link
11. Karpenko, N. P., Seitkaziyeu, A. S., & Maimakova, A. K. (2017). Regulation of the water–salt regime of soils on saline lands of the ‘Tuimeken’ and ‘Dikhan’ farms in the Zhambyl Region (Regulirovanie vodno-solevogo rezhima pochv na zasolennykh zemlyakh khozyaistv “Tuimeken” i “Dikhan” Zhambylskoi oblasti in Russian). *Scientific-Practical Journal of Environmental Management (Prirodoobustroistvo nauchno-prakticheskii zhurnal)*, 3, 70–76. https://drive.google.com/file/d/1cRMnZ5DArH-WcCT0VcU9pimyh58mJhLM/view?usp=drive_link
12. Khachatryan, V. K., & Aidarov, I. P. (1991). Concept of improving ecological situation in Aral Sea basin (Kontseptsiya uluchsheniya ekologicheskoi i meliorativnoi situatsii v basseine Aralskogo morya in Russian). *Reclamation and Water Management (Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo)*, 1, 2–9. <https://drive.google.com/file/d/1G5hK-c17Y-osF78AX9ek0clhYB9P1ywL/view?usp=sharing>
13. Minkin, E. A., & Krasilshchikov, G. A. (1987). Rational use of water resources (Ratsionalnoe ispolzovanie vodnykh resursov in Russian). *Methodological Issues (Metodicheskie voprosy)*, M., Nauka, 8, 47–54.
14. Raiymbekov, D. B., Qutymbek, N. Zh., Seitqaziev, A. S., Musabekov, Q. Q., & Estaev, Q. A. (2022). Meliorative–ecological justification of the water–salt regime of hydromorphic soils (Gidromorfti topyraqtardyn suly-tuzdy qubylymyn meliorativti-ekologiyalyq negizdeu in Kazakh). *Bulletin of Korkyt Ata Kyzylorda University (Qorqyt Ata atyndağy Qyzylorda universitetiniñ Habarshysy)*, 61, 42–50. <https://doi.org/10.52081/bkaku.2022.v61.i2.040>
15. Seitkaziyeu, A. S., Khozhanov, N. N., Maimakova, A. K., & Seitkaziyeu, K. A. (2018). Environmental assessment of the studied area by salinity level. Research results – findings (İzdenister, nätijeler – İssledovaniya, rezul'taty), 1(77), 254–260.

