

ISSN (Print) 3107-278X

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ BULLETIN

ВЕСТНИК

of L.N. Gumilyov
Eurasian National University

Евразийского национального
университета имени Л.Н. Гумилева

ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ сериясы

CHEMISTRY. GEOGRAPHY Series

Серия ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ

№ 3(156)/2026

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

Редакция алқасы: Бас редактор (химия): Досмағамбетова С.С.

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

Бас редактор (география): Сергеева А.М.

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

Жауапты хатшы

(химия):

Уәли А.С.

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

Жауапты хатшы

(география):

Оспан Г.

оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Редакция алқасы:

Химия

Guven O.

PhD, проф., Хаджеттепе университеті, Анкара, Түркия

Досмағамбетова С.С.

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

Заборонок А.А.

м.ғ.к., қауымдас.проф., Цукуба университеті, Цукуба, Жапония

Корольков И.В.

PhD, қауымдас.проф., Ядролық физика институты, Астана, Қазақстан

Лобанов Ф.И.

х.ғ.д., проф., «КНТП» ЖШҚ компаниялар тобы, Мәскеу, Ресей

Ломова М.В.

ф-м.ғ.к., қауымдас.проф., Н.Г. Чернышевский атындағы Саратов мемлекеттік университеті, Саратов, Ресей

Мельникова Г.Б.

т.ғ.к., қауымдас.проф., Ұлттық ғылым академиясының А.В. Лыков атындағы жылу және масса алмасу институты, Минск, Беларусь

Нұрпейісова Д.Т.

PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Оспанова А.К.

х.ғ.д., проф., Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Пискунов С.Н.

ж.ғ.д., а.ғ.к., Латвия университеті, Рига, Латвия

Ruffer T.

PhD, проф., Хемниц техникалық университеті, Хемниц, Германия

Сманова З.А.

х.ғ.д., проф., М. Улутбек атындағы Өзбекстан ұлттық университеті, Ташкент, Өзбекстан

Тосмағанбетова К.С.

PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Турсынова А.К.

х.ғ.к., доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Уәли А.С.

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

Фатхуллаева М.

х.ғ.к., проф., Ташкент фармацевтикалық институты, Ташкент, Өзбекстан

Хаитбаев А.Х.

х.ғ.д., проф., М. Улутбек атындағы Өзбекстан ұлттық университеті, Ташкент, Өзбекстан

Хуторянский В.В.

PhD, проф., Рединг Университеті, Рединг, Ұлыбритания

География

Атасой Е.	PhD, проф., Бурса-Улудаг Университеті, Бурса, Түркия
Берденов Ж.Ғ.	PhD, проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Wendt J.A.	DSc, проф., Гданьск университеті, Гданьск, Польша
Гнатюк О.М.	г.ғ.к., қауымдас.проф., Т. Шевченко атындағы Киев ұлттық университеті, Киев, Украина
Даньшин А.И.	г.ғ.к., қауымдас.проф., М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті, Мәскеу, Ресей
Дылдаев М.М.	г.ғ.д., проф., Қ. Қарасаев атындағы Бішкек мемлекеттік университеті, Бішкек, Қырғыз Республикасы
Егинбаева А.Е.	PhD, қауымдас.проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Ибрагимов Л.З.	DSc, проф., Ш. Рашидов атындағы Самарканд мемлекеттік университеті, Самарканд, Өзбекстан
Илиес А.	PhD, проф., Орадя университеті, Орадя, Румыния
Кәкімжанов Е.	PhD, қауымдас.проф., Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
Петрович М.Д.	PhD, Jovan Cvijic атындағы география институты, Белград, Сербия
Озгелдинова Ж.О.	PhD, проф. м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Оспан Г.	оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Сапаров Қ.Т.	г.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Сергеева А.М.	г.ғ.к., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Холина В.Н.	г.ғ.к., қауымдас.проф., РУДН университеті, Мәскеу, Ресей

Редакцияның мекен-жайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2,
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 402 б.
Тел.: +7 (7172) 709-500, (ішкі 33-207). **E-mail:** vest_chem@enu.kz
Техникалық хатшы: Тосмағанбетова Күлди Сулейменовна

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

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

Мерзімділігі: жылына 4 рет

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігінде 05.12.2025 ж. № KZ13VPY00135983 тіркеу куәлігімен тіркелген

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

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

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

Editorial board: Editor-in-Chief (Chemistry): Dosmagambetova S.S.

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

Editor-in-Chief (Geography): **Sergeyeva A.M.**

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

Executive Secretary

(Chemistry):

Uali A.

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

Executive Secretary

(Geography):

Ospan G.

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

**Editorial board
Chemistry**

Guven O.

PhD, Prof., Hacettepe University, Ankara, Türkiye

Dosmagambetova S.S.

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

Zaboronok A.A.

Cand.Med.Sci., Assoc.Prof., University of Tsukuba, Tsukuba, Japan

Korolkov I.V.

PhD, Assoc.Prof., Institute of Nuclear Physics, Astana, Kazakhstan

Lobanov F.I.

Dr.Chem.Sci., Prof., LLC group of companies «CIET», Moscow, Russian Federation

Lomova M.V.

Cand.Phys-Math.Sci., Assoc.Prof., N.G. Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, Russian Federation

Melnikova G.B.

Cand.Tech.Sci., Assoc.Prof., A.V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences, Minsk, Belarus

Nurpeisova D.T.

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

Ospanova A.K.

Dr.Chem.Sci., Prof., Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Piskunov S.N.

Dr.Nat.Sci., SR, University of Latvia, Riga, Latvia

Ruffer T.

PhD, Prof., Chemnitz University of Technology, Chemnitz, Germany

Smanova Z.A.

Dr.Chem.Sci., Prof., M. Ulugbek National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Tosmaganbetova K.S.

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

Tursynova A.K.

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

Uali A.S.

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

Fatkhullaeva M.

Dr.Chem.Sci., Prof., Tashkent Pharmaceutical Institute, Tashkent, Uzbekistan

Khaitbaev A.Kh.

Dr.Chem.Sci., Prof., M. Ulugbek National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Khutoryanskiy V.V.

PhD, Prof., University of Reading, Reading, United Kingdom

Geography

Atasoy E.	PhD, Prof., Bursa Uludağ University, Bursa, Türkiye
Berdenov Zh.G.	PhD, Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Wendt J.A.	DSc, Prof., University of Gdansk, Gdansk, Poland
Gnatiuk O.M.	Cand.Geog.Sci., Assoc.Prof., T. Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
Danshin A.I.	Cand.Geog.Sci., Assoc.Prof., M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
Dyldaev M.M.	Dr.Geog.Sci., Prof., K. Karasayev Bishkek State University, Bishkek, Kyrgyz Republic
Yeginbayeva A.Y.	PhD, Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Ibragimov L.Z.	DSc, Prof., Sh. Rashidov Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan
Ilieş A.	PhD, Prof., University of Oradea, Oradea, Romania
Kakimzhanov Y.	PhD, Assoc.Prof., Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
Petrović M.D.	PhD, Senior Research, Jovan Cvijic Institute of Geography, Belgrade, Serbia
Ozgeldinova Zh.O.	PhD, Act.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Ospan G.	Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Saparov K.T.	Dr.Geog.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Sergeyeva A.M.	Cand.Geog.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Kholina V.N.	Cand.Geog.Sci., Assoc.Prof., RUDN University, Moscow, Russian Federation

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

Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University.

Chemistry. Geography Series

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

Periodicity: 4 times a year

Registered by the Ministry of Information and Communication of the Republic of Kazakhstan Registration certificate № KZ13VPY00135983 from 05.12.2025

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

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

Редакционная коллегия: Главный редактор (химия): Досмагамбетова С.С.
д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Главный редактор (география):	Сергеева А.М. к.г.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан
Ответственный секретарь (химия):	Уали А.С. к.х.н., ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Ответственный секретарь (география):	Оспан Г. преподаватель, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Редакционная коллегия:
Химия

Guven O.	PhD, проф., Университет Хаджеттепе, Анкара, Турция
Досмагамбетова С.С.	д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Заборонок А.А.	к.м.н., ассоц.проф., Университет Цукуба, Цукуба, Япония
Корольков И.В.	PhD, ассоц.проф., Институт ядерной физики, Астана, Казахстан
Лобанов Ф.И.	д.х.н., проф., ООО группа компаний «КНТП», Москва, Российская Федерация
Мельникова Г.Б.	к.т.н., ассоц.проф., Институт тепло- и массопереноса им. А.В. Лыкова Национальной академии наук, Минск, Беларусь
Нурпейсова Д.Т.	PhD, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Оспанова А.К.	д.х.н., проф., Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
Пискунов С.Н.	д.ест.н., СНС, Латвийский университет, Рига, Латвия
Ruffer T.	PhD, проф., Технологический университет Хемница, Хемниц, Германия
Сманова З.А.	д.г.н., проф., Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека, Ташкент, Узбекистан
Тосмаганбетова К.С.	PhD, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Турсынова А.К.	к.х.н., и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Уали А.С.	к.х.н., ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Фатхуллаева М.	к.х.н., проф., Ташкентский фармацевтический институт, Ташкент, Узбекистан
Хаитбаев А.Х.	д.х.н., проф., Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека, Ташкент, Узбекистан
Хуторянский В.В.	PhD, проф., Университет Рединга, Рединг, Объединенное Королевство

География

Атасой Е.	PhD, проф., Университет Бурсы-Улудаг, Бурса, Турция
------------------	---

Берденов Ж.Г.	PhD, проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Wendt J.A.	DSc, проф., Университет Гданьска, Гданьск, Польша
Гнатюк О.М.	к.г.н., ассоц.проф., Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, Киев, Украина
Даньшин А.И.	к.г.н., ассоц.проф., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
Дылдаев М.М.	д.г.н., проф., Бишкекский государственный университет им. К. Карасаева, Бишкек, Кыргызская Республика
Егинбаева А.Е.	PhD, ассоц. проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Ибрагимов Л.З.	DSc, проф., Самаркандский государственный университет им. Ш. Рашидова, Самарканд, Узбекистан
Илиес А.	PhD, проф., Университет Орадя, Орадя, Румыния
Какимжанов Е.	PhD, ассоц.проф., Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
Петрович М.Д.	PhD, Институт географии им. Jovan Cvijić, Белград, Сербия
Озгелдинова Ж.О.	PhD, и.о. проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Оспан Г.	преподаватель, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Сапаров К.Т.	д.г.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Сергеева А.М.	к.г.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Холина В.Н.	к.г.н., ассоц.проф., Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Российская Федерация

Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2,
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, каб. 402
Тел.: +7(7172) 709-500, (вн. 33-207). **E-mail:** vest_chem@enu.kz
Технический секретарь: Тосмаганбетова Кулди Сулейменовна

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева.

Серия Химия. География

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

Периодичность: 4 раза в год

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан Регистрационное свидетельство № KZ13VPY00135983 от 05.12.2025 г.

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

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

МАЗМҰНЫ/ CONTENT/ СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ/ CHEMISTRY

- А. Аронова, Х. Рафикова, Б. Селенова, Д. Адиканова, Р. Искаков, Г. Шамбилова**
Сутекті тасымалдау реакцияларындағы гомогенді және гетерогенді Pt(II) комплекстерінің синтезі мен каталитикалық қасиеттері
А. Аронова, Х. Рафикова, Б. Селенова, Д. Адиканова, Р. Искаков, Г. Шамбилова
Синтез и каталитические свойства гомогенных и гетерогенных Pt(II) комплексов в реакциях переноса водорода
A. Aronova, K. Rafikova, B. Selenova, D. Adikanova, R. Iskakov, G. Shambilova
Synthesis and catalytic properties of homogeneous and heterogeneous Pt(II) complexes in transfer hydrogenation reactions 11
- Д. Әсержанов, Ж. Касымова, А. Кливенко, Н. Омарова, Э. Абдуллина**
Хитозанмен тұрақтандырылған күміс нанобөлшектерін алу және бактерияға қарсы концентрациясын бағалау
Д. Асержанов, Ж. Касымова, А. Кливенко, Н. Омарова, Э. Абдуллина
Получение и оценка антибактериальной концентрации хитозан-стабилизированных наночастиц серебра
D. Asserzhanov, Zh. Kassymova, A. Klivenko, N. Omarova, E. Abdullina
Preparation and evaluation of the antibacterial concentration of chitosan-stabilized silver nanoparticles 23
- Г. Байсалова, Б. Ертай, К. Тосмаганбетова, А. Талтенов, А. Бердгалеева**
Ионометрия әдісінің көмегімен өсімдіктер мен қына сығындыларындағы бейорганикалық компоненттерді анықтау
Г. Байсалова, Б. Ертай, К. Тосмаганбетова, А. Талтенов, А. Бердгалеева
Определение неорганических компонентов в экстрактах растений и лишайника методом ионометрии
G. Baisalova, B. Yertay, K. Tosmaganbetova, A. Taltenov, A. Berdgaleyeva
Determination of inorganic components in extracts of plants and lichen by ionometry 38
- А. Бекмаханова, М. Егамкулов, Ж. Бахытжанова, Г. Тажкенова, А. Нурпеисова, Ж. Бакенов, А. Муканова**
Балқытылған флюс әдісімен синтезделген NASICON типті LATP қатты электролиттерінің литий мөлшеріне тәуелді иондық өткізгіштігі
А. Бекмаханова, М. Егамкулов, Ж. Бахытжанова, Г. Тажкенова, А. Нурпеисова, Ж. Бакенов, А. Муканова
Влияние содержания лития на ионную проводимость NASICON-подобных твердых электролитов LATP, синтезированных методом расплавленного флюса
A. Bekmakhanova, M. Yegamkulov, Zh. Bakhytzhanova, G. Tazhkenova, A. Nurpeissova, Zh. Bakenov, A. Mukanova
Lithium-content-dependent ionic conductivity of NASICON-type LATP solid electrolytes synthesized by the Molten Flux Method 51

- Н. Мұхаметғазы, Н. Бектенов, Ж. Мукатаева, М. Сулейменова, К. Сарсекова**
Мұнай төгінділерін тазалауға арналған жетілдірілген сорбенттер: материалдар, әдістер және болашақ перспективалар
- Н. Мұхаметғазы, Н. Бектенов, Ж. Мукатаева, М. Сулейменова, К. Сарсекова**
Современные сорбенты для ликвидации разливов нефти: материалы, методы и перспективы развития
- N. Mukhametgazy, N. Bektenov, Zh. Mukatayeva, M. Suleimenova, K. Sarsekova**
Advanced sorbents for oil spill cleanup: materials, methods, and future perspectives 66
- Л. Толымбекова, Н. Успанова, Г. Сейтенова**
Көлденең жол таңбалары үшін суық пластикті қолданудың тиімділігін талдау
- Л. Толымбекова, Н. Успанова, Г. Сейтенова**
Анализ эффективности применения холодного пластика для горизонтальной дорожной разметки
- L. Tolymbekova, N. Usanova, G. Seitenova**
Analysis of the effectiveness of using cold plastic for horizontal road markings 92
- М. Шрубок, Г. Мельникова, Д. Сапсалиев, Т. Толстая, С. Чижик**
Поли(9-винилкарбазол) және полиметилметакрилат қоспалары негізіндегі Ленгмюр-Блоджетт пленкаларының құрылымы мен қасиеттері
- М. Шрубок, Г. Мельникова, Д. Сапсалиев, Т. Толстая, С. Чижик**
Структура и свойства пленок Ленгмюра-Блоджетт на основе смесей поливинилкарбазола и полиметилметакрилата
- M. Shrubok, G. Melnikova, D. Sapsaliou, T. Tolstaya, S. Chizhik**
Structure and properties of Langmuir-Blodgett films based on poly(9-vinylcarbazole) and poly(methyl methacrylate) blends 113

ГЕОГРАФИЯ/ GEOGRAPHY

- И. Акбар, Г. Кубесова, А. Саулембаев, З. Мырзалиева, М. Галимов, М. Мамадияров**
Алтай өңірінде трансшекаралық туризмді дамытудың стратегиялық келешегі: геоақпараттық талдау және кеңістіктік модельдеу
- И. Акбар, Г. Кубесова, А. Саулембаев, З. Мырзалиева, М. Галимов, М. Мамадияров**
Стратегические перспективы развития трансграничного туризма в Алтайском регионе: геоинформационный анализ и пространственное моделирование
- I. Akbar, G. Kubessova, A. Saulembayev, Z. Myrzaliyeva, M. Galimov, M. Mamadiyarov**
Strategic prospects for the development of cross-border tourism in the Altai region: geoinformation analysis and spatial modeling 124
- А. Арыстанов, Р. Арыстанова, Г. Кабжанова, Ж. Сагин, Д. Абдихалықова, А. Мамаева**
Қазақстанның шығыс және оңтүстік-шығыс өңірлерінде гидрологиялық талдау мен аумақтық жоспарлау міндеттері үшін жер бедерін цифрлық модельдеу
- А. Арыстанов, Р. Арыстанова, Г. Кабжанова, Ж. Сагин, Д. Абдихалықова, А. Мамаева**
Цифровое моделирование рельефа для задач гидрологического анализа и территориального планирования в восточных и юго-восточных регионах Казахстана
- A. Arystanov, R. Arystanova, G. Kabzhanova, J. Sagin, N. Kutymova, D. Abdikhalykova, A. Mamayeva**
Digital terrain modeling for hydrological analysis and territorial planning in eastern and southeastern regions of Kazakhstan 141
- Е. Нуркеев, Е. Тулегенов**
Цифрлық технологиялар мен модельдеуді интеграциялау арқылы геоморфологияны оқытуда зерттеу құзыреттіліктерін дамыту
- Е. Нуркеев, Е. Тулегенов**
Развитие исследовательских компетенций при обучении геоморфологии посредством интеграции

Synthesis and catalytic properties of homogeneous and heterogeneous Pt(II) complexes in transfer hydrogenation reactions

Akbota Aronova¹, Kadichakhan Rafikova^{1*}, Bagadat Selenova¹, Dinara Adikanova¹, Rinat Iskakov¹, Gulbarshin Shambilova²

¹K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical university, Almaty, Kazakhstan; aronova.akbota@mail.ru, kh.rafikova@satbayev.university, b.selenova@satbayev.university, d.adikanova@satbayev.university, rm.iskakov@gmail.com

²Kh. Dosmukhamedov Atyrau University, Atyrau, Kazakhstan; shambilova_gulba@mail.ru

*Correspondence: kh.rafikova@satbayev.university

Citation: Aronova, A., Rafikova, K., Selenova, B., Adikanova, D., Iskakov, R., Shambilova, G. (2026). Synthesis and catalytic properties of homogeneous and heterogeneous Pt(II) complexes in transfer hydrogenation reactions. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 156(3), 11-22. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-11-22>

Academic Editor:
S.S. Dosmagambetova

Received: 07.07.2026

Revised: 10.09.2026

Accepted: 29.09.2026

Published: 30.09.2026



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. In this study, homogeneous and heterogeneous Pt(II) complexes based on phosphinite ligands containing ionic liquid fragments were synthesized and investigated as catalytic systems for transfer hydrogenation reactions. The homogeneous Pt(II) complex $[\text{PtCl}_2((\text{PPh}_2\text{O}_2\text{C}_7\text{H}_{14}\text{N}_2)_2)]\text{Cl}_2$ was synthesized and characterized by $^{31}\text{P}\{^1\text{H}\}$ NMR, ^1H NMR, ^{13}C NMR, IR spectroscopy, and elemental analysis. The obtained spectroscopic data confirmed the formation of a structurally well-defined square-planar Pt(II) complex.

To obtain a heterogeneous catalytic system, the Pt(II) complex was immobilized onto aminomethylated polystyrene. The polymer-supported catalyst was characterized by SEM and EDX analyses, which confirmed successful incorporation of Pt(II) species into the polymer matrix with a platinum loading of 0.25 wt. %.

The catalytic activities of both homogeneous and heterogeneous Pt(II) complexes were evaluated in the transfer hydrogenation of ketones using isopropanol as the hydrogen donor in the presence of KOH. The homogeneous Pt(II) catalyst exhibited excellent catalytic activity, achieving high conversion values within short reaction times. The heterogeneous catalyst also exhibited good catalytic performance together with practical advantages such as facile separation from the reaction medium and potential catalyst recyclability.

The obtained results demonstrate that Pt(II) complexes based on phosphinite ligands containing ionic liquid fragments represent promising catalytic systems for transfer hydrogenation reactions. The combination of high catalytic activity, structural stability, and heterogeneous catalyst recoverability makes these systems attractive for further applications in sustainable catalytic processes.

Keywords: Pt(II) complexes; phosphinite ligands; ionic liquid fragments; heterogeneous catalyst; transfer hydrogenation; ketones; polymer-supported catalyst.

1. Introduction

Hydrogenation is a core technology in chemical and petrochemical synthesis. For the petrochemical industry, many of the compounds found in crude oil are of little use since they contain multiple double bonds; they must be first converted to saturated compounds before use as commodities such as gasoline. In addition, countless other molecules are produced from petroleum; hydrogenation is most often the first step in their production. High rates and selectivities are attainable only by the coordination of structurally well-designed catalysts and suitable reaction conditions.

Transition-metal catalyzed processes for transfer hydrogenation of a wide variety of functional groups by different hydrogen donors are interesting alternatives to molecular hydrogenation (Johnson et al., 2021; Nekrasov et al., 2025; Rafikova et al., 2014a, 2014b; Xie & Török, 2022).

Ketones are the most common unsaturated substrates used in organic synthesis. Extensive efforts have been devoted to their reduction into secondary alcohols, especially via hydrogenation. The hydrogenation of ketones, which is one of the most exciting and powerful methods of synthesizing alcohols, has been receiving increased attention and has led to extraordinary success (Lee & Kim, 2018; Rafikova et al., 2013a, 2013b).

In particular, the catalytic transfer hydrogenation of ketones is one of the most attractive methods for synthesizing secondary alcohols, which form an important class of intermediates for fine chemicals and pharmaceuticals. The hydrogen transfer from 2-propanol to ketones is an elegant and economical method owing to its operational simplicity, since no hydrogen gas is required, enabling the avoidance of high-pressure equipment, as well as many favorable properties of the reductant; for example, it is stable, easy to handle, non-toxic, and inexpensive. Moreover, when 2-propanol is used as a hydrogen donor, the only side product is acetone, which is easily removed by distillation during workup (Aydemir et al., 2014; Rafikova et al., 2014a, 2014b, 2014c; Zazybin et al., 2014).

Catalytic hydrogenation reactions occupy a central position in the modern chemical industry and in fine organic synthesis. The reduction of carbon–carbon multiple bonds, as well as carbonyl, nitro, and other functional groups with hydrogen in the presence of metal-complex catalysts provides access to a wide range of valuable products, including pharmaceutical substances, agrochemicals, monomers, fine chemicals, and biologically active compounds (Claver, 2017; Meriç et al., 2014; Ningthoujam, 2022; Rafikova et al., 2014a, 2014b; Ragini & Jaya, 2019; Somwanshi et al., 2020).

Among the noble metals, platinum occupies a special position owing to its exceptional ability to activate molecular hydrogen under mild conditions, its high selectivity, and its tolerance to various functional groups. Platinum(II) complexes - in particular, derivatives of $K_2[PtCl_4]$ and phosphine complexes of the type $cis/trans-[Pt(PR_3)_2X_2]$ - are widely employed in both homogeneous and heterogeneous catalysis (Rafikova et al., 2014; Zazybin et al., 2014).

Homogeneous platinum catalysts provide a high degree of molecular uniformity of active sites, which accounts for their outstanding selectivity and the possibility of fine-tuning electronic and steric parameters by varying the ligand environment. However, the main drawbacks of homogeneous catalysis - the difficulty of separating the catalyst from the reaction products and the limited possibility of catalyst reuse - stimulate the development of heterogenized systems (Chen et al., 2022; Tungatarova & Zakumbayeva, 2020).

Heterogeneous catalysts based on platinum nanoparticles supported on oxide supports ($\gamma-Al_2O_3$, SiO_2 , TiO_2) or carbon materials combine high catalytic activity with technological simplicity of separation and regeneration. The nature of the support, the size of the nanoparticles, and the electronic state of the surface platinum atoms have a decisive influence on the activity and selectivity of such systems (Li & Chen, 2020; Masson et al., 2024; Rafikova et al., 2024).

Despite considerable progress in the study of platinum catalysts, systematic comparative investigations of homogeneous and heterogeneous Pt(II) complexes prepared by a unified methodology from common precursors remain relatively scarce. Establishing correlations of the "composition–structure–catalytic activity" type is of both fundamental and applied interest (Jia et al., 2022).

The aim of this work is to synthesize Pt(II) complexes based on phosphinite ligands and their polymer-supported analogues, and to study their catalytic activity in transfer hydrogenation reactions. Special attention is given to comparing homogeneous and heterogeneous systems and evaluating the effect of immobilization on catalytic performance.

2. Materials and Methods

2.1. Reagents and materials

Pt(cod)Cl₂ (dichloro(1,5-cyclooctadiene)platinum(II)), aminomethylated polystyrene, triethylamine (NEt₃), potassium hydroxide (KOH), dioxane, dichloromethane (CH₂Cl₂), chloroform, petroleum ether, ethanol, acetone, and isopropanol (iso-PrOH) were purchased from Sigma-Aldrich and used without further purification unless otherwise stated.

All reactions involving platinum complexes were carried out under an argon atmosphere using dry solvents. Degassed isopropanol was used as the hydrogen donor solvent in catalytic transfer hydrogenation reactions. Ketone substrates used in the catalytic studies were of analytical grade and employed without additional purification.

The synthesized homogeneous Pt(II) complex was characterized by ³¹P{¹H} NMR, ¹H NMR, ¹³C NMR, IR spectroscopy, and elemental analysis. The heterogeneous polymer-supported Pt(II) catalyst was characterized using SEM and EDX analyses.

2.2. Synthesis of [PtCl₂((PPh₂O₂C₇H₁₄N₂)₂)]Cl₂

Pt(cod)Cl₂ (0.047 g, 0.13 mmol) and phosphinite ligand [(Ph₂PO)-C₇H₁₄N₂Cl]Cl (0.10 g, 0.25 mmol) were dissolved in dry dichloromethane (CH₂Cl₂, 25 mL) under an argon atmosphere. The reaction mixture was stirred overnight at room temperature. After completion of the reaction, the solvent volume was reduced to approximately 1–2 mL under reduced pressure. Petroleum ether (20 mL) was added to precipitate the platinum(II) complex as a white solid. The obtained precipitate was collected by filtration, washed with petroleum ether, and dried under vacuum.

The yield was 0.12 g (88 %). The melting point of the obtained complex was found to be 197–209 °C.

The synthesized complex was characterized by ³¹P{¹H} NMR, ¹H NMR, ¹³C NMR, IR spectroscopy, and elemental analysis.

2.3. Synthesis of Pt (II) complexes based on polymer-anchored ionic liquids containing diphenyl groups

Aminomethylated polystyrene (0.022 g) was pre-swollen in dioxane (10 mL) for 1 h at room temperature. Then, a chloroform solution of the Pt(II) complex (0.011 g) was added. Triethylamine (NEt₃) was introduced as a base, and the reaction mixture was refluxed under continuous stirring.

After completion of the reaction, the mixture was cooled to room temperature. The obtained dark yellow solid was separated by filtration and washed successively with hot dioxane and hot ethanol to remove unreacted species and physically adsorbed compounds. The product was then dried in an air oven.

The synthesized polymer-anchored Pt(II) complex was characterized by SEM and EDX analyses. According to EDX results, the platinum content in the supported complex was determined to be 0.25 wt.%.

2.4. General Procedure for the transfer hydrogenation of ketones

The catalytic transfer hydrogenation reactions were carried out using homogeneous and heterogeneous Pt(II) catalysts. In a typical experiment, the corresponding Pt(II) catalyst (0.005 mmol), KOH (0.025 mmol), and ketone substrate (0.5 mmol) were mixed in degassed isopropanol (iso-PrOH, 5 mL). The reaction mixture was refluxed under continuous stirring until completion of the reaction.

After completion, an aliquot of the reaction mixture was withdrawn, diluted with acetone, and analyzed immediately by gas chromatography (GC). The conversion values were calculated based on the amount of residual unreacted ketone.

For the heterogeneous catalytic system, the polymer-supported Pt(II) catalyst was separated from the reaction mixture by filtration after completion of the reaction, washed with isopropanol, and dried for possible reuse.

3. Results and Discussion

3.1. Characterization of homogeneous Pt(II) complex

The Pt(II) complex $[\text{PtCl}_2((\text{PPh}_2\text{O}_2\text{C}_7\text{H}_{14}\text{N}_2)_2)]\text{Cl}_2$ was successfully synthesized via the coordination of $\text{Pt}(\text{cod})\text{Cl}_2$ with the corresponding phosphinite ligand in dry dichloromethane under an inert argon atmosphere. The reaction proceeded efficiently under mild conditions, affording the target complex as a white crystalline solid in high yield (88 %). The relatively narrow melting point range (197–209 °C) indicates the formation of a structurally well-defined and pure compound.

The coordination environment around the platinum center was elucidated by multinuclear NMR spectroscopy. The $^{31}\text{P}\{^1\text{H}\}$ NMR spectrum exhibits a single sharp resonance at $\delta = 77.12$ ppm, accompanied by a large platinum–phosphorus coupling constant ($J(\text{P-Pt}) = 4273.6$ Hz), which is characteristic of a direct coordination of phosphorus atoms to a Pt(II) center in a square-planar geometry. The presence of a single phosphorus signal suggests a symmetrical coordination. $^{31}\text{P}\{^1\text{H}\}$ NMR spectrum of the synthesized complex can be seen in Figure 2.

The ^1H NMR spectrum displays well-resolved signals corresponding to the ligand framework. The multiplet in the region of 7.13–7.78 ppm is assigned to aromatic protons of the diphenylphosphinite moieties, while the signals in the range of 3.80–4.94 ppm correspond to methylene groups (NCH_2 and CH_2Cl). The singlet at $\delta = 10.14$ ppm is attributed to the imidazolium-type proton, confirming the preservation of the ionic liquid fragment in the complex structure.

Further structural confirmation was obtained from the ^{13}C NMR spectrum, which shows characteristic resonances for aliphatic carbons (36.55–52.52 ppm), carbon atoms bonded to phosphorus (78.45 ppm, exhibiting P–C coupling), and aromatic carbons in the range of 122–140 ppm. The observed coupling patterns are consistent with the coordination of phosphinite ligands to the platinum center.

The IR spectrum provides additional evidence for the formation of the complex, with characteristic bands observed at 3053 cm^{-1} (aromatic C–H stretching), 1436 cm^{-1} (P–Ph vibrations), and 1045 cm^{-1} (P–O stretching), along with low-frequency bands at 303 and 283 cm^{-1} attributable to Pt–Cl stretching modes.

Elemental analysis data are in excellent agreement with the calculated values, confirming the proposed molecular composition and high purity of the synthesized complex. Taken together, the spectroscopic and analytical data confirm the successful synthesis of a well-defined Pt(II) complex featuring phosphinite ligands derived from ionic liquid fragments.

The obtained spectroscopic and analytical data clearly confirm the successful formation of a stable square-planar Pt(II) complex coordinated by phosphinite ligands containing ionic liquid fragments. The reaction formula for the synthesis of the homogeneous Pt(II) complex is shown in Figure 1.

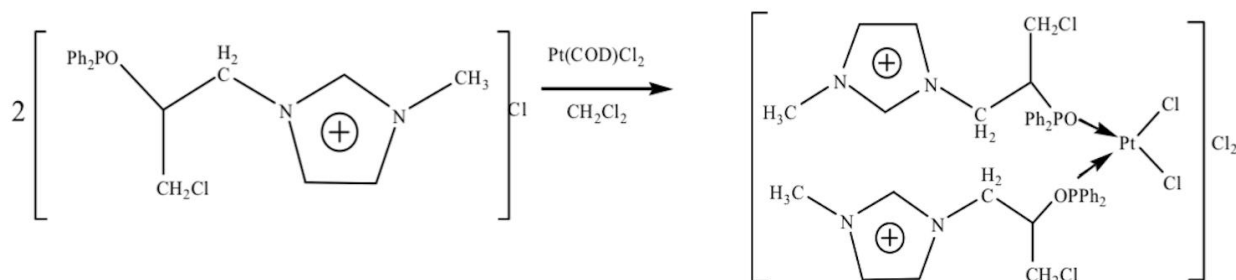


Figure 1. Formation of the homogeneous Pt(II) complex $[\text{PtCl}_2\{(\text{PPh}_2\text{O}_2\text{C}_7\text{H}_{14}\text{N}_2)_2\}]\text{Cl}_2$

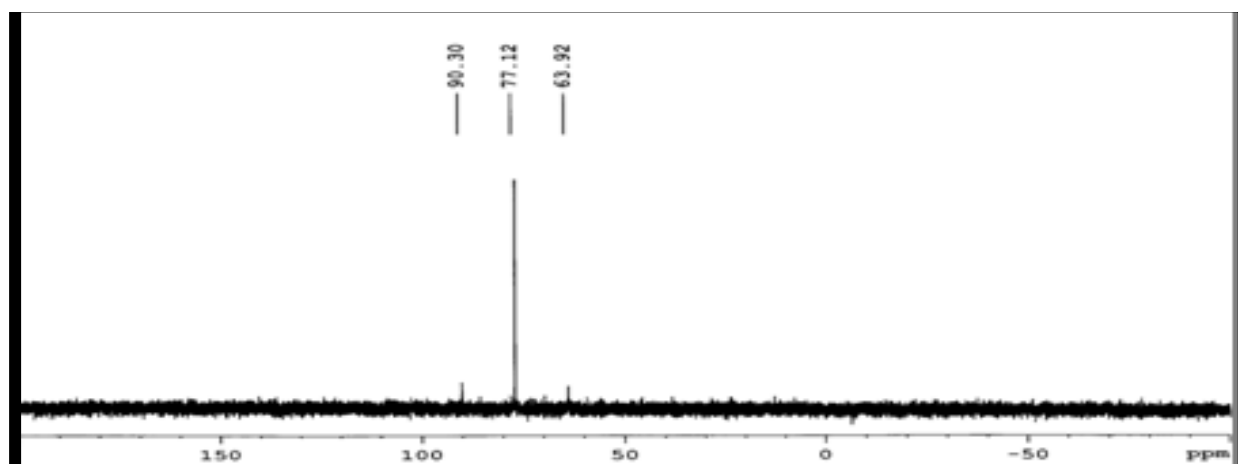


Figure 2. $^{31}\text{P}\{-^1\text{H}\}$ NMR spectrum of $[\text{PtCl}_2\{(\text{PPh}_2\text{O}_2\text{C}_7\text{H}_{14}\text{N}_2)_2\}]\text{Cl}_2$ complexes

3.2. Characterization of polymer-supported Pt(II) catalyst

The immobilization of the Pt(II) complex onto aminomethylated polystyrene was successfully achieved under reflux conditions in chloroform in the presence of triethylamine. The successful incorporation of platinum species into the polymer matrix was initially evidenced by the visible color change of the material from flesh-colored to dark yellow after immobilization. The obtained material remained stable during washing with hot dioxane and hot ethanol, indicating strong interaction between the Pt(II) complex and the polymer support.

The morphology of the polymer-supported catalyst was investigated by SEM analysis (Figure 3). The SEM image revealed that the material consists predominantly of spherical polymer particles with relatively uniform morphology and size distribution. The structural integrity of the polymer support remained preserved after immobilization of the Pt(II) complex, suggesting that the anchoring procedure did not lead to significant deformation or degradation of the support material.

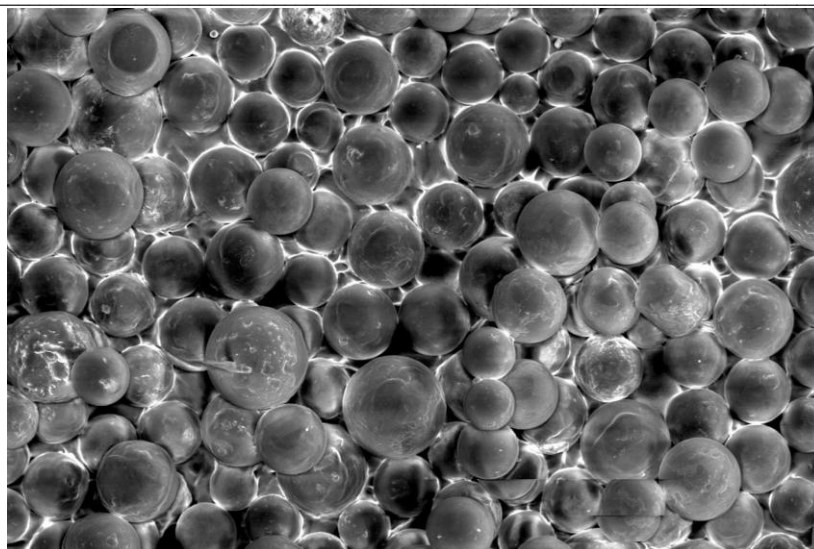


Figure 3. SEM image of the polymer-supported Pt(II) catalyst based on aminomethylated polystyrene

EDX analysis further confirmed the successful incorporation of platinum species into the polymer matrix (Figure 4). According to the EDX results, the platinum loading in the supported catalyst was determined to be 0.25 wt.%, demonstrating effective immobilization of the Pt(II) complex onto aminomethylated polystyrene.

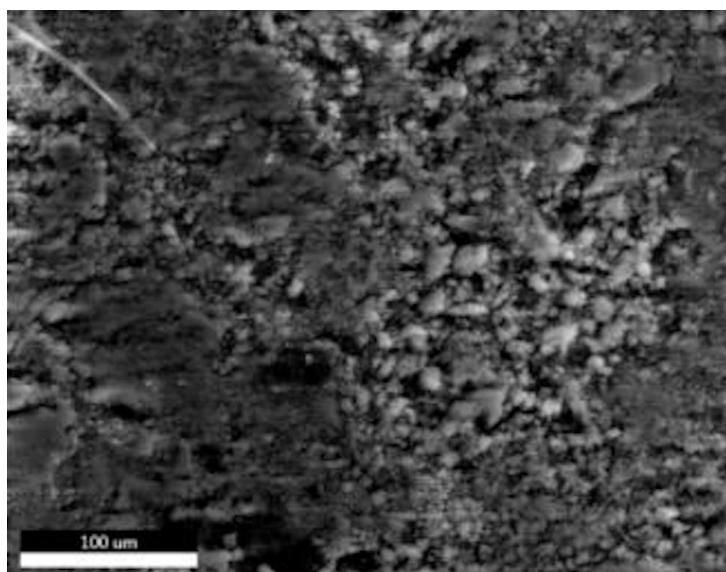


Figure 4. EDX mapping analysis of the polymer-supported Pt(II) catalyst

The obtained polymer-supported Pt(II) complex exhibited the characteristics of a heterogeneous catalytic system, allowing facile separation from the reaction medium by simple filtration. Compared with the corresponding homogeneous Pt(II) complex, the supported catalyst offers practical advantages such as easier recovery, improved handling, and potential catalyst recyclability.

Overall, the structural stability confirmed by SEM and EDX analyses, together with the successful incorporation of Pt(II) species, supports the potential of the polymer-supported platinum complex as a promising heterogeneous catalytic system for transfer hydrogenation reactions.

3.3. Catalytic activity of homogeneous and heterogeneous Pt(II) complexes in transfer hydrogenation of ketones

The catalytic activities of the synthesized homogeneous and heterogeneous Pt(II) complexes were investigated in the transfer hydrogenation of ketones using isopropanol as the hydrogen donor in the presence of KOH. The catalytic reactions were carried out under reflux conditions, and the obtained results are summarized in Table 1.

Both Pt(II) catalytic systems exhibited considerable activity in the reduction of ketones to the corresponding secondary alcohols. The results clearly showed that the catalytic performance strongly depended on the catalyst type and reaction conditions. Negligible conversion was observed in the absence of base, confirming that KOH plays an essential role in the hydrogen transfer process.

The homogeneous Pt(II) complex demonstrated higher catalytic activity compared with the polymer-supported heterogeneous catalyst. Under optimized conditions with a substrate/catalyst/base molar ratio of 100:1:5, the homogeneous catalyst afforded 98 % conversion within 15 min, corresponding to a TOF value of 392 h⁻¹ (Table 1, entry 1). In contrast, the heterogeneous Pt(II) catalyst required longer reaction times to achieve similar conversion values. Nevertheless, the supported catalyst exhibited good catalytic stability and allowed easy separation from the reaction medium by simple filtration.

Increasing the substrate/catalyst ratio from 100:1 to 500:1 and 1000:1 resulted in a gradual decrease in catalytic efficiency and an increase in reaction time for both catalytic systems. However, high conversions were still achieved under elevated substrate loading conditions, demonstrating the stability of the Pt(II) catalytic systems.

Overall, the homogeneous Pt(II) complex exhibited superior catalytic activity, whereas the heterogeneous polymer-supported Pt(II) catalyst offered practical advantages, including catalyst recovery, operational stability, and potential reusability.

Table 1. Transfer hydrogenation of ketones catalyzed by homogeneous and heterogeneous Pt(II) complexes in iso-PrOH/KOH system

Entry	Catalyst	S/C/NaOH	Time	Yield (%)	TOF (h ⁻¹)
1	Homogeneous Pt(II) complex	100:1:5	15 min	98	392
2	Homogeneous Pt(II) complex	500:1:5	45 min	99	132
3	Homogeneous Pt(II) complex	1000:1:5	1.5 h	97	65
4	Heterogeneous Pt(II) complex	100:1:5	45 min	98	365
5	Heterogeneous Pt(II) complex	500:1:5	1 h	98	126
6	Heterogeneous Pt(II) complex	1000:1:5	1.5 h	97	53

4. Conclusion

In this work, homogeneous and heterogeneous Pt(II) complexes based on phosphinite ligands containing ionic liquid fragments were successfully synthesized and characterized. The obtained spectroscopic and analytical data, including multinuclear NMR, IR spectroscopy, elemental analysis, SEM, and EDX analyses, confirmed the successful formation of structurally well-defined platinum complexes and the effective immobilization of Pt(II) species onto aminomethylated polystyrene.

The homogeneous Pt(II) complex exhibited high catalytic activity in the transfer hydrogenation of ketones using isopropanol as the hydrogen donor in the presence of KOH. Under optimized conditions, excellent conversion values were achieved within short reaction times, indicating efficient catalytic performance of the Pt(II) system.

The polymer-supported heterogeneous Pt(II) catalyst also exhibited considerable catalytic activity, although its activity was somewhat lower than that of the corresponding homogeneous catalyst. However, the heterogeneous system provided important practical advantages, including facile separation from the reaction medium, improved operational stability, and potential catalyst recyclability.

Comparative investigation of the homogeneous and heterogeneous catalytic systems showed that immobilization of the Pt(II) complex onto a polymer support preserves catalytic functionality while improving the handling properties of the catalyst. The obtained results suggest that the polymer matrix does not significantly hinder access to the catalytically active Pt(II) centers.