- https://drive.google.com/file/d/1QX6vb8Tj55RK5oBQM4sWVwz34MArt8GV/view?usp=drive_link
16. Seitkazyev, A. S., Musabekov, K. K., Khozhanov, N. N., Seitkazyeva, K. A., & Maimakova, A. K. (2020). Method for increasing soil fertility (Sposob povysheniya plodorodiya pochvy in Russian). *National Institute of Intellectual Property (Natsional'nyy institut intellektual'noy sobstvennosti)*.
 17. Seitkazyev, A., Shilibek, K., Salybaiev, S., & Seitkazyeva, K. (2013). The research of the ground water supply process on irrigated soils at various flushing technologies. *World Applied Sciences Journal*, 26(9), 1168–1173. https://drive.google.com/file/d/12_zsKrYJrbOW-vcU-qzBLVRvScdtvkv/view?usp=drive_link
 18. Seitkazyev, A. S. (1999). Substantiation of hydrochemical reclamation on saline lands (Tuzdy zherlerdegi meliorativtik gidrokhimiyany negizdeu in Kazakh). *Publisher (Zharshy)*, 4, 48–56.
 19. Seitkazyev, A. S. (2002). Determination of the irrigation norms in saline soil layers based on their porosity and water saturation (Tuzdy topyraq qabatyndagy keuektiligi men sudyn qanyguyna saikes shaiyu molserin anyqtau in Kazakh). *Research (Izdenis)*, 3, 152–158.
 20. Seitkazyev, A. S. (2007). Effective methods for soil desalination in the reclaimed area (Aualandyru aimagyndagy topyraqty tuzsizdandyru dyn tiimdi tasilderi in Kazakh). *Bulletin of M.Kh. Dulati Taraz Regional University (M.Kh. Dulati atyndagy TarMU Khabarshysy)*, 4, 50–55.
 21. Seitkazyev, A. S. (2011). Techniques for implementing ecological–meliorative measures based on soil moisture (Topyraq ylgaldylygyna bailanysty ekologiyalyk-meliorativtik sharalardy qoldanu tasilderi in Kazakh). *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University (L.N. Gumilev atyndagy Euraziya ul'tyq universiteti Khabarshysy)*, 4(83), 146–149.
 22. Seitkazyev, A. S. (2013). Complex reclamation measures and modeling of salt transfer in saline soils (Kompleks meliorativnykh meropriyatii i modelirovanie perenosa solei na zasolennykh pochvakh in Russian). In *Materials of the International Scientific-Practical Conference (Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii)*, 82–86. https://drive.google.com/file/d/1JBcCEKz_aJQO2IU2MtQNpXUU11pbsB3o/view?usp=drive_link
 23. Seitkazyev, A. S. (2019). Ecological–meliorative justification of leaching norms for saline soils in the Zhambyl region (Ekologo-meliorativnoe obosnovanie promyvnykh norm zasolennykh pochv Zhambylskoi oblasti in Russian). In *Proceedings of the International Jubilee Scientific-Practical Conference (In Materialy mezhdunarodnoi yubileinoi nauchno-prakticheskoi konferentsii)*, Vol. 2, pp. 207–213. https://drive.google.com/file/d/1B4-VQbFKAALr47yNbTacRslmn6EkG7Vy/view?usp=drive_link
 24. Seitkazyev, A. S., & Budantsev, K. L. (2002). Modeling the water–salt regime of soils on saline lands (Modelirovanie vodno-solevogo rezhima pochv na zasolennykh zemlyakh in Russian). *Interuniversity Collection of Scientific Works (Mezhvuzov sbornik nauchnykh trudov)*, pp. 72–79. https://drive.google.com/file/d/168A_jskz7RFj2sXonN-fTy3Z88ZLkjl/view?usp=sharing
 25. Seitkazyev, A. S., Salybayev, S. Zh., & Abdeshov, K. B. (2020). Evaporation from the Groundwater Surface Depending on the Salinity of Soil and Groundwater (Isparenie s poverkhnosti gruntovykh vod v zavisimosti ot zasolennosti pochvogruntovykh vod in Russian). *Proceedings of the International Scientific-Practical Conference (In Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii)*, 1, 170–174. https://drive.google.com/file/d/1gAK3ZGGGFzyN790mxz-XdlnMHAJwIx1b/view?usp=drive_link

26. Seitkazyev, A. S., Tursynbaev, Kh. I., Musabekov, K. K., & Khozhanov, N. N. (2016). Disinfection of Irrigation Water Using Sodium Hypochlorite (Obezrazhivanie polivnoi vody s primeneniem gipokhlorita natriya in Russian). *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University (L.N. Gumilev atyndagy Euraziya ul'tyq universiteti Khabarshysy)*, 2(111), 352–356.
27. Sokolenko, E. A., Zelichenko, E. N., Kavokin, A. A. (1981). Theoretical principles of soil salinization - desalinization processes (Teoreticheskie osnovy protsessov zasoleniya-rassoleniya pochv in Russian). *Science (Nauka)*, 296. <https://drive.google.com/file/d/12e1KCpyoX44sKXXgtd9po-tmYiIxnWmx/view?usp=sharing>
28. Zagumenny, A. I. (1962). Control of soil salinity (Borba s zasoleniyem oroshaemykh zemel in Russian). Alma-Ata, 72 p. <https://drive.google.com/file/d/1JA5CysVQMRaG50YQfXwjvm8IFc2jQ-dl/view?usp=sharing>