Overall, the synthesized Pt(II) complexes based on phosphinite ligands containing ionic liquid fragments represent promising catalytic systems for transfer hydrogenation reactions. The combination of high catalytic activity, structural stability, and the possibility of catalyst recovery makes these systems attractive for further development and potential application in sustainable catalytic processes.

5. Supplementary Materials: no supplementary material.

6. Author Contributions

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

7. Author Information

Aronova, Akbota – PhD student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satpayev University, Satbayev Street, 22, Almaty, Kazakhstan, 050000; aronova.akbota@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8584-3469>

Rafikova, Kadichakhan – PhD, Professor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satpayev University, Satbayev Street, 22, Almaty, Kazakhstan, 050000; kh.rafikova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-8028-2244>

Selenova, Bagadat – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University, Satbayev Street, 22, Almaty, Kazakhstan, 050000; b.selenova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-7156-2703>

Adikanova, Dinara - PhD, Associate Professor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satpayev University, Satbayev Street, 22, Almaty, Kazakhstan, 050000; d.adikanova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1445-1553>

Iskakov, Rinat - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University, Satbayev Street, 22, Almaty, Kazakhstan, 050000; rm.iskakov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8795-9622>

Shambilova, Gulbarshin - Doctor of Chemical Sciences, Professor, Dosmukhamedov Atyrau University, Student Ave., 212, Atyrau, Kazakhstan, 060000; shambilova_gulba@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2733-986X>

8. Funding: This research is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP26102805). The part of the research concerning the development of polymer support is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR28713197)

9. Acknowledgements: The authors thank the Caspian Center for Sustainable Innovation at Kh. Dosmukhamedov Atyrau University, which was developed under Grant No. BR28713197 by the

Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, for the partial use of the Center's resources in preparing this article.

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

11. References

1. Aydemir, M., Rafikova, K., Kystaubayeva, N., Paşa, S., Meriç, N., Ocak, Y., Zazybin, A., Temel, H., Gürbüz, N., & Özdemir, İ. (2014). Ionic liquid based Ru(II)–phosphinite compounds and their catalytic use in transfer hydrogenation: X-ray structure of an ionic compound 1-chloro-3-(3-methylimidazolidin-1-yl)propan-2-ol. *Polyhedron*, 81, 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2014.05.079>
2. Chen, Y., Gao, R., & Liu, L. (2022). Platinum-based nanocatalysts for selective hydrogenation reactions: Recent progress and perspectives. *ACS Catalysis*, 12(18), 11376–11402.
3. Claver, C. (2017). Asymmetric hydrogenation and transfer hydrogenation of ketones. *Chemical Reviews*, 3, 567–574.
4. Fu, J., Xu, Q., Low, J., Jiang, C., & Yu, J. (2019). Ultrathin 2D/2D WO₃/g-C₃N₄ step-scheme H₂-production photocatalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 243, 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.11.011>
5. Jia, J., Zheng, L., Li, K., Zhang, Y., & Xie, H. (2022). Two-electron transfer mechanism from 3D/3D nickel selenide/MoS₂ heterostructure accelerates photocatalytic hydrogen evolution and tetracycline hydrochloride removal. *Chemical Engineering Journal*, 429, 132432. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132432>
6. Johnson, N. B., Lennon, I. C., & Moran, P. H. (2021). Rhodium catalysed transfer hydrogenation of ketones. *Thesis, University of Liverpool*, 21(1), 325–333.
7. Lee, J., & Kim, H. A. (2018). Recyclable nanoparticle-supported rhodium catalyst for hydrogenation of alkenes and ketones. *ACS Omega*, 47(1), 365–378.
8. Li, X., & Chen, W. (2020). Homogeneous and heterogeneous catalytic reduction of ketones. *Nature Communications*, 12, 237–243.
9. Masson, G., Ballico, M., Goi, B. E., Carvalho-Jr, V. P., & Baratta, W. (2024). Light-enhancing ketone transfer hydrogenation catalyzed by diphosphine phenanthroline ruthenium complexes. *Molecular Catalysis*, 564, 114337. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2024.114337>
10. Meriç, N., Aydemir, M., Işık, U., Ocak, Y. S., Rafikova, K., Paşa, S., Kayan, C., Durap, F., Zazybin, A., & Temel, H. (2014). Cross-coupling reactions in water using ionic liquid-based palladium(II)–phosphinite complexes as outstanding catalysts. *Applied Organometallic Chemistry*, 28, 818–825. <https://doi.org/10.1002/aoc.3205>
11. Nekrasov, R. I., Peganova, T. A., Strelkova, T. V., Gutsul, E. I., Filippov, O. A., Belkova, N. V., & Kalsin, A. M. (2025). Chloride-assisted transfer hydrogenation of ketones by half-sandwich rhodium iminophosphonamide complexes. *ChemCatChem*, 17(6), e202401692. <https://doi.org/10.1002/cctc.202401692>
12. Ningthoujam, R. (2022). Nanocatalyst in remediating environmental pollutants. *Chemical Physics Impact*, 4, 100064.
13. Rafikova, K., Kystaubayeva, N., Aydemir, M., Kayan, C., Ocak, Y. S., Temel, H., Zazybin, A., Gürbüz, N., & Özdemir, İ. (2014a). Transfer hydrogenation of ketones catalyzed by new rhodium and iridium complexes of aminophosphine containing cyclohexyl moiety and photosensing behaviors of rhodium and iridium based devices. *Journal of Organometallic Chemistry*, 758, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2014.01.025>
14. Rafikova, K., Kystaubayeva, N., Aydemir, M., Meriç, N., Paşa, S., Zazybin, A., & Temel, H. (2014b). Use of ionic liquids based Ru(II)-phosphinite complexes in transfer hydrogenation (TH) reactions as catalyst. *5th National Catalysis Conference of Çukurova University*, 12(1), 231–240.

15. Rafikova, K., Kystaubayeva, N., Aydemir, M., Selim, Y., Kayan, C., Zazybin, A., Ok, F., Baysal, A., & Temel, H. (2014c). Rhodium-catalyzed transfer hydrogenation with aminophosphines and analysis of electrical characteristics of rhodium(I) complex/n-Si heterojunctions. *Applied Organometallic Chemistry*, 28, 396–404. <https://doi.org/10.1002/aoc.3140>
16. Rafikova, K., Meriç, N., Binbay, N. E., Okumuş, V., Sever, M. Ş., Belyankova, Y., & Aydemir, M. (2024). Biological assays, electrochemical behavior, and theoretical DFT calculations of Ru(II) complexes of chiral phosphinite based on β -amino alcohols: Transfer hydrogenation of ketones using a HCOOH/Et₃N mixture. *Journal of Molecular Structure*, 1303, 137556. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.137556>
17. Rafikova, K. S., Meriç, M., Aydemir, M., Zazybin, A., & Temel, H. (2013a). Catalytic activity of polymer supported ionic liquid Pd(II) complex in Suzuki-Miyaura cross-coupling reactions. *Ulusal Kataliz Yaz Okulu*, 39(2), 543–552.
18. Rafikova, K. S., Meriç, M., Aydemir, M., Zazybin, A., & Temel, H. (2013b). Synthesis of polymer anchored ligand and Pd(II) complex with ionic liquid precursor. *Ulusal Kataliz Yaz Okulu*, 39(2), 468–479.
19. Rafikova, K. S., Zazybin, A. G., Aydemir, M., Meriç, N., Paşa, S., & Temel, H. (2014a). Catalytic activity of ionic liquid based platinum(II) complexes in Kharasch addition reaction. *Ionic Liquids: Gordon Research Conference*, 12(2), 134–143.
20. Rafikova, K. S., Zazybin, A. G., & Yu, V. K. (2014b). Metal containing ionic liquids as solvent and catalyst in alkylation reactions. *Chemical Journal of Kazakhstan*, 47, 194–203.
21. Rafikova, K. S., Zazybin, A. G., & Yu, V. K. (2014c). Synthesis of bidentate phosphorous-containing ligand based on imidazolium ionic liquid. *Academic Scientific Journal of Chemistry, Series of Chemistry and Technology*, 56, 51–54.
22. Rafikova, K. S., Zazybin, A. G., Temel, H., Aydemir, M., Meriç, N., Paşa, S., Yu, V. K., & Kystaubayeva, N. U. (2014). Kharasch addition reaction catalyzed by platinum(II) complexes based on ionic liquids. *Herald of KBTU, Chemico-Technological Sciences and Ecology*, 1, 41–48.
23. Ragini, D., & Jaya, P. (2019). Trends of green catalysis in synthetic chemistry. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 10, 5311–5317.
24. Somwanshi, S. B., Somvanshi, S. B., & Kharat, P. B. (2020). Nanocatalyst: a brief review on synthesis to applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 43, 232–240.
25. Tungatarova, S. A., & Zakumbayeva, G. D. (2020). Catalytic properties of supported platinum catalysts in hydrogenation processes. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series Chemistry and Technology*, 3, 45–56.
26. Xie, G., & Török, B. (2022). Rh-catalyzed environmentally benign selective hydrogenation of a broad variety of functional groups using Al-water as a hydrogen source. *Catalysts*, 12(12), 1578. <https://doi.org/10.3390/catal12121578>
27. Zazybin, A., Rafikova, K., Abilda, N., Yu, V., Begimova, G., Aydemir, M., Temel, H., & Sasaki, T. (2014). New homogeneous and heterogeneous catalytic systems containing metal-tagged ionic liquids in the C–C bond forming reactions. *The Seventh Tokyo Conference on Advanced Catalytic Science and Technology*, 33(1), 671–682.

Сутекті тасымалдау реакцияларындағы гомогенді және гетерогенді Pt(II) комплекстерінің синтезі мен каталитикалық қасиеттері

Ақбота Аронова, Хадичахан Рафикова, Багадат Селенова, Динара Адиканова, Ринат Искаков, Гулбаршын Шамбилова

Аңдатпа. Бұл жұмыста иондық сұйықтық фрагменттері бар фосфинитті лигандтар негізіндегі гомогенді және гетерогенді Pt(II) кешендері синтезделіп, сутекті тасымалдау

реакцияларындағы каталитикалық жүйелер ретінде зерттелді. Гомогенді Pt(II) кешені $[PtCl_2((PPh_2O_2C_7H_{14}N_2)_2)]Cl_2$ синтезделіп, $^{31}P\{^1H\}$, 1H , ^{13}C ЯМР спектроскопиясы, ИҚ-спектроскопия және элементтік талдау әдістерімен сипатталды. Алынған спектроскопиялық деректер құрылымы нақты анықталған квадратты-жазық Pt(II) кешенінің түзілгенін растады. Гетерогенді каталитикалық жүйені алу мақсатында Pt(II) кешені аминометилденген полистиролға имобилизацияланды. Полимерге бекітілген катализатор СЭМ және ЭДР талдау әдістерімен зерттелді. Нәтижелер Pt(II) түрлерінің полимер матрицасына сәтті енгізілгенін және платинаның мөлшері 0,25 масс.% екенін растады. Гомогенді және гетерогенді Pt(II) кешендерінің каталитикалық белсенділігі сутек доноры ретінде изопропанолды және негіз ретінде КОН қолдана отырып кетондарды сутекті тасымалдау арқылы гидрлеу реакцияларында бағаланды. Гомогенді Pt(II) катализаторы жоғары каталитикалық белсенділік көрсетіп, қысқа уақыт ішінде жоғары конверсия дәрежесіне қол жеткізді. Гетерогенді катализатор да жақсы каталитикалық қасиеттер көрсетіп, реакциялық ортадан оңай бөлінуі және катализаторды қайта пайдалану мүмкіндігі сияқты практикалық артықшылықтарға ие болды. Алынған нәтижелер иондық сұйықтық фрагменттері бар фосфинитті лигандтар негізіндегі Pt(II) кешендерінің сутекті тасымалдау реакциялары үшін перспективалы каталитикалық жүйелер болып табылатынын көрсетті. Жоғары каталитикалық белсенділік, құрылымдық тұрақтылық және гетерогенді катализаторды бөліп алып, қайта пайдалану мүмкіндігінің үйлесуі бұл жүйелерді тұрақты каталитикалық процестерде қолдану үшін тартымды етеді.

Түйін сөздер: Pt(II) кешендері; фосфинитті лигандтар; иондық сұйықтық фрагменттері; гетерогенді катализатор; сутекті тасымалдау реакциялары; кетондар; полимерге бекітілген катализатор.

Синтез и каталитические свойства гомогенных и гетерогенных Pt(II) комплексов в реакциях переноса водорода

Ақбота Аронова, Хадичахан Рафикова, Багадат Селенова, Динара Адиканова, Ринат Искаков, Гулбаршын Шамбилова

Аннотация. В данной работе синтезированы и исследованы в качестве каталитических систем для реакций переноса водорода гомогенные и гетерогенные комплексы Pt(II) на основе фосфинитных лигандов, содержащих фрагменты ионных жидкостей. Гомогенный комплекс Pt(II) $[PtCl_2((PPh_2O_2C_7H_{14}N_2)_2)]Cl_2$ был синтезирован и охарактеризован методами $^{31}P\{^1H\}$, 1H , ^{13}C ЯМР, ИК-спектроскопии и элементного анализа. Полученные спектроскопические данные подтвердили образование структурно определённого квадратно-плоского комплекса Pt(II). Для получения гетерогенной каталитической системы комплекс Pt(II) был имобилизован на аминометилированном полистироле. Полимер-имобилизованный катализатор был охарактеризован методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Результаты подтвердили успешное внедрение частиц Pt(II) в полимерную матрицу при содержании платины 0,25 мас.%. Каталитическая активность как гомогенных, так и гетерогенных комплексов Pt(II) была изучена в реакциях переноса водорода кетонов с использованием изопропанола в качестве донора водорода в присутствии КОН. Гомогенный катализатор Pt(II) продемонстрировал высокую каталитическую активность, обеспечивая глубокую конверсию за короткое время реакции. Гетерогенный катализатор также показал хорошие каталитические характеристики наряду с практическими преимуществами, такими как лёгкое отделение от реакционной среды и возможность повторного использования. Полученные результаты свидетельствуют о том, что комплексы Pt(II) на основе фосфинитных лигандов, содержащих фрагменты ионных

жидкостей, являются перспективными каталитическими системами для реакций переноса водорода. Сочетание высокой каталитической активности, структурной стабильности и возможности регенерации и повторного использования гетерогенного катализатора делает данные системы привлекательными для дальнейшего применения в устойчивых каталитических процессах.

Ключевые слова: комплексы Pt(II); фосфинитные лиганды; фрагменты ионных жидкостей; гетерогенный катализатор; реакции переноса водорода; кетоны; полимер-иммобилизованный катализатор.

Получение и оценка антибактериальной концентрации хитозан-стабилизированных наночастиц серебра

Дастан Асержанов¹, Жанар Касымова^{1*}, Алексей Кливенко¹, Нурия Омарова², Эльмира Абдуллина¹

¹Шәкәрім Университет, Семей, Қазақстан; kense@shakarim.kz

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Қазақстан; enu@enu.kz

*Корреспонденция: kasymova-z@mail.ru

Аннотация: Наночастицы серебра (AgNPs), стабилизированные хитозаном (AgNPs-chitosan), представляют значительный интерес благодаря выраженным антимикробным свойствам, биосовместимости и перспективности применения в медицине и ветеринарии. Использование хитозана в качестве стабилизирующей матрицы способствует повышению коллоидной устойчивости наночастиц, предотвращает их агрегацию и обеспечивает дополнительное взаимодействие с бактериальными клетками. Целью настоящего исследования являлось определение концентрации Ag в коллоидном растворе AgNPs-chitosan расчетным и инструментальными методами, а также оценка антибактериальной активности полученного нанокompозита в отношении *Moraxella bovoculi* – возбудителя инфекционного кератоконъюнктивита крупного рогатого скота. Расчетную концентрацию Ag в исходном растворе подтверждали методом ICP-OES после кислотного разложения образцов. Формирование и оптические свойства наночастиц оценивали методом УФ-видимой спектрофотометрии. Антибактериальную активность исследовали методом серийных микродилюций в бульоне с последующим определением минимальной ингибирующей (MIC) и минимальной бактерицидной концентрации (MBC). Концентрация Ag в исходном коллоидном растворе AgNPs-chitosan в результате расчета составила 135 мкг/мл и была подтверждена результатами ICP-OES анализа ($134,81 \pm 0,11$ мкг/мл). В исследовании был изучен антибактериальный эффект рабочих концентраций 67,5; 56,25; 45,0; 22,5 и 11,25 мкг/мл Ag^+ и AgNPs-chitosan. Полное ингибирование роста *Moraxella bovoculi* наблюдалось при концентрации 67,5 мкг/мл AgNPs-chitosan, которая соответствовала значениям MIC и MBC в условиях проведенного эксперимента. Полученные результаты свидетельствуют о наличии антибактериальной активности AgNPs-chitosan в отношении *Moraxella bovoculi* и подтверждают перспективность дальнейшего изучения хитозан-стабилизированных AgNPs для разработки ветеринарных антимикробных препаратов.

Цитирование: Асержанов, Д., Касымова, Ж., Кливенко, А., Омарова, Н., Абдуллина, Ж. (2026). Получение и оценка антибактериальной активности применения холодного пластика для горизонтальной дорожной разметки. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия Химия. География. 156(3), 23-37. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-23-37>

Академический редактор:
С.С. Досмагамбетова

Поступила: 16.04.2026
Исправлена: 28.08.2026
Принята: 29.09.2026
Опубликована: 30.09.2026



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: наночастицы серебра; хитозан; AgNPs-chitosan; ICP-OES; УФ-видимая спектроскопия; антибактериальная

активность; *Moraxella bovoculi*; инфекционный кератоконъюнктивит.

1. Введение

Наночастицы серебра (AgNPs) занимают особое место среди металлических наноматериалов благодаря сочетанию выраженной антимикробной активности, высокой удельной поверхности и уникальных физико-химических свойств. В отличие от ионной формы серебра, AgNPs обладают повышенной химической активностью за счет увеличения доли поверхностных атомов и усиления межфазных взаимодействий на границе раздела «частица-среда» (Nasri et al., 2022; Nie et al., 2022). Благодаря этим особенностям AgNPs активно исследуются в медицине, фармацевтике, ветеринарии, пищевой упаковке, биосенсорике и экологических технологиях (Ahmad et al., 2024).

Особый интерес представляют антибактериальные свойства AgNPs, поскольку они способны ингибировать рост широкого спектра грамположительных и грамотрицательных микроорганизмов, включая антибиотикорезистентные штаммы (Gong et al., 2024). Антимикробное действие AgNPs носит многофакторный характер и связано с повреждением клеточной стенки и мембраны бактерий, генерацией активных форм кислорода, нарушением процессов клеточного дыхания и взаимодействием с внутриклеточными структурами микроорганизмов (Salleh et al., 2020; More et al., 2023). Существенную роль играет также высвобождение ионов Ag^+ , способных взаимодействовать с белками мембраны, ферментными системами и нуклеиновыми кислотами клетки. При этом эффективность AgNPs определяется не только концентрацией серебра, но и размером частиц, степенью агрегации, поверхностным зарядом, устойчивостью коллоидной системы и природой стабилизирующей оболочки (Yang et al., 2020; Asif et al., 2022).

В качестве стабилизирующей матрицы для AgNPs значительный интерес представляет хитозан – природный биополимер, обладающий биосовместимостью, биodeградируемостью, низкой токсичностью и собственной антибактериальной активностью (Chicea et al., 2024; Asserzhanov et al., 2026). Благодаря наличию аминогрупп хитозан способен стабилизировать коллоидные системы, препятствовать агрегации наночастиц и обеспечивать более эффективное взаимодействие AgNPs с бактериальной клеткой. В последние годы системы AgNPs-chitosan рассматриваются как перспективные функциональные наноматериалы для разработки новых антимикробных препаратов в борьбе с антибиотикорезистентными микроорганизмами.

Одной из актуальных проблем ветеринарной медицины остается инфекционный кератоконъюнктивит крупного рогатого скота (КРС) – распространенное офтальмологическое заболевание, сопровождающееся воспалением конъюнктивы и роговицы, снижением продуктивности животных и значительными экономическими потерями в животноводстве (Fonseca et al., 2020). Среди микроорганизмов, ассоциированных с развитием данной патологии, особое место занимает *Moraxella bovoculi* (Loy et al., 2021; Zhang et al., 2024) (Рисунок 1).



Рисунок 1. Клинические проявления инфекционного кератоконъюнктивита у крупного рогатого скота

По данным эпизоотологических исследований за последние годы в хозяйствах Восточного Казахстана, в том числе области Абай, заболеваемость инфекционным кератоконъюнктивитом достигает 50–90 %. При этом выделенные изоляты характеризуются биологическими и биохимическими свойствами *Moraxella bovoculi*, что подтверждает потенциальную этиологическую роль данного микроорганизма в развитии заболевания (Абдуллина и др., 2022; Байгазанов и др., 2020; Байгазанов и др., 2022).

Проблема заболеваемости дополнительно осложняется распространением антибиотикорезистентности среди представителей рода *Moraxella*. Согласно данным, полученным в Казахстане, отдельные изоляты *Moraxella bovoculi* характеризуются сниженной чувствительностью к ряду традиционных антибактериальных препаратов, включая стрептомицин (68 % изолятов вырабатывают резистентность), ванкомицин (плохо проникает через мембрану грамотрицательных бактерий), клиндамицин (неэффективен к грамотрицательным бактериям) и окситетрациклин (20 % изолятов вырабатывают резистентность) (Куйбагаров и др., 2022; Иванов и др., 2020; Maboni et al., 2015). В связи с этим актуальным является поиск новых антимикробных систем, способных эффективно подавлять рост возбудителя и снижать риск формирования лекарственной устойчивости.

Следует отметить, что системы AgNPs-chitosan ранее уже были описаны в литературе. Большинство исследований сосредоточено на синтезе AgNPs-chitosan, их физико-химической характеристике и изучении антибактериальной активности в отношении клинически значимых микроорганизмов человека, таких как *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* и *Pseudomonas aeruginosa*. В то же время сведения о количественной антибактериальной активности AgNPs-chitosan в отношении офтальмопатогенных бактерий КРС, включая *Moraxella bovoculi*, представлены ограничено. В нашей предыдущей работе (Asserzhanov et al., 2026) исследована антибактериальная активность стабилизированных биополимерами (хитозаном, натрийкарбоксиметилцеллюлозой и альгинатом натрия) AgNPs в отношении *Moraxella bovoculi*. По результатам первичной оценки диско-диффузионным методом наиболее высокую антибактериальную активность продемонстрировал нанокомпозит AgNPs-chitosan благодаря синергетическому биоактивному эффекту компонентов и улучшению электростатической и стерической стабильности AgNPs. Настоящая работа направлена на точную количественную оценку антибактериальной активности AgNPs-chitosan в отношении *Moraxella bovoculi* с определением минимальной ингибирующей концентрации (MIC) и минимальной бактерицидной концентрации (MBC) методом серийных разведений в жидкой питательной среде (Куйбагаров и др., 2022; Иванов и др., 2020; Maboni et al., 2015). Дополнительно проведено исследование антибактериальной активности индивидуальных растворов хитозана и AgNO₃ при эквивалентных концентрациях серебра для сравнения эффективности AgNPs с ионной формой серебра и биополимером. Комплексное использование UV–Vis-спектроскопии, ICP-OES и микробиологических методов позволило оценить стабильность полученной системы и ее выраженную антибактериальную активность.

Таким образом, научная новизна исследования заключается в количественной оценке антибактериальной активности AgNPs-chitosan в отношении *Moraxella bovoculi*, сравнительном анализе нанодисперсной и ионной форм серебра, а также в исследовании роли хитозановой матрицы в реализации антибактериального действия наносистемы.

2. Материалы и методы

Объектом исследования служил ранее полученный коллоидный раствор AgNPs-chitosan с гидродинамическим радиусом (r_h) $185 \pm 1,5$ нм и диаметром частиц по данным просвечивающей электронной микроскопии ($d_{пэм}$) $13 \pm 1,2$ нм. Синтез AgNPs, их стабилизация биополимерами, а также морфологические и физико-химические характеристики были подробно описаны ранее (Kassymova et al., 2025; Asserzhanov et al., 2026).

Для получения коллоидного раствора AgNPs-chitosan общий объем реакционной смеси составлял 8 мл и включал 1 мл 0,01 М AgNO₃, 5 мл 10⁻² М раствора хитозана, 1 мл 1 % раствора глюкозы (C₆H₁₂O₆) и 1 мл 1 % раствора гидроксида натрия (NaOH).

Количество вещества серебра рассчитывали по формуле 1:

$$n = C_1 \times V_1 \quad (1)$$

где n – количество вещества, моль; C_1 – молярная концентрация раствора AgNO₃, моль/л; V_1 – объем раствора AgNO₃, л.

Молярную концентрацию серебра в реакционной смеси определяли по формуле 2:

$$C_2 = n / V_2 \quad (2)$$

где, C_2 – молярная концентрация в реакционной смеси, моль/л; V_2 – общий объем реакционной смеси, л.

Массовую концентрацию серебра рассчитывали по формуле 3:

$$C_{\text{масс}} = C_2 \times M \quad (3)$$

где $C_{\text{масс}}$ – массовая концентрация, г/л; M – молярная масса Ag, г/моль.

Согласно расчетам, концентрация серебра в исходном растворе AgNPs-chitosan составляла 135 мкг/мл.

Для определения содержания серебра в AgNPs-chitosan использовали метод ICP-OES на приборе ICP-OES Экспресс 6500 (FPI, China). Для подготовки проб отбирали 0,5 мл коллоидного раствора AgNPs-chitosan, помещали во фторопластовый стакан и добавляли 1 мл концентрированной HNO₃ и 0,5 мл 30 % H₂O₂. Далее проводили микроволновое разложение в системе Speedwave MWS-2 (Berghof, Germany) для полного перевода Ag⁰ в Ag⁺ (Raza et al., 2022).

После минерализации раствор переносили в мерную колбу объемом 50 мл и доводили до метки 1 М HNO₃. Анализ проводили в трех повторностях. Перед измерением прибор калибровали стандартным раствором МЭС-3 СОП 15616-2014 (ООО НПП «Скат», Россия) с концентрацией серебра 10 мкг/мл.

Для количественного определения серебра методом ICP-OES использовали градуировочную зависимость, построенную в диапазоне концентраций 0,1–10,0 мкг/мл на основе стандартных растворов серебра. Линейность метода характеризовалась коэффициентом корреляции $R^2 > 0,999$. Предел обнаружения (LOD) составил 0,03 мкг/мл, а предел количественного определения (LOQ) – 0,1 мкг/мл.

Коэффициент разбавления рассчитывали по формулам 4 и 5:

$$K = \frac{V_{\text{разбавление}}}{V_{\text{аликвота}}} = \frac{50}{0,5} = 100 \quad (4)$$

$$C_{\text{Ag}} = C_{\text{измерения}} \cdot K, \quad (5)$$

где C_{Ag} – конечная концентрация, мкг/мл; K – коэффициент разбавления; $C_{\text{измерения}}$ – концентрация из прибора, мкг/мл.

Поверхностный плазмонный резонанс (ППР) AgNPs-chitosan исследовали методом УФ-видимой спектрофотометрии на спектрофотометре СФ-2000 («ООО ОКБ Спектр», Россия) в диапазоне 300–700 нм. Для анализа готовили серию растворов с концентрациями серебра 67,5; 33,75; 16,88; 8,44; 4,22; 2,11 и 1,05 мкг/мл. В качестве растворителя использовали бидистиллированную воду.

По полученным спектрам определяли положение и интенсивность полосы ППП AgNPs-chitosan. На основе значений оптической плотности при длине волны максимума ППП строили градуировочную зависимость в координатах А–С. Обработку результатов выполняли в программе OriginPro.

Результаты ICP-OES анализа представлены в виде средних значений $\pm$ стандартное отклонение (SD). Для оценки воспроизводимости ICP-OES дополнительно рассчитывали относительное стандартное отклонение (RSD). Спектры UV-Vis использовали для качественной оценки формирования AgNPs и анализа их оптических свойств.

Антибактериальную активность AgNPs-chitosan в отношении *Moraxella bovoculi* оценивали методом разведений в жидкой питательной среде (Parvekar et al., 2020). В качестве тест-культуры применяли суточную культуру *Moraxella bovoculi*, полученную из коллекции микробиологической лаборатории НАО «Шәкәрім Университет». Идентификацию микроорганизма проводили на основании морфологических, культуральных и биохимических признаков с использованием стандартных микробиологических методов. Культивирование бактерий осуществляли на мясо-пептонном агаре (МПА) с добавлением 5 % овечьей сыворотки при температуре 37 °C (Guidelines for susceptibility testing of microorganisms to antibacterial agents (MUK 4.2.1890–04), 2004).

Для оценки антибактериальной активности исследовали три раствора: раствор хитозана, раствор AgNO₃ и коллоидный раствор AgNPs-chitosan. В качестве контрольного раствора использовали стерильный физиологический раствор (0,9 % NaCl).

Инокулом готовили из свежей суточной культуры *Moraxella bovoculi*. Бактериальную суспензию стандартизировали до мутности 0,5 по МакФарланду, что соответствует приблизительно $1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл. Затем суспензию развели в 100 раз в трипто-соевом бульоне до рабочей концентрации порядка 10^6 КОЕ/мл. После смешивания бактериальной суспензии с исследуемым раствором 1:1 конечная концентрация микроорганизма в каждой пробе составляла приблизительно $5 \times 10^5 - 7,5 \times 10^5$ КОЕ/мл.

Для определения МИС и МВС готовили ряд проб с различной конечной концентрацией Ag. Каждый исследуемый раствор готовили по пять разведений (таблица 1). Общий объем каждой пробы составлял 600 мкл и включал 300 мкл бактериальной суспензии и 300 мкл исследуемого раствора либо его разведения.

Концентрации серебра в растворах AgNO₃ и AgNPs-chitosan после разведения рассчитывали по формуле 6:

$$C_1 V_1 = C_2 V_2, \quad (6)$$

где C_1 – исходная концентрация серебра в растворе AgNPs-chitosan (135 мкг/мл); V_1 – объем исследуемого раствора, мкл; V_2 – общий объем пробы после смешивания с бактериальной суспензией (600 мкл); C_2 – конечная концентрация серебра в пробе, мкг/мл.

Таблица 1. Схема разведений исследуемых проб и концентрация серебра после разведения

Номер пробы	Бульон с бактериями, мкл	Вода, мкл (стерильный растворитель)	Исследуемый раствор V_1 , мкл	Общий объем V_2 , мкл	C_2 , мкг/мл
1	300	0	300	600	67,5
2	300	50	250	600	56,25
3	300	100	200	600	45,0
4	300	200	100	600	22,5
5	300	250	50	600	11,25

После внесения всех компонентов пробы аккуратно перемешивали и инкубировали при 37 °С в течение 24 часов. По окончании инкубации пробирки оценивали визуально в проходящем свете. Наличие помутнения оценивали как рост микроорганизмов, тогда как отсутствие помутнения указывало на ингибирование бактерий. МИС определяли как наименьшую концентрацию исследуемого раствора, при которой отсутствовал визуально определяемый рост бактерий в жидкой питательной среде.

Для определения МВС из каждой исследуемой пробы стерильным наконечником отбирали по 100 мкл суспензии. Отобранный объем наносили на поверхность плотной питательной среды в чашке Петри, содержащей МПА с добавлением 5 % овечьей сыворотки. Затем суспензию равномерно распределяли по всей поверхности агара стерильным микробиологическим шпателем до получения тонкого равномерного слоя. Посевы инкубировали при температуре 37 °С в течение 24 часов.

Бактерицидный эффект оценивали по полному отсутствию визуально определяемых колоний на поверхности плотной питательной среды. Наличие даже единичных колоний расценивали как сохранение жизнеспособности микроорганизмов.

Все антибактериальные эксперименты выполняли в трех независимых повторностях. Результаты считали воспроизводимыми при совпадении наблюдаемого эффекта во всех повторностях.

3. Результаты и обсуждение

Для подтверждения образования AgNPs и оценки их оптических свойств была проведена УФ-видимая спектрофотометрия. В спектрах AgNPs-chitosan наблюдалась характерная полоса ППР в области 400–410 нм, типичная для сферических AgNPs (Рисунок 2).

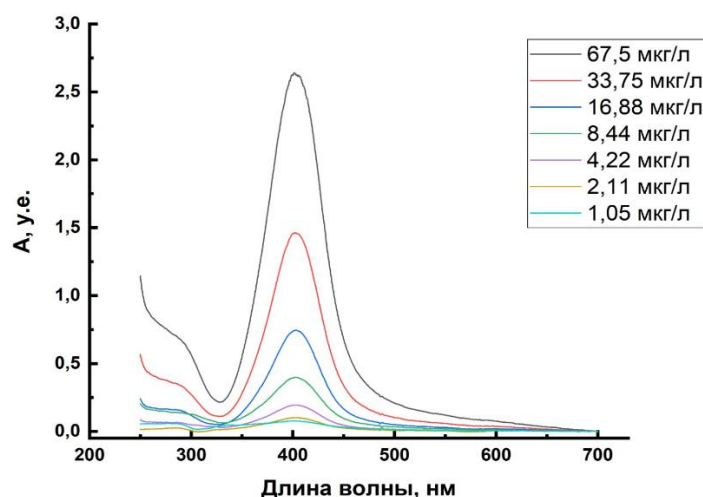


Рисунок 2. УФ-видимые спектры поглощения растворов AgNPs-chitosan при различных концентрациях серебра

При последовательном разбавлении растворов интенсивность полосы ППР закономерно снижалась пропорционально концентрации серебра, тогда как положение максимума практически не изменялось. Отсутствие выраженного батохромного смещения и существенного уширения полосы свидетельствует о сохранении коллоидной устойчивости AgNPs-chitosan и отсутствии агрегации частиц в исследуемом диапазоне концентраций при их дальнейшем антибактериальном применении.

Для количественной оценки оптической плотности AgNPs-chitosan была построена градуировочная зависимость оптической плотности от концентрации серебра при длине волны максимума ППР (Рисунок 3).

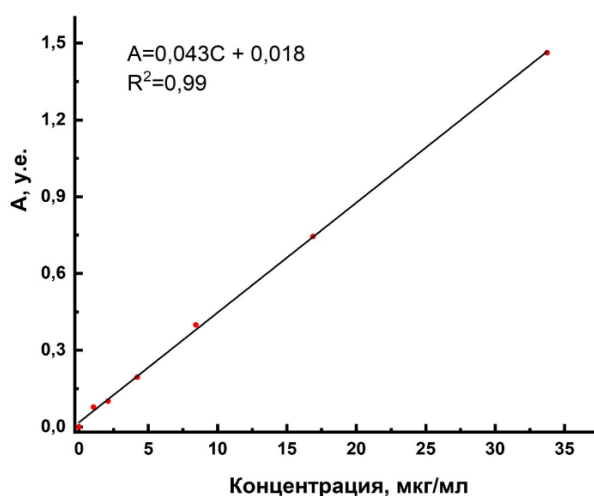


Рисунок 3. Градуировочная зависимость оптической плотности от концентрации серебра для растворов AgNPs-chitosan при длине волны максимума ППР

Высокое значение коэффициента детерминации ($R^2=0,99$; $A = 0,043C + 0,018$) указывает на хорошую линейность зависимости и подтверждает применимость УФ-видимой спектрофотометрии для экспрессной количественной оценки содержания серебра в растворах AgNPs-chitosan. Таким образом, метод УФ-видимой спектрофотометрии позволяет одновременно подтвердить формирование AgNPs и охарактеризовать зависимость их оптической плотности от концентрации.

Методом ICP-OES определили содержание серебра в коллоидном растворе AgNPs-chitosan. Полученное значение $134,81 \pm 0,11$ мкг/мл хорошо согласовывалось с расчетной концентрацией (135 мкг/мл). Значение 95 %-го доверительного интервала находилось в диапазоне 134,55–135,08 мкг/мл. Относительное стандартное отклонение (RSD) составило 0,08 %, что подтверждает воспроизводимость синтеза и надежность примененного аналитического подхода.

Антибактериальная активность исследуемых растворов хитозана $AgNO_3$ и AgNPs-chitosan существенно различалась (таблица 2, рисунок 4). Раствор хитозана в исследуемом диапазоне концентраций не обеспечивал полного подавления роста *Moraxella bovoculi*. При этом в отдельных пробах наблюдалось снижение интенсивности бактериального роста, что может быть связано с собственной антимикробной активностью хитозана. Известно, что протонированные аминогруппы поликатиона хитозана способны взаимодействовать с отрицательно заряженными компонентами клеточной стенки грамотрицательных бактерий, нарушая проницаемость мембраны и процессы клеточного метаболизма.

Раствор $AgNO_3$ также проявлял антибактериальный эффект, обусловленный действием ионов Ag^+ . Однако при эквивалентных концентрациях серебра выраженность ингибирующего действия была ниже по сравнению с AgNPs-chitosan. Во всех разведениях после инкубации сохранялся бактериальный рост, что указывает на ограниченную эффективность исключительно ионной формы серебра в исследуемых условиях.

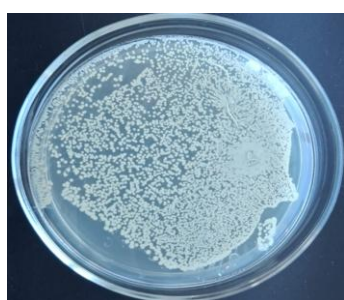
Наиболее выраженную антибактериальную активность продемонстрировал коллоидный раствор AgNPs-chitosan. В исследованном диапазоне концентраций полное отсутствие роста *Moraxella bovoculi* наблюдалось при концентрации серебра 67,5 мкг/мл. После пересева содержимого пробирок на плотную питательную среду бактериальные колонии также

отсутствовали, что подтверждает бактерицидный характер действия данной концентрации (рисунок 4 Б).

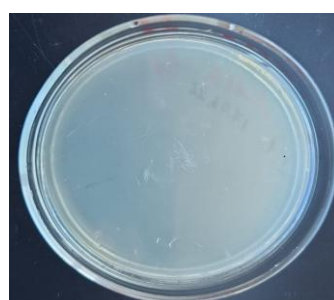
Таблица 2. Антибактериальный эффект испытуемых растворов

Раствор	67,5 мкг/мл	56,25 мкг/мл	45,0 мкг/мл	22,5 мкг/мл	11,25 мкг/мл
AgNO ₃	Рост	Рост	Рост	Рост	Рост
AgNPs-chitosan	Отсутствие роста	Рост	Рост	Рост	Рост
Chitosan	Рост	Рост	Рост	Рост	Рост

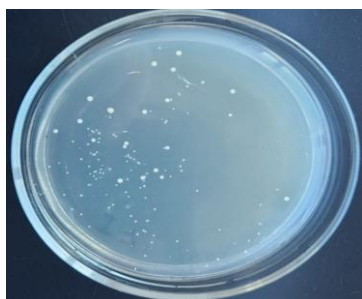
*Примечание: В качестве контроля применялся раствор NaCl (0,9 %) без серийных разведений



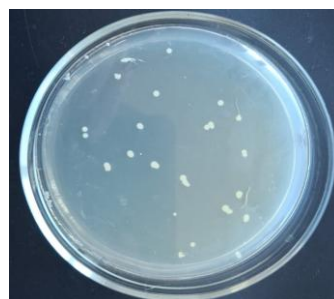
А) NaCl
(контрольный вариант)



Б) AgNPs-chitosan
(67,5 мкг/мл)



В) AgNO₃
(67,5 мкг/мл)



Г) Chitosan

Рисунок 4. Антибактериальный эффект различных растворов

Таким образом, МИС и МБС AgNPs–chitosan в условиях проведенного эксперимента соответствовали 67,5 мкг/мл (таблица 3). При более низких концентрациях (56,25; 45,0; 22,5 и 11,25 мкг/мл) сохранялся бактериальный рост различной степени выраженности.

Таблица 3. Значения МИС и МБС

Раствор	МИС, мкг/мл	МБС, мкг/мл
AgNPs-chitosan	67,5	67,5

Полученные результаты свидетельствуют о более высокой антибактериальной эффективности нанодисперсной формы серебра по сравнению с ионной формой при одинаковом содержании Ag. Вероятно, это связано с совокупностью нескольких факторов, включая высокую удельную поверхность AgNPs, постепенное высвобождение ионов Ag^+ , повышенную реакционную способность наночастиц и стабилизирующую функцию хитозановой матрицы.

Полученное значение MIC находится в пределах диапазона значений, ранее описанных для различных микроорганизмов, однако относится к верхней части этого диапазона. При этом значения MIC для AgNPs в отношении *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* и *Pseudomonas aeruginosa* варьируют в более широком диапазоне в зависимости от способа синтеза, размера частиц и природы стабилизирующей оболочки (таблица 4). Высокое значение MIC, необходимое для полного подавления роста *Moraxella bovoculi*, может быть связано с особенностями строения клеточной оболочки данного микроорганизма, его физиологическими характеристиками, а также спецификой взаимодействия бактерии с хитозан-стабилизированными AgNPs.

Таблица 4. Сравнение значений MIC AgNPs для различных микроорганизмов

Микроорганизм	MIC AgNPs, мкг/мл	Источник
<i>Escherichia coli</i>	0,25 – 12,5	Loo et al., 2018
<i>Staphylococcus aureus</i>	6,25 – 75,0	Parvekar et al., 2020
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	8 – 64	Chicea et al., 2024
<i>Moraxella bovoculi</i>	67,5	Настоящее исследование

В отличие от раствора $AgNO_3$, содержащего только свободные ионы Ag^+ , система AgNPs-chitosan обеспечивает многостадийное взаимодействие с клеточной стенкой *Moraxella bovoculi*. Положительно заряженная хитозановая оболочка способствует электростатической адсорбции наночастиц на отрицательно заряженной липополисахарид-мембране грамотрицательной бактерии. Кроме того, AgNPs-chitosan создают локальное и пролонгированное высвобождение Ag^+ непосредственно вблизи бактериальной клетки, что сопровождается повреждением мембраны, ингибированием белков и ферментов, генерацией активных форм кислорода и нарушением структуры ДНК. В случае $AgNO_3$ свободные ионы Ag^+ в питательной среде могут быстро связываться с хлорид-ионами и компонентами бульона с образованием малорастворимых соединений, что снижает их биодоступность и антимикробную активность (рисунок 5).

Более того, хитозан выполняет функцию стабилизирующей матрицы, препятствуя агрегации наночастиц и поддерживая их коллоидную устойчивость. Сохранение нанодисперсного состояния обеспечивает большую площадь активной поверхности серебра и способствует усилению межфазных взаимодействий между наночастицами и бактериальной клеткой.