Methods for determining the actual water levels of the buzz

Adeubay Seitkaziev, Zhaxybay Tuleubayev, Gulnar Ziyayeva, Kydyraly Musabekov

Abstract. The shortage of water in irrigated lands and the processes of water movement in cultivated fields is examined based on specific research. Methods for identifying factors influencing the rise of water levels in these fields are presented using empirical data. Statistical analysis was performed on data obtained from groundwater level monitoring. It was established that the average rate of groundwater rise directly depends on the depth of its occurrence. The dynamics of water levels are significantly affected by the moisture coefficient, soil density and porosity, filtration properties, and infiltration volume. Depending on the soil structure – specifically its thickness, density, and salinity – the mineralization level of groundwater, seasonal evaporation rates, capillary rise height, and potential threshold levels were determined. These research results are based on experimental data from agricultural fields, where the rise in groundwater levels plays a crucial role in land reclamation. The study shows that the hydrogeological justification of field investigations encompasses irrigation system regimes, reclamation planning, and the integrated use of water resources. These measures are based on hydrodynamic and hydrochemical forecasts of groundwater regimes and the water-salt balance of the aeration zone. Furthermore, the findings highlight the importance of systematic monitoring to ensure the sustainable productivity of irrigated lands. This scientifically grounded analysis optimizes reclamation measures and reduces the risk of secondary soil salinization. Ultimately, the study confirms that rational water resource management is a critical factor for regional environmental safety.

Keywords: soil evaporation; filtration coefficient; fertility; irrigated land; air exchange zone; soil density.

Методы определения точных уровней грунтовых вод

Адеубай Сейтказиев, Жаксыбай Тулеубаев, Гулнар Зияева, Кыдыралы Мусабеков

Аннотация. Дефицит воды на орошаемых землях и процессы ее движения на пахотных полях следует рассматривать на основе конкретных исследований. Методы определения факторов, влияющих на подъем воды на орошаемых полях, продемонстрированы на основе

точных данных. Проведен статистический анализ данных, полученных в результате мониторинга уровня грунтовых вод. Установлено, что средняя скорость подъема грунтовых вод напрямую зависит от глубины их залегания. На динамику уровня воды существенное влияние оказывают коэффициент влажности, плотность и пористость почвы, фильтрационные свойства, а также объем инфильтруемой воды. В зависимости от структуры почвы, ее мощности, плотности и степени засоления были определены уровни минерализации грунтовых вод, показатели сезонного испарения, высота капиллярного поднятия, а также глубина залегания и вероятные предельные уровни грунтовых вод. Приведенные результаты исследования основаны на данных экспериментальных работ, проведенных на сельскохозяйственных угодьях. Повышение уровня грунтовых вод играет важную роль в мелиорации. Результаты исследования показали, что гидрогеологическое обоснование полевых исследований включает режим оросительных систем, планирование мелиоративных мероприятий и комплексное использование водных ресурсов. Мелиоративные мероприятия и комплексное использование водных ресурсов основываются на гидродинамических и гидрохимических прогнозах режима грунтовых вод, а также на водно-солевом режиме пород зоны аэрации. Полученные результаты также подчеркивают важность контроля уровня грунтовых вод для поддержания устойчивой продуктивности орошаемых территорий. Научно обоснованный анализ позволяет оптимизировать мелиоративные мероприятия и снизить риск вторичного засоления почв. Выводы исследования доказывают, что эффективное управление водными ресурсами является решающим фактором региональной экологической безопасности.

Ключевые слова: испарение из почвы; коэффициент фильтрации; плодородие; орошаемые земли; зона газообмена; плотность почвы.

Редактор: **А. Зандыбай**

Авторларға арналған нұсқаулықтар,
жарияланым этикасы журнал сайтында енгізілген: <http://jes.enu.kz>

Journal of Ecology and Sustainability.
– 1 (154)/2026 – Астана: ЕҰУ. 155 б.
Шартты б.т. – 20.43. Таралымы – сұраныс бойынша.
Басуға қол қойылды: 31.03.2026
Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://jes.enu.kz>

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қажымұқан көшесі, 13.
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті Тел.: +7(71-72) 70-95-00
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің баспасында басылды