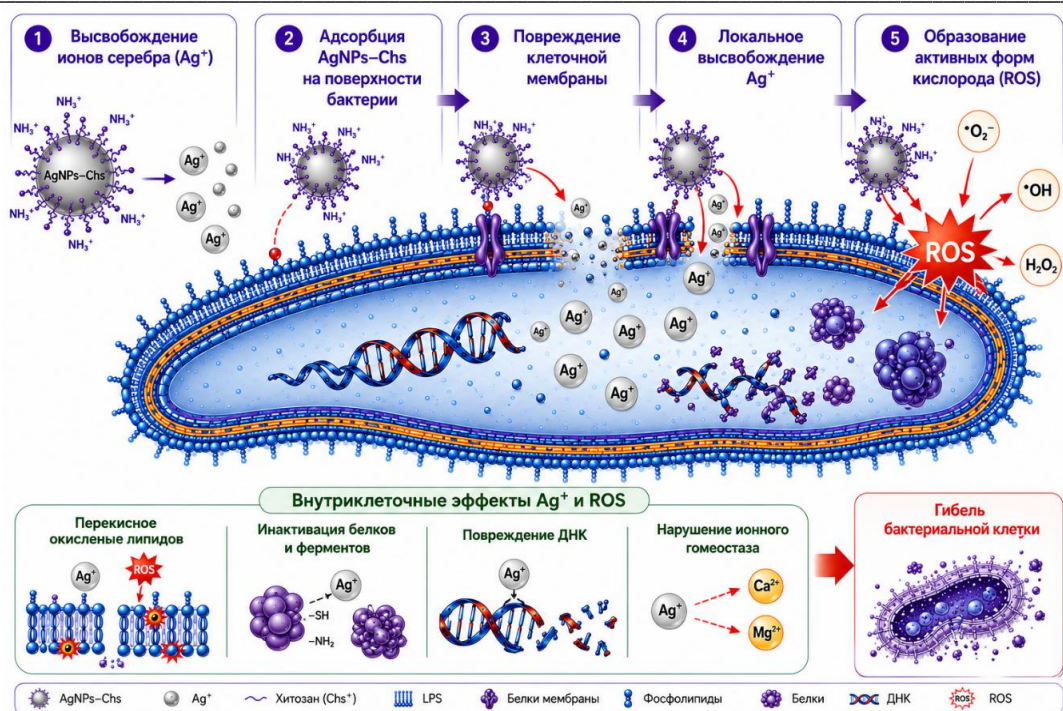


Рисунок 5. Механизм антибактериального действия AgNPs-chitosan (Источник: составлено авторами)

В целом полученные результаты свидетельствуют о наличии выраженной антибактериальной активности AgNPs-chitosan и расширяют существующие представления о чувствительности ветеринарно-опасного патогена рода *Moraxella* к серебросодержащим наносистемам. Количественная оценка MIC и MBC позволяет более объективно оценить эффективность данной системы и может служить основой для дальнейшей разработки серебросодержащих препаратов против бактериальных офтальмологических инфекций у сельскохозяйственных животных.

4. Заключение

В настоящем исследовании проведена количественная оценка антибактериальной активности AgNPs-chitosan в отношении *Moraxella bovoculi* – одного из бактериальных возбудителей инфекционного кератоконъюнктивита КРС.

Методом ICP-OES установлено, что концентрация серебра в исходном коллоидном растворе AgNPs-chitosan составила $134,81 \pm 0,11$ мкг/мл (RSD = 0,08 %; 95 % CI: 134,55–135,08 мкг/мл) и подтвердила расчетное значение 135 мкг/мл.

Результаты УФ-видимой спектрофотометрии показали формирование нанодисперсной металлической фазы Ag^0 . В спектрах поглощения наблюдалась характерная полоса ППП в области около 400 нм, типичная для сферических AgNPs.

Отсутствие выраженного батохромного смещения и значительного уширения полосы поглощения свидетельствует о сохранении коллоидной стабильности AgNPs-chitosan в исследованном диапазоне концентраций. Построенная градуировочная зависимость оптической плотности от концентрации серебра характеризовалась высокой линейностью ($R^2=0,99$), что подтверждает возможность использования УФ-видимой спектрофотометрии для экспрессной оценки содержания серебра в растворах AgNPs-chitosan.

Микробиологические исследования показали выраженную антибактериальную активность AgNPs-chitosan в отношении *Moraxella bovoculi*. Полное ингибирование бактериального роста как в жидкой, так и в плотной питательной среде наблюдалось при концентрации серебра 67,5 мкг/мл. Установлено, что MIC и MBC в условиях проведенного эксперимента совпадали.

В отличие от AgNPs-chitosan, раствор AgNO₃ при эквивалентных концентрациях серебра не проявлял сопоставимого антибактериального действия. Полученные результаты свидетельствуют о том, что эффективность исследуемой системы определяется не только присутствием серебра как химического элемента, но и его нанодисперсным состоянием, коллоидной стабильностью и особенностями межфазного взаимодействия AgNPs с бактериальной клеткой. Хитозановая матрица, обеспечивающая электростатическую стабилизацию AgNPs, препятствует агрегации наночастиц и способствует более эффективному контакту наносистемы с поверхностью микроорганизмов. Кроме того, система AgNPs-chitosan может обеспечивать более контролируемое высвобождение Ag⁺ вблизи клеточной мембраны бактерий, что дополнительно усиливает антибактериальный эффект.

Следует отметить, что настоящее исследование имеет ряд ограничений. В работе использовали только один изолят *Moraxella bovoculi*, а оценка цитотоксичности AgNPs-chitosan в отношении клеток роговичного и конъюнктивального эпителия не проводилась. Кроме того, не рассматривались молекулярные механизмы генерации активных форм кислорода и особенности взаимодействия наночастиц с клеточной мембраной микроорганизмов.

В дальнейшем перспективными направлениями исследований являются изучение биосовместимости AgNPs-chitosan, расширение спектра исследуемых клинических изолятов *Moraxella*, сравнительная оценка эффективности AgNPs-chitosan и традиционных ветеринарных антибактериальных препаратов, а также разработка офтальмологических лекарственных форм на основе исследуемой наносистемы, включая растворы, гели и биоадгезивные покрытия.

Таким образом, полученные результаты подтверждают перспективность AgNPs-chitosan в качестве потенциальной антимикробной наносистемы для дальнейшей разработки ветеринарных офтальмологических препаратов против инфекционного кератоконъюнктивита КРС.

5. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

6. Вклады авторов

Концептуализация, Д.А., Э.А.; методология, Д.А., Э.А.; программное обеспечение, Д.А.; валидация, Д.А., Э.А., Ж.К., А.К.; исследование, Д.А., Э.А.; курирование данных, А.К., Ж.К., А.К.; написание - подготовка оригинального черновика, Д.А., Э.А.; написание - рецензирование и редактирование, А.К., Ж.К., Н.О.; руководство, Ж.К.; администрирование проекта, Ж.К. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

7. Информация об авторах

Асержанов, Дастан - магистр естественных наук, преподаватель кафедры химии и экологии, Шәкәрім университет, ул. Глинки, 20А, Семей, Казахстан, 071412; dastan.aserjanov@shakarim.kz, <https://orcid.org/0009-0007-9217-9368>

Касымова, Жанар - кандидат биологических наук, доцент кафедры химии и экологии, Шәкәрім университет, ул. Глинки, 20А, Семей, Казахстан, 071412; kasymova-z@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4971-6638>

Клиненко, Алексей - PhD, ассоциированный профессор, руководитель Shakarim Lab, Шәкәрім университет, ул. Глинки, 20А, Семей, Казахстан, 071412; a.klivenko@shakarim.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8971-686X>

Омарова, Нурия – кандидат биологических наук, и.о. профессора кафедры химии, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Жайымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; omarova_nm@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6074-7104>

Абдуллина, Эльмира - научный сотрудник Shakarim Lab, Шәкәрім университет, ул. Глинки 20А, Семей, Казахстан, 071412; e.abdullina@shakarim.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8558-329X>

8. Финансирование: нет.

9. Благодарности: нет.

10. Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

11. Использование искусственного интеллекта. При подготовке рукописи авторы использовали инструменты искусственного интеллекта исключительно как вспомогательный инструмент для языковой правки и перевода текста. Инструменты ИИ не использовались для получения экспериментальных данных, формулирования научных выводов или замены интеллектуального вклада авторов. Авторы несут полную ответственность за точность, оригинальность, научную достоверность и целостность представленной рукописи.

12. Список литературы

1. Abdullina, E. S. (2022) Epizootological monitoring and veterinary and sanitary measures for bovine moraxellosis in Eastern Kazakhstan (Epizootologicheskii monitoring i veterinarno-sanitarnye meropriiatiia pri morakselleze krupnogo rogatogo skota v Vostochnom Kazakhstane in Russian) [Doctoral dissertation, Shakarim University].
2. Ahmad, A., Haneef, M., Ahmad, N., Kamal, A., Jaswani, S., & Khan, F. (2024). Biological synthesis of silver nanoparticles and their medical applications (Review). *World Academy of Sciences Journal*, 6(3), 22. <https://doi.org/10.3892/wasj.2024.237>
3. Asif, M., Yasmin, R., Asif, R., Ambreen, A., & Mustafa, M. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs), structural characterization, and their antibacterial potential. *Dose-response an International Journal*, 1–11. <https://doi.org/10.1177/15593258221088709>
4. Asserzhanov, D. K., Grachev, V., Hornok, V., Klivenko, A. N., Abdullina, E. S., Kassymova, Z. S., & Szilagyi, I. (2026). Electrosteric forces drive the stability and antibacterial function of polysaccharide-stabilized silver nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, 441, 129034. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2025.129034>
5. Baigazanov, A., & Abdullina, E. (2020) Infectious keratoconjunctivitis (moraxellosis) in cattle in East Kazakhstan (Infektsionnyi keratokon'iunktivit (moraksellez) krupnogo rogatogo skota v Vostochnom Kazakhstane in Russian). *Eurasian Union of Scientists*, 3, 9(78), 49-53. <https://archive.euroasia-science.ru/index.php/Euroasia/article/view/55> (in Russian)
6. Baigazanov, A. N., Abdullina, E. S., Kystaubaeva, A. E., & Usmanov, M. F. (2022). Etiology of infectious bovine keratoconjunctivitis in winter in the East of Kazakhstan (Etiologiya infektsionnogo keratokon'iunktivita krupnogo rogatogo skota v zimnii period na Vostoke Kazakhstana in Russian). *Multidisciplinary scientific journal – intelligence, idea, innovation*, 4, 27-34. https://doi.org/10.52269/22266070_2022_4_27
7. Balint, R., Paltinean, G. A., Mocanu, A., Horovitz, O., & Tomoaia-Cotisel, M. (2019). Interaction of silver nanoparticles with vancomycin: an UV-VIS study. *Journal of Studia Universitatis Babes-Bolyai Chimia*, 64(2), 335–343. <https://doi.org/10.24193/subbchem.2019.2.28>
8. Chicea, D., Nicolae-Maranciuc, A., & Chicea, L. M. (2024). Silver nanoparticles-chitosan nanocomposites: A comparative study regarding different chemical syntheses procedures and their antibacterial effect. *Materials*, 17(5), 1113. <https://doi.org/10.3390/ma17051113>
9. Federal Center of State Sanitary and Epidemiological Surveillance of the Ministry of Health of Russia. (2004). Guidelines for determining the susceptibility of microorganisms to antibacterial agents (MUK 4.2.1890–04), 91.

10. Fonseca, M. D. M., Maia, J. M. S., Varago, F. C., Gern, J. C., Carvalho, W. A., Silva, S. R., Mosqueira, V. C. F., Brandão, H. M., & Guimarães, A. S. (2020). Cloxacillin nanostructured formulation for the treatment of bovine keratoconjunctivitis. *Veterinary and Animal Science*, 9, 100089. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2020.100089>
11. Gong, X., Jadhav, N. D., Lonikar, V. V., Kulkarni, A. N., Zhang, H., Sankapal, B. R., Ren, J., Xu, B. B., Pathan, H. M., Ma, Y., Lin, Z., Witherspoon, E., Wang, Z., & Guo, Z. (2024). An overview of green synthesized silver nanoparticles towards bioactive antibacterial, antimicrobial and antifungal applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 323, 103053. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103053>
12. Ivanov, N. P., Sattarova, R. S., Shynybaev, K. M., Bakieva, F. A., Asyraubaeva, I. K., & Spiridonov, G. N. (2020). Distribution and antibiotic sensitivity of *Moraxella bovis* isolates isolated from cattle in the Republic of Kazakhstan (Rasprostranenie i antibiotikochuvstvitel'nost' izolyatov *Moraxella bovis*, vydelennykh ot krupnogo rogatogo skota v Respublike Kazakhstan in Russian). *Veterinary Medicine*, 3, 15-21. <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2020.23.3.15-21>
13. Kassymova, Z., Orazzhanova, L., Asserzhanov, D., Nurtazina, Z., Sapakova, A., Sabitova, A., & Nurgaliyev, N. (2025). Synthesis of silver nanoparticles using biopolymers for cultivation of *Chlorella vulgaris* protein biomass. *ES Materials and Manufacturing*, 28, 1576. <https://doi.org/10.30919/mm1576>
14. Kuibagarov, M., Zhylybayev, A., Ryskeldina, A., & Shevtsov, A. (2022). Antimicrobial susceptibility of *Moraxella bovis* and *Moraxella Bovoculi* isolates (Chuvstvitel'nost' izolyatov *Moraxella bovis* i *Moraxella bovoculi* k antimikrobnym preparatam in Russian). *Multidisciplinary scientific journal – intelligence, idea, innovation*, 3, 30-37. https://doi.org/10.52269/22266070_2022_3_30
15. Loo, Y. Y., Rukayadi, Y., & Kuan, C. H. (2018). In vitro antimicrobial activity of green synthesized silver nanoparticles against selected gram-negative foodborne pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1555, 1-7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01555>
16. Loy, J. D., Hille, M., Maier, G., & Clawson, M. (2021). Component causes of infectious bovine keratoconjunctivitis - the role of *Moraxella* species in the epidemiology of infectious bovine keratoconjunctivitis. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 37(2), 279-293. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2021.03.004>
17. Maboni, G., Gressler, L. T., Espindola, J. P., Schwab, M., Tasca, C., Potter, L., & Vargas, A. C. De. (2015). Differences in the antimicrobial susceptibility profiles of *Moraxella bovis*, *M. bovoculi* and *M. ovis*. *Brazilian Journal of Microbiology* 46, 2, 545-549. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-838246220140058>
18. More, P. R., Pandit, S., De Filippis, A., Franci, G., Mijakovic, I., & Galdiero, M. (2023). Silver nanoparticles: bactericidal and mechanistic approach against drug resistant pathogens. *Microorganisms*, 11 (2), 369. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020369>
19. Nasri, N., Rusli, A., Teramoto, N., Jaafar, M., Ku Ishak, K. M., Shafiq, M. D., & Abdul Hamid, Z. A. (2022). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles by using turmeric extract and chitosan mixture. *Materials Today: Proceedings*, 66, 3044–3048. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.335>
20. Nie, P., Zhao, Y., & Xu, H. (2023). Ecotoxicology and environmental safety synthesis, applications, toxicity and toxicity mechanisms of silver nanoparticles: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 253, 114636. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114636>
21. Parvekar, P., Palaskar, J., Metgud, S., & Maria, R. (2020). Biomaterial investigations in dentistry the minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) of silver nanoparticles against *Staphylococcus aureus*. *Biomaterial investigations in dentistry*, 7(1), 105–109. <https://doi.org/10.1080/26415275.2020.1796674>

22. Raza, S., Babita, K., Pooja, S., & Rohit, A. C. (2022). Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (icp-oes): a powerful analytical technique for elemental analysis. *Food Analytical Methods*, 1, 666–688. <https://doi.org/10.1007/s12161-021-02148-4>
23. Salleh, A., Naomi, R., Utami, N. D., Mohammad, A. W., Mahmoudi, E., Mustafa, N., & Fauzi, M. B. (2020). The potential of silver nanoparticles for antiviral and antibacterial applications: a mechanism of action. *Nanomaterials*, 10(8), 1566. <https://doi.org/10.3390/nano10081566>
24. Yang, J., Chen, Y., Zhao, L., Feng, Z., Peng, K., Wei, A., Wang, Y., Tong, Z., & Cheng, B. (2020). Preparation of a chitosan/carboxymethyl chitosan/AgNPs polyelectrolyte composite physical hydrogel with self-healing ability, antibacterial properties, and good biosafety simultaneously, and its application as a wound dressing. *Composites Part B: Engineering*, 197, 108139. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108139>
25. Zhang, M., Cheng, Y., Li, H., Li, M., & Yang, Q. (2024). Metallic nano-warriors: innovations in nanoparticle-based ocular antimicrobials. *Materials Today Bio*, 28, 101242. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2024.101242>

Хитозанмен тұрақтандырылған күміс нанобөлшектерін алу және бактерияға қарсы концентрациясын бағалау

Дастан Әсержанов, Жанар Касымова, Алексей Кливенко, Нурия Омарова, Эльмира Абдуллина

Аңдатпа. Хитозанмен тұрақтандырылған күміс нанобөлшектері (AgNPs-chitosan) айқын антимикробтық белсенділігіне, биоүйлесімділігіне және медицинада, ветеринарияда, сондай-ақ экологиялық технологияларда қолдану мүмкіндігіне байланысты үлкен қызығушылық тудырады. Хитозан биодеградацияланатын, уыттылығы төмен және өзіндік бактерияға қарсы қасиеттері бар биополимер болып табылады. Оны тұрақтандырғыш матрица ретінде қолдану AgNPs-тің коллоидтық тұрақтылығын арттырып, олардың бактериялық жасуша құрылымдарымен өзара әрекеттесуін күшейтеді. Осы зерттеудің мақсаты AgNPs-chitosan коллоидтық ерітіндісіндегі күмістің концентрациясын есептік және аспаптық әдістермен анықтау, сондай-ақ нанокөмірдің ірі қара малдың инфекциялық кератоконъюнктивитінің қоздырғышы болып табылатын *Moraxella bovoculi*-ге қатысты бактерияға қарсы белсенділігін бағалау болды. Бастапқы ерітіндідегі күміс концентрациясы енгізілген AgNO₃ мөлшеріне негізделген математикалық есептеу арқылы анықталып, кейін үлгілерді қышқылдық ыдыратудан соң ICP-OES әдісімен расталды. Сонымен қатар, нанобөлшектердің түзілуі мен оптикалық қасиеттері УК-көрінетін спектрофотометрия әдісімен, ал бактерияға қарсы белсенділігі бірізді сұйылтуларды пайдалана отырып, сорпадағы сериялық микродилуция әдісімен бағаланды. Зерттеу нәтижесінде бастапқы AgNPs-chitosan коллоидтық ерітіндісіндегі күмістің концентрациясы ICP-OES әдісімен 134,81 ± 0,11 мкг/мл екені анықталды, бұл есептік жолмен анықталған концентрация мәніне жақын болды. Сұйылту қатарында 67,5; 56,25; 45,0; 22,5 және 11,25 мкг/мл жұмыс концентрациялары алынды. Зерттелген концентрациялар ауқымында AgNPs-chitosan *Moraxella bovoculi*-ге қатысты тек қана 67,5 мкг/мл айқын бактерияға қарсы белсенділік көрсетті. Бұл концентрацияда бактериялық өсу толық тежелді. Бұл концентрацияны минималды ингибирлеуші концентрация және минималды бактерицидтік концентрация деп бағаланды. Алынған нәтижелер хитозанмен тұрақтандырылған AgNPs-нің жоғары антимикробтық әлеуетін көрсетеді және оларды жаңа бактерияға қарсы препараттарды әзірлеу үшін перспективалы негіз ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: күміс нанобөлшектері; хитозан; AgNPs-chitosan; ICP-OES; УК-көрінетін спектроскопия; бактерияға қарсы белсенділік; *Moraxella bovoculi*; инфекциялық кератоконъюнктивит.

Preparation and evaluation of the antibacterial concentration of chitosan-stabilized silver nanoparticles

Dastan Asserzhanov, Zhanar Kassymova, Alexey Klivenko, Nuriya Omarova, Elmira Abdullina

Abstract. Chitosan-stabilized silver nanoparticles (AgNPs-chitosan) have attracted considerable attention due to their antimicrobial properties, biocompatibility, and potential applications in medicine and veterinary science. Chitosan is a biodegradable and low-toxicity biopolymer with intrinsic antibacterial activity. As a stabilizing matrix, it improves the colloidal stability of silver nanoparticles, reduces particle aggregation, and enhances interactions between the nanocomposite and bacterial cells. The primary objective of this work was to quantify the silver content in an AgNPs-chitosan colloidal solution using both calculation-based and instrumental approaches and to evaluate the antibacterial activity of the obtained nanocomposite against *Moraxella bovoculi*, one of the causative agents of infectious bovine keratoconjunctivitis. The Ag concentration was calculated based on the amount of AgNO₃ introduced during synthesis and subsequently confirmed by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) after acid digestion of the samples. Nanoparticle formation and optical properties were characterized by UV-Vis spectrophotometry. Antibacterial activity was assessed using the broth serial microdilution method, followed by determination of the minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC). The Ag concentration in the initial AgNPs-chitosan colloidal solution determined by ICP-OES was 134.81 ± 0.11 µg/ml, which was in good agreement with the theoretical value of 135 µg/ml. Working silver concentrations of 67.5, 56.25, 45.0, 22.5, and 11.25 µg/ml were evaluated. Complete inhibition of *Moraxella bovoculi* growth was observed at an Ag concentration of 67.5 µg/ml. This concentration corresponded to both the minimum inhibitory concentration (MIC) and the minimum bactericidal concentration (MBC) under the experimental conditions. The obtained results demonstrate the antibacterial activity of AgNPs-chitosan against *Moraxella bovoculi* and confirm the potential of chitosan-stabilized AgNPs for the development of novel veterinary antimicrobial formulations.

Keywords: silver nanoparticles; chitosan; AgNPs-chitosan; ICP-OES; UV-Vis spectrophotometry; antibacterial activity; *Moraxella bovoculi*; infectious bovine keratoconjunctivitis.

Ионометрия әдісінің көмегімен өсімдіктер мен қына сығындыларындағы бейорганикалық компоненттерді анықтау

Ғалия Байсалова^{1*}, Бекзада Ертай², Кульди Тосмаганбетова¹, Абзал Талтенов¹, Айман Бердгалеева³

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; Tosmaganbetova_ks@enu.kz, abzal06@mail.ru

²Астана медициналық университеті, Астана, Қазақстан; Bekzada2001_2001@mail.ru

³М. Оспанов атындағы Батыс-Қазақстан медициналық университеті, Ақтөбе, Қазақстан; bak5393@mail.ru

*Корреспонденция: galya_72@mail.ru

Дәйексөз: Байсалова, Ғ., Ертай, Б., Тосмаганбетова, К., Талтенов, А., Бердгалеева, А. Ионометрия әдісінің көмегімен өсімдік сығындыларындағы бейорганикалық компоненттерді анықтау (2026). Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 156(3), 38-50.

<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-38-50>

Академиялық редактор:
С.С. Досмагамбетова

Редакцияға түсті:
16.02.2026
Түзетілді: 17.09.2026
Қабылданды: 29.09.2026
Басылымға шықты:
30.09.2026



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/>)

Аңдатпа: Төрт өсімдік түрінің (*Lythrum salicaria*, *Phragmites communis*, *Nonea pulla*, *Petunia hybrida*) және бір қынаның (*Parmelia sulcata*) матрицаларының сулы сығындылардағы калий (K^+) және натрий (Na^+) иондарын ионометриялық анықтаудың жедел әдістемесін бейімдеуге, сондай-ақ оны HorRat_r халықаралық қайталанымдық (сәйкестік) критерийі бойынша метрологиялық негіздеуге арналған.

Зерттеу барысында өсімдік және қына шикізатынан мақсатты иондарды экологиялық таза сулы экстракциялау әдісі қолданылды. Сандық талдау калий- және натрий-селективті электродтар көмегімен тікелей потенциометрия (ионометрия) әдісімен жүргізілді. Әдістеменің іс-жүзіндегі қайталанымдығын (сәйкестік) бағалау Хорвиц математикалық моделіне негізделген HorRat_r индексін есептеу арқылы жүзеге асырылды. Метрологиялық сараптама нәтижелері әзірленген әдістеменің жоғары қайталанушылығын көрсетті. Өсімдік және қына үлгілерінің анатомиялық құрылымы мен элементтердің концентрациялық деңгейінің әртүрлілігіне қарамастан, HorRat_r индексінің мәндері калий иондары үшін 0,72–1,50 (орташа мәні 1,004), ал натрий иондары үшін 1,11–1,78 (орташа мәні 1,40) аралығын құрады. Барлық алынған көрсеткіштер халықаралық IUPAC/AOAC хаттамаларында бекітілген рұқсат етілген эмпирикалық диапазонға (0,5–2,0) толықтай сыйып, әдістеменің жоғары тұрақтылығын дәлелдеді. Ионселективті жүйенің ультра-, микроконцентрациялар аймағында да (қына үлгісінде) дәл нәтиже көрсететіні айғақталды. Сонымен қатар натрий, калий иондары үшін анықтау шегі (LOD) және сандық анықтау шегі (LOQ) анықталды.

Түйін сөздер: калий иондары; натрий иондары; өсімдік сығындысы; HorRat индексі; потенциометриялық әдіс; ионселективті электрод; LOD/LOQ; селективтілік коэффициенттері; Нернст көлбеуі.

1. Кіріспе

Адам ағзасының құрылымдық негізін қамтамасыз етуде және бұлшықет жұмысынан бастап жасушалық алмасуға дейінгі барлық өмірлік маңызды үдерістерді реттеуші ретінде макроминералдардың рөлі белгілі. Макроэлементтердің арасында калий мен натрий элементтерінің маңыздылығы жоғары.

Калий ағзаның барлық ұлпаларында болады. Жасушаішілік сұйықтық көлемін және трансмембраналық электрохимиялық градиенттерді ұстап тұру қабілетіне байланысты жасушалардың қалыпты жұмыс жасауына қажет ион (Stone, 2016).

Ересек адам ағзасындағы жалпы калийдің мөлшері 1 кг дене массасына есептегенде 45 миллимольді құрайды. Калийдің көбірек бөлігі жасуша ішінде, ал қалғаны жасушадан тысқары сұйықтық құрамында болады. Жасуша ішіндегі калийдің мөлшері жасуша сыртындағы мөлшерінен шамамен 30 есе артық. Осы айырмашылық трансмембраналық электрохимиялық градиент туындатады. Бұл градиентті натрий-калий (Na^+/K^+) АТФаза тасымалдаушысы ұстап тұрады. Аталмыш градиент жасушалық тонусты қамтамасыз етумен қатар, нерв импульстарын дұрыс беруде, бұлшық еттер жиырылуы мен бүйрек функциясында қажет (Hinderling, 2016).

Калийдің жетіспеушілігі қан қысымын, бүйректе тас түзілу мүмкіндігін, сүйек тінінің жаңару жылдамдығын арттырады. Қандағы калийдің төмендеуі, яғни гипокалиемия шаршау, бұлшықет әлсіздігімен, іш қатумен сипатталады. Егер гипокалиемияның ауыр формасы болса, оның бұлшықет жиырылуына, демек жүрек функциясына әсері өмірге қауіпті болады (Lanham-New, 2012, Moreno-Rojas, 2016).

Бақылау зерттеулері жемістер мен көкөністер арқылы калий тұтынуды арттыру, сүйектің минералдық тығыздығының жоғарылауына әкелетіндігін анықтаған (Hanley, 2013). Бұл деректер метаболикалық зерттеулердің нәтижелерімен және бірнеше клиникалық сынақтармен бірлесе отырып, диеталық калий сүйек денсаулығын жақсартта алатынын болжауға мүмкіндік береді.

Натрий - адам ағзасының қалыпты және сау жұмыс істеуі үшін өте маңызды негізгі минералдардың бірі (Chiang, 2024, Huang, 2020). Оның басты қызметі - жасушалар мен оның айналасындағы сұйықтық көлемін теңгерімде ұстап, ағзадағы су балансын реттеу. Сонымен қатар, натрий қан айналымы жүйесіндегі қысымды қажетті деңгейде сақтап, қан қысымын бақылауда маңызды рөл атқарады (Filippini, 2021, Huang, 2020).

Бұл элемент жүйке мен бұлшықет жүйесінің қызметі үшін де өте қажет. Ол жүйке импульстерінің миға және басқа мүшелерге кедергісіз, жылдам берілуін қамтамасыз етеді. Осының нәтижесінде жүрек бұлшықеті мен денедегі басқа да бұлшықеттер дұрыс жиырылып, босаңсый алады. Оған қоса, натрий жасушалық деңгейде белсенді қызмет атқарып, жасушалардың глюкоза мен амин қышқылдары сияқты өмірлік маңызы бар қоректік заттарды тиімді сіңіруіне көмектеседі (Kenneth, 2021).

Су-электролиттік бұзылулар көптеген клиникалық және хирургиялық жағдайларда өте жиі кездеседі және егер дер кезінде қалпына келтірмесе, ауыр салдарларға әкелуі мүмкін. Бұл бұзылулар қан плазмасындағы натрий (Na) мен калийді (K) талдау арқылы анықталады (Garcia, 2018).

Жоғарыда аталып өткендей, натрий мен калий адам гомеостазы үшін маңызды электролиттер болып табылады және олардың деңгейінің өзгеруі емделушіде ауыр асқинулар тудыруы мүмкін (Bernal, 2023).

Осылайша, иондарды анықтау әдісі неғұрлым дәл, сезімтал және арнайы (спецификалық) болса, емхананың дұрыс терапиялық шараларды жүргізуіне соғұрлым көп негіз болады.

Өсімдік тектес тағамдар адам үшін осы алмастырылмайтын макроэлементтердің негізгі көзі болып табылады. Адам ағзасы натрий мен калийді өздігінен синтездей алмайды, сондықтан олардың тапшылығы немесе теңгерімсіздігі (су-электролиттік бұзылулар)

туындаған кезде, өсімдік дақылдарына бай дұрыс рацион терапияның басты элементіне айналады.

Азық ретінде тұтынылатын өсімдіктердің сапасы мен қауіпсіздігі олардың құрамындағы осы иондардың мөлшеріне тікелей байланысты (Naozuka, 2025). Өсімдік шикізатындағы олардың концентрациясын бақылау екі негізгі себеп бойынша маңызды:

1. Калий тапшылығының алдын алу: Адамды жүрек пен қан тамырларының саулығы үшін қажетті калийдің тәуліктік көлемімен қамтамасыз ету үшін, өсірілетін дақылдарда оның жеткілікті мөлшері болуы керек.
2. Натрий мөлшерінің артық болуын бақылау: Тұзданған топырақта өсірілген өсімдіктер натрийді шамадан тыс жинақтайды, бұл оларды гипертониясы (қан қысымы жоғары) және бүйрек жеткіліксіздігі бар адамдар үшін қауіпті етеді.

Осылайша, өсімдіктердегі (Na^+) және (K^+) иондарын дәл анықтау тек ауыл шаруашылығы үшін ғана емес, сонымен қатар диетология, медицина және тамақ қауіпсіздігі үшін стратегиялық мәнге ие. Бұл адам өз ағзасының электролиттік гомеостазын сақтау үшін тұтынатын өнімдердің нутритивті (қоректік) құрамын бақылауға мүмкіндік береді.

Экологиялық, биологиялық, тағамдық және өнеркәсіптік матрицалардағы элементтерді анықтау үшін спектрометриялық әдістер кеңінен қолданылады. Атомдық-флуоресцентті спектрометрия, жалынды атомдық-абсорбциялық спектрометрия, графитті пешті атомдық-абсорбциялық спектрометрия, ультракүлгін-көрінетін молекулалық абсорбциялық спектрофотометрия және индуктивті байланысқан плазмалы оптикалық эмиссиялық спектрометрия сәтті әрі жақсы дәлелденген әдістер болып табылады (Thomas, 2001; Thomas, 2023; Ahmad, 2022; Chen, 2022; Fu, 2018; Mokgalaka, 2006).

Ал электрохимиялық әдістерден ионометрия белгілі бір иондарға тән арнайы мембраналарды қолдануға негізделген. Бұл әдісте мембрананың екі жағындағы концентрациялар айырмашылығы арқылы потенциал түзіледі. Бұл жүйеде екі электрод қолданылуы керек, оның ішіндегі салыстырмалы электрод тұрақты потенциалға ие болады. Ионға арналған селективті (талғампаз) электрод үлгінің концентрациясына қарай өзгеретін кернеуді тудырады. Осылайша, салыстырмалы электрод пен өлшеуіш электрод потенциалдарының айырмашылығы негізінде ерітіндідегі иондардың концентрациясы есептеледі және ол Нернст теңдеуімен өрнектеледі (Kurovsky, 2024).

Ионометрия әдісінің кейбір артықшылықтарына сенімділік, тұрақтылық, талғампаздық (селективтілік), сезімталдық және үлгінің аз көлемін қолдану жатады. Сонымен қатар, ол жылдам нәтиже береді және үлгідегі өзгерістерге (мысалы, қан плазмасы үшін липемия, гемолиз және сарғаю) байланысты кедергілерге ұшырамайды, өйткені мұнда электролиттердегі тек иондар ғана өлшенеді. Бұл сипаттамалар ионометрия әдісін клиникалық және өндірістік сынақтарда қолдануға болатын маңызды әдістемеге айналдырады.

Жоғарыда аталған спектрометриялық әдістердің негізгі кемшіліктері - жабдықтардың жоғары құнында, сынама дайындаудың күрделілігінде, талдаудың деструктивті (сынаманы бұзатын) сипатында және ерітіндінің түсі мен бұлыңғырлығына сезімталдығында (оптикалық әдістер үшін). Ал ионометрия әдісі өзінің қарапайымдылығы, арзандығы және күрделі орталарда (плазма, қан, ағынды сулар) бос иондарды тікелей өлшеу мүмкіндігі арқылы ерекшеленеді.

Осы жұмыстың мақсаты - зертхана жағдайында өсімдік және қына үлгілеріндегі ерімтал натрий және калий иондарының концентрациясын тікелей экспресс-анықтау үшін ионометрия **әдісін бейімдеу (адаптациялау)**, сондай-ақ тәжірибе нәтижесінде алынған әдістеменің метрологиялық сипаттамаларын бағалау болып табылады.

2. Материалдар мен әдістер

Зерттеуде натрий иондарын анықтау үшін ЭЛИС-112Na маркалы шыны натрий-селективті электрод, ал калий иондарын анықтау үшін ЭЛИС-121K маркалы ПВХ-мембраналы калий-селективті электрод («Эконикс-Эксперт» ЖШҚ, Ресей) қолданылды.

Электродтар «Эксперт-001» иономерімен бірге жұмыс істеуге арналған және хлоркүміс (Ag/AgCl) салыстырмалы электродпен жинақталды.

2.1. Өсімдік шикізатынан сығындылар алу

Зерттеу объектілері ретінде *Lythrum salicaria*, *Phragmites communis*, *Nonea pulla*, *Petunia hybrida* өсімдіктерінің және *Parmelia sulcata* қынасының үлгілері пайдаланылды. Алынған өсімдік шикізаты алдын ала кептіріліп, ұнтақталды. Әр үлгіден 5,0 г дәл өлшеніп алынып, үстіне 200 мл тазартылған су қосылды. Қоспа бөлме температурасында 2 сағат бойы тұндырылды. Тұндырылған сығынды сүзгі қағазы арқылы сүзіліп, талдау үшін дайындалды.

2.2. Сулы сығындылар құрамындағы натрий-иондарының концентрациясын Na^+ -селективті электрод көмегімен анықтау (РД 52.24.415-2007)

2.2.1. Кальций хлоридінің ерітіндісін дайындау

500 мл өлшегіш колбаға 110 грамм кальций хлоридін салып, дистилденген сумен ерітіп, колбаны белгісіне дейін толтырады.

Ол жоғары концентрациялы фондық электролит ретінде иондық күшті реттегіш және тұрақтандырушы қызметін атқарады. Өсімдік экстракттарының өзгермелі табиғи иондық күшін біркелкі жоғары деңгейге жеткізу арқылы мақсатты Na^+ иондарының белсенділік коэффициентін тұрақты етеді. Сондай-ақ, Ca^{2+} катиондары Никольский–Эйзенман теңдеуіне сәйкес, натрий-селективті электродтың бетінде басқа бөгде бір зарядты катиондардың (K^+ , NH_4^+) бәсекелестік кедергі келтіруші әсерін тиімді түрде басады.

2.2.2. Тығыздығы 0,1 моль/дм³ аммиак ерітіндісін даярлау

Сыйымдылығы 500 мл өлшегіш колбаға 25 %-тік аммиак ерітіндісінің 1,9 мл құйылып, колба белгісіне дейін, сумен толтырылады.

Ол ортаның рН көрсеткішін сілтілі аймаққа ($\text{pH} > 9$) жылжыту арқылы рН реттеуіш қызметін атқарады. Бұл натрий-селективті электродтарға басты кедергі келтіретін сутек иондарының (H^+) әсерін толық жою үшін қажет. Сілтілі ортада сутек иондарының белсенділігі минималды деңгейге түсіп, электродтың тек мақсатты натрий катиондарына ғана потенциометриялық жауап беруін қамтамасыз етеді.

2.2.3. Натрий иондарының градуирленген ерітінділер даярлау

Градуирленген ерітінділер натрийдің стандартты үлгілерінен даярланады.

Сыйымдылығы 50 мл стаканدارға 30 мл натрий иондарының келесі концентрациядағы: $1,00 \cdot 10^{-4}$; $2,00 \cdot 10^{-4}$; $6,00 \cdot 10^{-4}$; $1,00 \cdot 10^{-3}$; $1,00 \cdot 10^{-2}$ моль/дм³ ерітінділері құйылады. Әрбір стаканға 4 мл кальций хлориді мен 1 мл аммиак ерітіндісін құяды. Стакандарды магнитті араластырғышқа орналастырып, ондағы сұйықтықты араластырады. Электродтар батырылып, градуирлеу ерітінділерінің потенциалдары натрий ионының төмен концентрациясынан ($1,00 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³) жоғары концентрациясына ($1,00 \cdot 10^{-2}$ моль/дм³) қарай «Эксперт-001» маркалы рН-метр-иономерде өлшенеді.

Электродтың бату тереңдігі мен араластыру жылдамдығы барлық өлшеулер үшін бірдей сақталады. Потенциал тұрақталғаннан кейін құрал көрсеткіштері тіркеледі. Калибрлеу графигі $\text{pNa} = -\lg[\text{Na}^+]$ және потенциал мәндерінің негізінде тұрғызылады.

2.2.4. Өсімдік сығындыларындағы натрий-иондарын анықтау

Әрбір өсімдік сығындыларынан 30 мл алып, 4 мл кальций хлориді мен 1 мл аммиак ерітіндісі құйылып, 2.2.3-пунктінде келтірілген әдістеме бойынша өлшеулер жүргізіледі. Алынған потенциалдар мәндеріне сәйкес, натрий иондары градуирлеу графигі көмегімен табылады.

2.3. Сулы сығындылар құрамындағы калий-иондарының концентрациясын K^+ -селективті электрод көмегімен анықтау (РД 52.24.365-2008)

2.3.1. Буферлік ерітінді: 1 моль/дм³ трис-(оксиметил)-аминометан ерітіндісін даярлау

Сыйымдылығы 250 мл стаканға 30,30 г трис-(оксиметил)-аминометан салып, 70-80 мл дистилденген сумен ерітеді. Үстіне 15 мл концентрлі тұз қышқылын құяды. Сыйымдылығы 250 мл болатын өлшегіш колбаға даярланған ерітіндіні құйып, белгіге дейін сумен толтырылады. Араластырған соң қағаз фильтрмен сүзу қажет. Даярланған ерітінді рН мәні 7,5-8 болуы қажет.

Трис-(оксиметил)-аминометан рН тұрақтандырушы және матрицалық әсерді төмендетуші қызметін атқарады. Трис-буфер ерітіндінің рН мәнін калий-селективті электрод үшін оңтайлы саналатын 7,5–8,0 диапазонында қатаң түрде ұстап тұрады. Бұл өсімдік сығындыларында кездесетін табиғи органикалық қышқылдардың әсерінен рН-тың ауытқуын тежеп, сутек катиондарының бәсекелестік ықпалын жояды және HorRat метрологиялық шарттарына сай өлшеулердің жоғары қайталанушылығына мүмкіндік береді.

2.3.2. Калий иондарының градуирленген ерітінділер даярлау

Калибрлеу ерітінділері массалық концентрациясы $3,910 \text{ г/дм}^3$ ($1,00 \cdot 10^{-1} \text{ моль/дм}^3$) аттестатталған калий ерітіндісінен бірізді сұйылту арқылы дайындалды. Әдістемеге сәйкес $1,00 \cdot 10^{-2}$; $1,00 \cdot 10^{-3}$; $2,00 \cdot 10^{-4}$; $1,00 \cdot 10^{-4}$; $5,00 \cdot 10^{-5}$; $2,00 \cdot 10^{-5}$ және $1,00 \cdot 10^{-5} \text{ моль/дм}^3$ концентрациялы ерітінділер даярланады.

Сыйымдылығы 50 мл стаканға 30 мл градуирлеу ерітінділері құйылып, әрбіреуіне 1,5 мл буферлік ерітінді құяды. Магнитті араластырғыш көмегімен араластырады.

Электродтар салып, ерітінді потенциалдары өлшенеді. Әр тәжірибе 3 рет қайталанатын.

2.3.3. Өсімдік сығындыларындағы калий-иондарын анықтау

Әрбір өсімдік сығындыларына (көлемі 30 мл) 1,5 мл буферлік ерітінді құяды. Араластырып, потенциалдар өлшенеді. Градуирлеу қисығынан, потенциалдың мәніне сәйкес калий-ионы концентрациясы табылады.

Градуирлеу графигі потенциалдың рNa мәндеріне тәуелділік қисығы түрінде тұрғызылады (Kurovsky, 2024).

3. Нәтижелер және оларды талқылау бөлімі

Бұл еңбекте алғаш рет ионометрия көмегімен жоғарыдағы аталып өткен өсімдіктер мен қына құрамындағы қозғалғыш калий мен натрий иондарының мөлшерін анықтау үшін осы иондардың судағы мөлшерін анықтаудың басшылық құжаттарының (РД 52.24.415-2007, РД 52.24.365-2008) негізінде бейімделген арнайы әдістемелер жасалып, осы иондардың сулы сығындылардағы молярлық концентрациялары анықталды.

Ионометриялық өлшеулер жүргізгенде мына жағдайларды ескеру керек (Kurovsky, 2024):

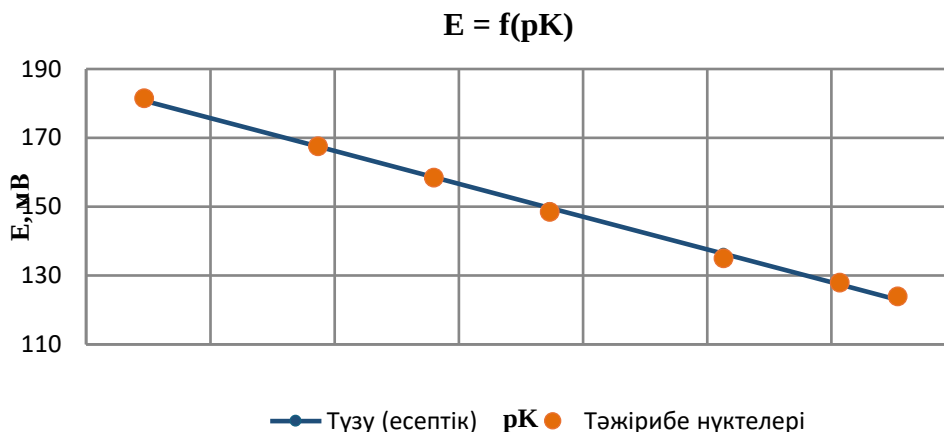
- алдымен оңтайлы сұйылтулар таңдалуы керек;
- иономерлерді калибрлеу;
- стандартты ерітінділердегі анықталатын ионның концентрацияларын зерттелетін (белгісіз) үлгілер калибрлеудің шеткі нүктелері арасындағы диапазонға түсетіндей етіп таңдау қажет.

Калий мен натрий иондарын сандық анықтауға қатысты жасалған әдістеме негізінде градуирлеу графиктері тұрғызылды. 1-суретте ионселективті электродтар потенциалының (Е) иондар концентрациясының теріс логарифміне (рК, рNa) тәуелділік графигі көрсетілген.

Ионселективті электродтардың градуирлеу тәуелділіктерін Нернст модельдік теңдеуімен салыстыра талдау барысында потенциал мәндерінің (Е) рК және рNa шамаларына сызықтық тәуелділігі анықталды. Тәжірибелік калибрлеу деректерін математикалық аппроксимациялау нәтижесінде калий-селективті электродтың эксперименттік көлбеулік коэффициентінің абсолютті мәні 44,3 мВ/декаданы, ал натрий-селективті электрод үшін 14,2 мВ/декаданы құрады. 25 °С температурадағы бір зарядты катиондарға арналған идеалды теориялық Нернст көлбеуімен (59,16 мВ/декада) салыстырғанда бұл көрсеткіштер айқын субнернстік сипатқа ие. Калий электроды жауабының теориялық мәннен ауытқуы өсімдік экстракты матрицасының көпкомпонентті әсерінен туындаса, натрий электродының көлбеулік коэффициентінің тым

төмендеуі әдістемеге сәйкес рН ортасын тұрақтандыру және иондық күшті реттеу үшін қосылатын аммиак буфері мен кальций хлоридінің жоғары концентрациялық фондық кедергілерімен түсіндіріледі.

1-суретте калий иондарының концентрациясының теріс логарифмі артқан сайын электрод потенциалының мәні пропорционалды түрде кемитінін көруге болады.



Сурет 1. Ионселективті электродтар потенциалының (E) $[K^+]$ -иондар концентрациясының теріс логарифміне (pK) тәуелділік графигі

Сонымен калий-селективті электрод үшін:

- Регрессиялық теңдеу: $E = 314,3 - 44,3pK$;
- Детерминация коэффициенті: $R^2 = 0,967$
- Параллель өлшеулердің стандартты ауытқуы (қателіктер): $\pm 1,5 - \pm 2,1$ мВ құрады.

Lythrum salicaria, *Phragmites communis*, *Nonea pulla*, *Petunia hybrida* өсімдіктерінен және *Parmelia sulcata* қынасынан алынған сулы сығындыларының әрбіреуінен үш сынамалар алынып, тиісті сұйылтулар жүргізілген соң, калий ионселективті электроды көмегімен потенциалдары өлшеніп, градуирлеу тәуелділігінен калий иондарының сәйкес молярлық концентрациялары анықталды. Одан кейін құрғақ өсімдік, қына үлгілеріндегі осы ионның массалық үлестері есептелді. Алынған мәліметтер 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1. K^+ иондарының өсімдіктер мен қынадағы мөлшері

Үлгілер	Талданатын үлгідегі K^+ иондардың мөлшері					
	$C_m(K^+)$ сығындыдағы, моль/л			$\omega(K^+)$ құрғақ үлгідегі, %		
	I	II	III	I	II	III
<i>Lythrum salicaria</i>	0,0032	0,0034	0,0032	0,5411	0,5710	0,5411
<i>Phragmites communis</i>	0,0029	0,0029	0,0032	0,4487	0,4487	0,5032
<i>Nonea pulla</i>	0,0182	0,0182	0,0171	2,8500	2,8500	2,6800
<i>Petunia hybrida</i>	0,0114	0,0114	0,0121	1,7980	1,7980	1,9119
<i>Parmelia sulcata</i>	0,0004	0,0003	0,0004	0,0631	0,0561	0,0631

Натрий-селективті электрод үшін регрессиялық теңдеу мына сипатта: $E = -2433,7 - 14,2pNa$ ($R^2 = 0,967$) және параллель өлшеулердің стандартты ауытқуы $\pm 0,8 - \pm 1,2$ мВ болды. Натрий ионселективті электродын қолдана отырып, аталмыш өсімдік түрлерінен алынған сығындылардағы натрий иондары концентрациясы анықталды (кесте 2).

Кесте 2. Na^+ иондарының өсімдіктер мен қынадағы мөлшері

Үлгілер	Талданатын үлгідегі Na^+ иондардың мөлшері					
	$C_m(Na^+)$ сығындыдағы, моль/л			$\omega(Na^+)$ құрғақ үлгідегі, %		
	I	II	III	I	II	III
<i>Lythrum salicaria</i>	0,0066	0,0056	0,0056	0,2050	0,1755	0,1755
<i>Phragmites communis</i>	0,0014	0,0012	0,0012	0,0490	0,0430	0,0430
<i>Nonea pulla</i>	0,0090	0,0102	0,0093	0,3100	0,3500	0,3200
<i>Petunia hybrida</i>	0,0009	0,0010	0,0009	0,0210	0,0240	0,0210
<i>Parmelia sulcata</i>	0,0002	0,00025	0,00025	0,0080	0,010	0,010

Өсімдіктердің сулы сығындыларындағы калий иондарын ионометриялық анықтау әдістемесінің қайталанымдық (сәйкестік) критерийін бағалау мақсатында халықаралық метрологиялық стандарттарына сәйкес $HorRat_r$ индексі есептелді (Horwitz, 2006). Бұл критерий әдістеменің эксперименттік жолмен табылған қайталанымдық (сәйкестік) көрсеткішін (RSD_{found}) концентрациялық тәуелділікті ескеретін Хорвиц математикалық моделі бойынша есептелген теориялық рұқсат етілген ауытқумен ($RSD_{expected}$) салыстыруға мүмкіндік береді. Халықаралық тәжірибеде $HorRat_r$ индексінің 0,5-тен 2,0-ге дейінгі эмпирикалық диапазоны әдістеменің толықтай жарамды әрі тұрақты жұмыс істейтіндігінің негізгі көрсеткіші болып табылады:

- $0,5 \leq HorRat$ индексі ≤ 2 – әдістің қолайлы дәлдігі;
- $HorRat$ индексі > 2 - нәтижелердің қайталанымдылығы күтілгеннен төмен;
- $HorRat$ индексі $< 0,5$ - деректердің әдеттен тыс төмен ауытқуы.

Калий иондарының мөлшерін анықтау барысында алынған метрологиялық мәліметтер (кесте 3) талданатын төрт түрлі өсімдік (*Lythrum salicaria*, *Phragmites communis*, *Nonea pulla*, *Petunia hybrida*) және бір қына (*Parmelia sulcata*) матрицаларының барлығында $HorRat$ индексі 0,72-ден 1,50-ге дейінгі аралықты көрсетіп, бекітілген нормативтік шекке (0,5–2,0) толықтай сәйкес келді. Бағаланатын объектілер бойынша калий иондарының мөлшерін анықтауда $HorRat$ индексінің орташа мәні 1,004-ті құрады, бұл әдістеменің қайталанымдық (сәйкестік) деңгейінің халықаралық классикалық химиялық талдау стандарттарымен мінсіз үйлесімділігін айғақтайды.

Ең төменгі $HorRat_r$ көрсеткіштері *Lythrum salicaria* (0,72) және *Nonea pulla* (0,73) үлгілерінде тіркелді, бұл аталған матрицалардағы өлшеулердің өте жоғары дәлдігін (іс-жүзіндегі ауытқу 3,13 % және 3,51 %) көрсетеді. *Petunia hybrida* үлгісінде индекс мәні идеалды деңгейге (0,98) жетіп, теориялық болжаммен толық сәйкестік байқатты. *Phragmites communis* (1,50) үлгісінде ауытқудың сәл жоғарылауы қамыс тіндерінің кремнийге бай, қатты талшықты

құрылымымен және сулы экстракция кезіндегі иондардың диффузиялық ерекшеліктерімен түсіндіріледі, алайда бұл мән де рұқсат етілген шектен аспайды.

Ерекше атап өтетін жайт, калий мөлшері өте аз (~0,06 %) *Parmelia sulcata* қына үлгісінде де HorRat_r индексі 1,09 мәнін көрсетті. Бұл ионоселективті электродтың микроконцентрациялар аймағында да фондық кедергілерге төтеп беріп, тұрақты нәтиже шығара алатынын дәлелдейді.

Кесте 3. K^+ -иондарының құрғақ өсімдік және қына үлгілеріндегі массалық үлестерін метрологиялық бағалау нәтижелері (HorRat_r индексі)

Үлгі атауы	Орташа мән, $\bar{x}$	Стандартты ауытқу (SD)	Іс-жүзіндегі қайталанымдық (сәйкестік) көрсеткіші ($\text{RSD}_{\text{found}}$, %)	Теориялық рұқсат етілген ауытқу ($\text{RSD}_{\text{expected}}$, %)	HorRat_r индексі
<i>Lythrum salicaria</i>	0,005511	0,000173	3,13	4,38	0,72
<i>Phragmites communis</i>	0,004669	0,000315	6,74	4,49	1,50
<i>Nonea pulla</i>	0,002793	0,000098	3,51	4,84	0,73
<i>Petunia hybrida</i>	0,018360	0,000658	3,58	3,65	0,98
<i>Parmelia sulcata</i>	0,000608	0,000040	6,65	6,10	1,09

Осындай метрологиялық бағалау көмегімен өсімдік объектілерінен алынған сығындылардағы натрий иондарын аталмыш әдіспен өлшеу әдістемесінің аналитикалық жарамдылығы да бағаланды. Алынған эксперименттік мәліметтерді математикалық есептеу нәтижелері (кесте 4) зерттелген барлық 4 өсімдік және 1 қына матрицаларында HorRat_r индексі 1,11-ден 1,78-ге дейінгі аралықтағы диапазонда екені анықталды. Бұл мәндер Халықаралық теориялық және қолданбалы химия одағы (IUPAC) мен халықаралық талдау қоғамдастықтарының қауымдастығы (AOAC) хаттамаларында бекітілген эмпирикалық рұқсат етілген шекке (0,5–2,0) толықтай сәйкес келеді. Әдістеме бойынша HorRat_r индексінің жалпы орташа мәні 1,40-ты құрады.

Жекелеген үлгілерді қарастыру барысында ең үздік нәтижелер *Petunia hybrida* (1,11) және *Phragmites communis* (1,21) матрицаларында тіркелді, мұндағы іс-жүзіндегі қайталанымдық (сәйкестік) көрсеткіші ($\text{RSD}_{\text{found}}$) 7,87 % және 7,70 % теориялық рұқсат етілген ауытқумен ($\text{RSD}_{\text{expected}}$) 7,10 % және 6,38 % барынша жақын үйлесімділік көрсетті. *Nonea pulla* үлгісінде де HorRat_r индексі 1,35 мәнімен жоғары дәлдікті сипаттады. *Lythrum salicaria* үшін аталмыш индекс 1,78 құрады және бұл мән де рұқсат етілмеген (критикалық) аймаққа ($\text{HorRat}_r > 2,0$) өткен жоқ.

Ерекше ғылыми қызығушылық тудыратын нәтиже *Parmelia sulcata* қына үлгісінде байқалды. Бұл матрицада натрий мөлшері өте төмен, яғни ультраіздік деңгейде (~0,009 %) болса да, әдістеменің іс-жүзіндегі сәйкестік ауытқуы 12,37 %-дан асқан жоқ, ал HorRat_r индексі 1,53 мәнін берді. Халықаралық метрологиялық практикада концентрация төмендеген сайын ауытқудың заңды түрде өсетіні ескеріледі (бұл үлгі үшін теориялық рұқсат етілген

ауытқу ($RSD_{\text{expected}} = 8,08 \%$), сондықтан алынған 1,53 көрсеткіші ионоселективті жүйенің микроконцентрациялармен жұмыс істеудегі жоғары тұрақтылығын дәлелдейді.

Кесте 4. Na^+ -иондарының құрғақ өсімдік және қына үлгілеріндегі массалық үлестерін метрологиялық бағалау нәтижелері (HorRat индексі)

Үлгі атауы	Орташа мән, $\bar{x}$	Стандартты ауытқу (SD)	Іс-жүзіндегі қайталанымдық (сәйкестік) көрсеткіші (ауытқуы) ($RSD_{\text{found}}, \%$)	Теориялық рұқсат етілген ауытқу ($RSD_{\text{expected}}, \%$)	HorRat индексі
<i>Lythrum salicaria</i>	0,001853	0,000170	9,19	5,16	1,78
<i>Phragmites communis</i>	0,000450	0,000035	7,70	6,38	1,21
<i>Nonea pulla</i>	0,003267	0,000208	6,37	4,73	1,35
<i>Petunia hybrida</i>	0,000220	0,000017	7,87	7,10	1,11
<i>Parmelia sulcata</i>	0,000093	0,000012	12,37	8,08	1,53

Тек градуирлеу графиктерінің сызықтық сипаты электродтың белгілі бір концентрациялық диапазонда Нернст типті жауап беретінін көрсеткенімен, оның нақты аралас жүйедегі талғампаздығын (селективтілігін) жеке өзі толық дәлелдей алмайтынын ескеру қажет. Әдістеменің күрделі өсімдік және қына сығындыларындағы аналитикалық селективтілігі мен жарамдылығы мақалада келтірілген HorRat_r метрологиялық критериймен қосымша негізделді. Зерттелген барлық үлгілерде HorRat_r индексі калий үшін 0,72–1,50, ал натрий үшін 1,11–1,78 шегінде болып, IUPAC/AOAC хаттамаларында бекітілген рұқсат етілген эмпирикалық диапазонға (0,5–2,0) сай келді. Бұл электродтардың субнернстік көлбеулігіне қарамастан, ұсынылған аралас экспресс-әдістеменің жоғары сәйкестілігі мен аналитикалық тұрақтылығын жанама түрде айғақтайды.

Зерттеу жұмысында қолданылған ионселективті электродтардың паспорттық деректері мен әдебиеттерге сәйкес, бөгде иондар бойынша селективтілік коэффициенттерінің ($K_{i,j}$) мәндері келесідей (Umezawa, 2000) :

- Калий-селективті электрод үшін: $K_{K, \text{NH}_4^+} = 2 \cdot 10^{-2}$; $K_{K, \text{Na}^+} = 5 \cdot 10^{-3}$; $K_{K, \text{Ca}^{2+}} = 5 \cdot 10^{-3}$; $K_{K, \text{Mg}^{2+}} = 2 \cdot 10^{-4}$.
- Натрий-селективті электрод үшін: $K_{\text{Na}, \text{K}^+} \approx 6 \cdot 10^{-1}$; $K_{\text{Na}, \text{NH}_4^+} \approx 2 \cdot 10^{-1}$; $K_{\text{Na}, \text{Ca}^{2+}} \approx 2 \cdot 10^{-2}$.

Коэффициенттердің бұл төмен мәндері (әсіресе $K_{i,j} \ll 1$) электродтардың анықталатын негізгі иондарға бөгде катиондармен салыстырғанда жоғары талғампаздыққа (жүздеген және мыңдаған есе) ие екенін ғылыми тұрғыдан дәлелдейді. Сонымен қатар, натрийді анықтау барысында калийдің кедергі келтіруші әсерін ($K_{\text{Na}, \text{K}^+} \approx 0,6$) барынша азайту мақсатында әдістемеге сәйкес ерітіндінің иондық күшін реттегіш ретінде кальций хлориді ерітіндісі енгізілді. Ол бөгде иондардың фондық белсенділігін тұрақтандырып, Никольский–Эйзенман тендеуі бойынша кедергілерді жоюға және HorRat_r метрологиялық көрсеткіштерінің (0,5–2,0) тұрақты шығуына мүмкіндік берді.

Әзірленген ионометриялық экспресс-әдістеменің аналитикалық жарамдылығын халықаралық IUPAC/AOAC талаптарына сай (ICH Topic Q2, 2005) кешенді бағалау мақсатында негізгі валидациялық параметрлер анықталды:

- Анықтау шегі (LOD) және сандық анықтау шегі (LOQ): Тәжірибелік калибрлеу графиктерінің фондық иондық күш жағдайындағы ауытқулары мен 3σ және 10σ критерийлері негізінде есептелді. Калий иондары үшін LOD мәні $5,0 \cdot 10^{-6}$ моль/л, LOQ - $1,5 \cdot 10^{-5}$ моль/л құрады. Натрий иондары үшін LOD - $2,0 \cdot 10^{-5}$ моль/л, LOQ - $6,5 \cdot 10^{-5}$ моль/л деңгейінде анықталды. Бұл көрсеткіштер әдістің тіпті *Parmelia sulcata* қынасы сияқты ультрамикрoконцентрациялы объектілерде де сенімді жұмыс істейтінін дәлелдейді.
- Сызықтық жұмыс диапазоны: ионоселективті жүйенің сызықтық жауап беру аймағы K^+ үшін $1,0 \cdot 10^{-5}$ - $1,0 \cdot 10^{-1}$ моль/л диапазонын, ал Na^+ үшін $1,0 \cdot 10^{-4}$ - $1,0 \cdot 10^{-2}$ моль/л диапазонын қамтиды.

Тіркелген ең төменгі концентрация анықталған *Parmelia sulcata* қына үлгісінің нәтижелері ($C(K^+) = 3,7 \cdot 10^{-4}$ моль/л және $C(Na^+) = 2,3 \cdot 10^{-4}$ моль/л) осы есептелген LOQ көрсеткіштерімен сандық түрде салыстырылды. Салыстыру нәтижесі көрсеткендей, қына сығындысындағы иондар мөлшері әдістеменің сандық анықтау шегінен (LOQ) калий үшін 24 есе, ал натрий үшін 3,5 есе жоғары. Осылайша, қына үлгісінде HorRat индексінің тұрақты болуы (калий үшін 1,09 және натрий үшін 1,53) тек кездейсоқ математикалық сәйкестік емес, өлшенген шамалардың әдістің сандық анықтау шегінен (LOQ) сенімді түрде асып түсуінің және калибрлеу жүйесінің төменгі концентрациялар аймағындағы жоғары аналитикалық тұрақтылығының тікелей салдары екені ғылыми тұрғыдан толық дәлелденді.

4. Қорытынды

1. Алғаш рет төрт түрлі өсімдік (*Lythrum salicaria*, *Phragmites communis*, *Nonea pulla*, *Petunia hybrida*) және бір қына (*Parmelia sulcata*) матрицаларының мысалында тікелей потенциометрия көмегімен, калий және натрий иондарын сандық анықтау әдістемесіне халықаралық IUPAC/AOAC хаттамаларына сәйкес кешенді метрологиялық бағалау жүргізілді.

2. Бейімделген әдістеменің қайталанымдығы (сәйкестігі) Хорвиц математикалық моделі негізінде толықтай дәлелденді. Калий иондары үшін HorRat_r индексінің мәндері 0,72 - 1,50 (орташа мәні 1,004) аралығын, ал натрий иондары үшін 1,11 - 1,78 (орташа мәні 1,40) аралығын көрсетіп, халықаралық деңгейде рұқсат етілген 0,5 - 2,0 эмпирикалық диапазонына сәйкес келді.

3. Алынған метрологиялық сараптама қорытындысы бойынша ұсынылып отырған экспресс-әдіс өсімдік объектілерін талдау, физиологиялық зерттеулер мен экологиялық мониторинг міндеттерін шешуде қымбат тұратын жалынды фотометрия мен атомдық-абсорбциялық спектрометрия әдістеріне тиімді, қолжетімді, экологиялық таза және нәтижесі сенімді балама ретінде практикалық қолдануға ұсынылады.

5. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

6. Авторлық үлестер

Концептуализация - Г.Б., А.Т.; жетекшілік пен жобаны басқару - Г.Б.; әдістеме - Б.Е., Г.Б.; формалды талдау - К.Т., А.Т.; деректерді өңдеу - А.Т.; түпнұсқа жобаны жазу - Г.Б., Б.Е.; нәтижелерді тексеру - К.Т.; визуализация - А.Т.; зерттеу - А.Б.; редакциялау мен түзету - Г.Б., А.Б. Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасымен танысып, келісті.

7. Автор туралы ақпарат

Байсалова, Галия – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің профессоры м.а., Қажымұқан көшесі, 13, Астана, Қазақстан, 010000; galya_72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1338-0308>.

Ертай, Бекзада - Астана медицина университетінің магистранты, Сарыарқа даңғылы, 33, Астана, Қазақстан, 010000; Bekzada2001_2001@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6883-0062>

Тосмағанбетова, Кульди – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің аға оқытушы, Қажымұқан көшесі, 13, Астана, Қазақстан, 010000; Tosmaganbetova_ks@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2731-6470>

Талтенов, Абзал – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің профессоры, Қажымұқан көшесі, 13, Астана, Қазақстан, 010000; abzal06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0620-3816>

Бердгалеева, Айман - биология ғылымдарының кандидаты, М. Оспанов атындағы Батыс-Қазақстан медициналық университетінің фармацевтикалық пәндер кафедрасының доценті, Маресьев көшесі, 68, Ақтөбе, Қазақстан, 030019; bak5393@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1197-4578>

8. Қаржыландыру: Бұл зерттеу ешқандай сыртқы қаржыландыруды алған жоқ.

9. Алғыстар: Жок.

10. Мүдделер қақтығысы: Мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейміз.

11. Әдебиеттер тізімі

1. Ahmad, R., Shaaban, H., Issa, S. Y., Alsaad, A., Alghamdi, M., Hamid, N., Osama, R., Algarni, S., Mostafa, A., & Alqarni, A. M. (2022) ICP-MS determination of elemental abundance in traditional medicinal plants commonly used in the Kingdom of Saudi Arabia. *Food Addit. Contam.:Part B*, 15, 129–141.
2. Bernal, A., Zafra, M. A., Simón, M. J., & Mahía, J. (2023). Sodium homeostasis, a balance necessary for life. *Nutrients*, 15(2), 395. <https://doi.org/10.3390/nu15020395>
3. Chen, W., Yang, Y., Fu, K., Zhang, D., & Wang, Z. (2022) Progress in ICP-MS analysis of minerals and heavy metals in traditional medicine. *Front. Pharmacol*, 13, 891273.
4. Chiang, B. M., Ye, M., Chattopadhyay, A., Halezeroglu, Y., Van Blarigan, E. L., & Abuabara, K. (2024). Sodium intake and atopic dermatitis. *JAMA Dermatology*, 160(7), 725–731. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2024.1544>
5. Filippini, T., Malavolti, M., Whelton, P. K., Naska, A., Orsini, N., & Vinceti, M. (2021). Blood pressure effects of sodium reduction: dose–response meta-analysis of experimental studies. *Circulation*, 143(16), 1542-1567. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.120.050371>
6. Fu, L., Shi, S. Y., & Chen, X. Q. (2018) Accurate quantification of toxic elements in medicine food homologous plants using ICP-MS/MS. *Food Chem*, 245, 692–697.
7. Gagnon, K.B., & Delpire, E. (2021). Sodium transporters in human health and disease. *Front Physiol*, 11, 588664. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.588664>
8. Garcia, R. A., Vanelli, C. P., & Pereira J. O. S. (2018). Comparative analysis for strength serum sodium and potassium in three different methods: Flame photometry, ion- selective electrode (ISE) and colorimetric enzymatic. *J Clin Lab Anal.*, 32, e22594. <https://doi.org/10.1002/jcla.22594>
9. Hanley, D. A., & Whiting, S. J. (2013). Does a high dietary acid content cause bone loss, and can bone loss be prevented with an alkaline diet? *J Clin Densitom*, 16, 420-5.
10. Hinderling, P. H. (2016). The pharmacokinetics of potassium in humans is unusual. *J Clin Pharmacol*, 56, 1212-20.
11. Horwitz, W., & Albert, R. (2006). The Horwitz ratio (HorRat): a useful index of method performance with respect to precision. *J. AOAC Int*, 89(4), 1095-1109.

12. Huang, L., Trieu, K., Yoshimura, S., Neal, B., Woodward, M., Campbell, N. R. C., Li, Q., Lackland, D. T., Leung, A. A., Anderson, C. A. M., MacGregor, G. A., & He, F. J. (2020). Effect of dose and duration reduction in dietary sodium on blood pressure levels: systematic review and meta-analysis of randomised trials. *BMJ*, 368, m315. <https://doi.org/10.1136/bmj.m315>
13. ICH Topic Q2 (R1) (2005). Validation of analytical procedures: text and methodology. International Conference on Harmonisation (ICH). Geneva, ICH Secretariat, 17 p. ich.org
14. Kurovsky, A., Khan, I., & Gummer, Y. (2024). Electrochemical methods in plant nutritional physiology: ionometry and conductometry. *Organic Fertilizers*, <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007335>
15. Lanham-New, S. A., Lambert, H., & Frassetto, L. (2012). Potassium. *Advances in Nutrition*, 3(6), 820–821. <https://doi.org/10.3945/an.112.003012>
16. Mokgalaka, N. S., Gardea-Torresdey, J. L. (2006) Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry: principles and applications. *Appl. Spectrosc. Rev*, 41, 131–150
17. Moreno-Rojas, R., Cámara-Martos, F., & Amaro-López, M. Á. (2016). *Potassium: properties and Determination*. Encyclopedia of Food and Health.
18. Naozuka, J., Pereira de Oliveira, A., Bolignano de Oliveira, H., Oliveira Lima, L., & Seimi Nomura, C. (2025). Determination of essential and toxic elements by ICP-MS in herbal medicines. *ACS Omega*, 10(43), 50695-50708. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c05971>
19. Roche, J. R. (2016). Feed Ingredients: feed supplements: macrominerals. Reference Module in Food Science. Encyclopedia of dairy sciences, 371-377. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.00759-9>
20. RD 52.24.365-2008. (2008). Mass concentration of sodium in water. Measurement procedure using the potentiometric method with an ion-selective electrode (Massovaya koncentraciya natriya v vodah. Metodika vypolneniya izmerenij potenciometricheskim metodom s ionselektivnym elektrodom in Russian). – Rostov-na-Donu, Gidrohimicheskij institut Rosgidrometa.
21. RD 52.24.415-2007. (2007). Mass concentration of potassium ions in water. Measurement procedure using the potentiometric method with an ion-selective electrode (Massovaya koncentraciya ionov kaliya v vodah. Metodika vypolneniya izmerenij potenciometricheskim metodom s ionselektivnym elektrodom in Russian). Rostov-na-Donu, Gidrohimicheskij institut Rosgidrometa.
22. Stone, M. S., Martyn, L., & Weaver, C. M. (2016). Potassium intake, bioavailability, hypertension, and glucose control. *Nutrients*, 8(7), 444. <https://doi.org/10.3390/nu8070444>
23. Thomas, R. (2001). A beginner's guide to ICP-MS. *Spectroscopy*, 16(4), 38-42.
24. Thomas, R. (2023). *Practical guide to ICP-MS and other atomic spectroscopy techniques*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003187639>
25. Umezawa, Y., Bühlmann, P., Umezawa, K., Tohda, K., & Amemiya, S. (2000) Potentiometric selectivity coefficients of ion-selective electrodes. Part I. Inorganic cations. *Pure Appl. Chem*, 72, 1851–2082.

Determination of inorganic components in extracts of plants and lichen by ionometry

Galiya Baisalova, Bekzada Yertay, Kuldi Tosmaganbetova, Abzal Taltenov, Aiman Berdgaleyeva

Abstract. The work is devoted to the adaptation of a rapid ionometric method for the determination of potassium (K^+) and sodium (Na^+) ions in aqueous extracts, using the matrix of four plant species

(*Lythrum salicaria*, *Phragmites communis*, *Nonea pulla*, *Petunia hybrida*) and one lichen (*Parmelia sulcata*) as an example, as well as to its metrological validation according to the international repeatability criterion HorRat_r.

During the study, an environmentally friendly aqueous extraction method was used to isolate target ions from plant and lichen raw materials. Quantitative analysis was performed by direct potentiometry (ionometry) using potassium- and sodium-selective electrodes. The evaluation of the repeatability of the method was carried out by calculating the HorRat_r index based on the Horwitz mathematical model. The results of the metrological evaluation demonstrated high reproducibility of the developed method. Despite the differences in the anatomical structure and element concentration levels among the plant and lichen samples, the HorRat_r index values ranged from 0,72 to 1,50 (mean value 1.004) for potassium ions, and from 1,11 to 1,78 (mean value 1,40) for sodium ions. All obtained indicators fell strictly within the acceptable empirical range (0,5-2,0) established by international IUPAC/AOAC protocols, proving the high stability of the method. It was confirmed that the ion-selective system yields accurate results even in the ultra-microconcentration range (demonstrated by the lichen sample). In addition, the limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) for sodium and potassium ions were calculated.

Keywords: potassium ions; sodium ions; plant extract; HorRat_r index; potentiometric method; ionselective electrode; LOD/LOQ; selectivity coefficients; Nernstian slope.

Определение неорганических компонентов в экстрактах растений и лишайника методом ионометрии

Галия Байсалова, Бекзада Ертай, Кульди Тосмаганбетова, Абзал Талтенов, Айман Бердгалеева

Аннотация. Работа посвящена адаптации экспресс-методики ионометрического определения ионов калия (K⁺) и натрия (Na⁺) в водных экстрактах матриц четырёх видов растений (*Lythrum salicaria*, *Phragmites communis*, *Nonea pulla*, *Petunia hybrida*) и одного лишайника (*Parmelia sulcata*), а также ее метрологическому обоснованию по международному критерию повторяемости (сходимости) HorRat_r.

В ходе исследования применялся метод экологически чистой водной экстракции целевых ионов из сырья растений и лишайника. Количественный анализ выполнялся методом прямой потенциометрии (ионометрии) с помощью калий- и натрий-селективных электродов. Оценка повторяемости (сходимости) методики осуществлялась путем расчета индекса HorRat_r, основанного на математической модели Хорвица. Результаты метрологической экспертизы показали высокую воспроизводимость разработанной методики. Несмотря на различия в анатомическом строении и уровне концентрации элементов в образцах растений и лишайника, значения индекса HorRat_r составили от 0,72 до 1,50 (среднее значение 1,004) для ионов калия и от 1,11 до 1,78 (среднее значение 1,40) для ионов натрия. Все полученные показатели полностью уложились в допустимый эмпирический диапазон (0,5–2,0), установленный международными протоколами IUPAC/AOAC, что доказало высокую стабильность методики. Было доказано, что ионоселективная система показывает точные результаты даже в области ультрамикроразбавлений (на примере образца лишайника). Кроме того, для ионов натрия и калия были рассчитаны пределы обнаружения (LOD) и количественного определения (LOQ).

Ключевые слова: ионы калия; ионы натрия; растительный экстракт; индекс HorRat_r; потенциометрический метод; ионоселективный электрод; LOD/LOQ; коэффициенты селективности; наклон Нернста.

Lithium-content-dependent ionic conductivity of NASICON-Type LATP solid electrolytes synthesized by the molten flux method

Ayazhan Bekmakhanova^{1,2}, Mukagali Yegamkulov¹, Zhansaya Bakhytzhanova^{1,2}, Gaukhar Tazhkenova², Arailym Nurpeissova¹, Zhumabay Bakenov¹, Aliya Mukanova^{1*}

¹Institute of Batteries LLC, Astana, Kazakhstan;

bekmahanovaaazan877@gmail.com, mukagali.yegamkulov@nu.edu.kz,
zhansayab.1977@gmail.com, arailym.nurpeissova@nu.edu.kz,
Zbakenov@nu.edu.kz, aliya.mukanova@nu.edu.kz

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;

zhansayab.1977@gmail.com, bekmahanovaaazan877@gmail.com,
gaukhar-1970@mail.ru

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

Citation: Bekmakhanova, A., Yegamkulov, M., Bakhytzhanova, Zn., Tazhkenova, G., Nurpeissova, A., Bakenov, Zh., Mukanova, A. (2026). Lithium-content-dependent ionic conductivity of NASICON-Type LATP solid electrolytes synthesized by the molten flux method. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 156(3), 51-65. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-51-65>

Academic Editor:
S.S. Dosmagambetova

Received: 13.05.2026

Revised: 23.07.2026

Accepted: 29.09.2026

Published: 30.09.2026



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: The article provides a comparative assessment of the structural and electrochemical properties of lithium aluminum titanium phosphate (LATP) solid electrolytes with different lithium contents LATP ($\text{Li}_{1.3-1.5}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$). LATP polycrystals with NASICON-type structure were synthesized by the molten flux method, which included mixing LiNO_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ and $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ precursors, followed by staged heating at 170°C, 500°C, and 800°C, pressing, and final sintering at 800°C for 4 hours. X-ray diffraction analysis confirmed the formation of the main LATP crystalline phase, while an increase in lithium concentration led to the appearance of secondary phases such as $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$, AlPO_4 , and TiP_2O_7 , which affected ionic conductivity. Electrochemical impedance spectroscopy showed that LATP ($\text{Li}_{1.4}$) exhibits the highest ionic conductivity ($1.66\text{--}1.85 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ at 25°C) compared to $\text{Li}_{1.3}$ and $\text{Li}_{1.5}$ samples due to its higher structural density and optimal phase composition. The temperature dependence analysis revealed that increasing temperature enhances lithium-ion mobility, confirming thermally activated ion transport. Therefore, the $\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$ composition demonstrates the most promising characteristics as a solid electrolyte for all-solid-state lithium batteries.

Keywords: lithium-ion batteries; NASICON; LATP; RF magnetron sputtering; annealing; electrochemical impedance spectroscopy; electrochemical performance.

1. Introduction

In recent years, the rapid development of portable electronics, electric vehicles, and large-scale energy storage systems has intensified the demand for safer and higher-performance energy storage technologies. Conventional lithium-ion batteries employing liquid electrolytes have achieved remarkable commercial success; however, they still face several limitations related to

safety, thermal stability, electrolyte leakage, and the formation of lithium dendrites during cycling. Consequently, the development of all-solid-state lithium batteries (ASSLBs) has become one of the most actively explored directions in modern electrochemical energy storage research. In ASSLB systems, the flammable liquid electrolyte is replaced by a solid-state electrolyte, which simultaneously serves as an ion-conducting medium and a physical separator between the electrodes.

Solid-state electrolytes (SSE) are a broad class of compounds – oxides (perovskite and garnet types), phosphates (NASICON), sulfides, hydrides, halides, and glasses (borate, phosphate, etc.) – that are being actively studied as an alternative to liquid electrolytes (Waetzig et al., 2020; Zhang et al., 2018). Interest in them is due to a number of advantages: high thermal and electrochemical stability, a wide electrochemical window, and a significant shear modulus that prevents the growth of lithium dendrites (Liu et al., 2018; Yang et al., 2020; Zhu et al., 2015). An additional advantage is safety and environmental friendliness, since SE eliminates the risk of liquid leakage.

Among the different categories of solid electrolytes, oxide-based materials are considered particularly attractive because of their superior chemical stability in air and compatibility with high-voltage cathode materials. Compared to sulfide electrolytes, oxide systems demonstrate better environmental stability and mechanical strength, which are important for practical battery applications. Among oxide electrolytes, NASICON-type lithium conductors have attracted extensive attention due to their unique crystal structure and favorable electrochemical properties. NASICON materials possess a rigid three-dimensional framework that enables fast ion transport through interconnected channels, making them promising candidates for solid-state lithium batteries (Zhang et al., 2023; Moustafa et al., 2020; Wolfenstine et al., 2018; Bachman et al., 2016).

Of the various types of solid electrolytes, materials with a NASICON structure, in particular $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP), attract special attention. Their crystal lattice is based on the rhombohedral structure of $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$ (LTP, space group $R\bar{3}c$), formed by a three-dimensional network of octahedral TiO_6 and tetrahedral PO_4 blocks. As illustrated in Figure 1, this architecture creates channels for the migration of Li ions. Substitution of some Ti^{4+} cations with trivalent ions (Al^{3+} , Fe^{3+} , Y^{3+} , etc.) leads to the formation of LATP compounds. The introduction of Al^{3+} increases the concentration of mobile Li ions and weakens the Li-O bond, which contributes to an increase in ionic conductivity (Randau et al., 2020). Given these advantages, LATP materials are considered promising candidates for use in thin-film solid-state electrolytes (Reddy et al., 2020).

The ionic transport mechanism in LATP is associated with the migration of lithium ions through the interconnected NASICON framework. Due to this three-dimensional conduction pathway, LATP materials can exhibit ionic conductivity values reaching 10^{-4} - 10^{-3} S/cm under optimized conditions. In addition, LATP demonstrates good thermal stability and structural robustness, which are essential for long-term electrochemical cycling. However, several challenges still limit the practical implementation of LATP electrolytes. One of the major issues is lithium deficiency arising during synthesis or thin-film deposition processes. Lithium loss at elevated temperatures can lead to the formation of impurity phases, increased grain boundary resistance, and reduced electrochemical performance.

In particular, sputtering has become widespread because it enables precise control of film thickness, composition, and uniformity. This method is especially suitable for thin-film microbattery applications requiring homogeneous electrolyte layers. However, magnetron sputtering is often accompanied by lithium losses during deposition, resulting in deviations from stoichiometry and reduced ionic conductivity of the films (Zhang et al., 2018; Wu et al., 2023; Xiao et al., 2019). To compensate for these losses, LATP compositions with controlled excess lithium were synthesized in this work to maintain optimal electrochemical characteristics of the material (Lovett et al., 2024).

In addition to lithium evaporation during sputtering, the electrochemical performance of LATP thin films strongly depends on the quality of the target pellet material. Parameters such as phase purity,

crystallinity, density, and particle morphology directly influence the properties of the deposited films. Therefore, obtaining homogeneous and highly crystalline LATP ceramics with optimized lithium concentration is essential for successful thin-film fabrication.

The present study focused on obtaining a single-phase, highly conductive LATP material. Among the various synthesis approaches, the molten flux method has attracted significant attention due to its ability to produce well-crystallized materials with controlled morphology and improved ionic conductivity (Nuernberg et al., 2024). This method involves dissolving the precursors in a molten salt medium, which acts as a flux to promote ion diffusion, reduce reaction temperature, and enhance phase purity. Compared to conventional solid-state or sol-gel techniques, the molten flux method offers advantages such as shorter reaction times, uniform particle size distribution, and higher crystallinity (Tolganbek et al., 2021; Mashekova et al., 2022; Baltash et al., 2023).

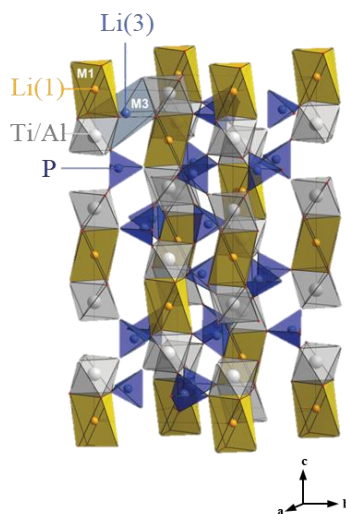


Figure 1. Crystal structure of LATP (DeWees & Wang, 2019)

The molten flux method has demonstrated excellent potential in achieving materials with high ionic conductivity. However, compositional optimization remains necessary, as partial lithium loss may occur during the sputtering process used for thin-film electrolyte fabrication (Arbi et al., 2007). This lithium deficiency can lead to structural instability and reduced ionic performance. Therefore, fine-tuning the target pellet composition is essential to compensate for lithium loss and ensure the formation of a stable, highly conductive LATP phase during thin-film deposition (Liu et al., 2017).

Furthermore, variations in lithium concentration can significantly influence the microstructure, grain connectivity, and grain boundary resistance of LATP ceramics, all of which strongly affect ionic transport properties. Therefore, systematic investigation of lithium content is necessary to determine the optimal composition for achieving both phase stability and enhanced ionic conductivity.

In this work, NASICON-type LATP ceramics with different lithium contents ($x = 0.3-0.5$) were synthesized using the molten flux method to systematically investigate the influence of lithium concentration on phase composition, microstructure, densification, activation energy, and ionic conductivity. Unlike previous studies that mainly focused on conventional LATP compositions or different synthesis routes, this work identifies the optimum lithium composition for producing dense LATP ceramic targets intended for subsequent thin-film electrolyte fabrication by magnetron sputtering.

2. Materials and methods

2.1. Material preparation

NASICON-type LATP ($\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$, $x = 0.3-0.5$) solid electrolytes with various compositions were synthesized using the molten-flux method, as described in studies. To prepare LATP ($x = 0.3-0.5$), precursor powders of LiNO_3 (99 %), Al_2O_3 (99 %), TiO_2 (99.5 %), $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (98 %), and $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (99.5 %) were accurately weighed and mixed according to the required stoichiometric ratios. An additional 5 % excess of lithium was introduced into all samples during the initial precursor preparation stage to compensate for potential lithium loss occurring throughout the sintering process.

The mixture was preheated at 170 °C for 30 min to remove volatile components and initiate precursor decomposition. The resulting intermediate was finely ground and calcined in a muffle furnace at 500 °C for 5 h with a controlled heating rate of 5 °C/min to promote phase formation.

Following calcination, the powders were further treated at 800 °C for 4 h under the same heating rate and subsequently pressed into 10 mm diameter pellets with pressure of 10 tons (~1.25 GPa). Final densification was achieved by sintering the pellets, covered with mother powders at 800 °C for 4 h in air. For electrochemical measurements, thin gold films (~100 nm) were deposited on both sides of the sintered pellets by magnetron sputtering to serve as blocking electrodes.

2.2. Material characterization

After pellet preparation, their structural, morphological, and electrochemical properties were systematically characterized. The crystal structure was examined by X-ray diffraction (XRD) on a SmartLab (Rigaku, Japan) setup using Cu K α radiation ($\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1.54056 \text{ \AA}$, $\lambda_{\text{CuK}\alpha 2} = 1.54439 \text{ \AA}$) in the Bragg-Brentano reflection geometry. The surface morphology of the sintered pellets was observed using scanning electron microscopy (SEM, JEOL JSM- IT800, Japan).

2.3. Electrochemical investigation

The ionic conductivity of pelletized LATP prepared by various compositions was measured by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) (potentiostat/galvanostat, Metrohm AutoLab 204, the Netherlands) in the frequency range of 1 Hz-1 MHz with a potential amplitude of 10 mV. Obtained resistance (R) values and parameters such as thickness (d) and area of pellets (S) were used to calculate the ionic conductivity (σ) of the samples by an equation of $\sigma = d/R \times S$. The activation energy for Li^+ conduction was determined from the temperature dependence of the ionic conductivity using Arrhenius plots over the range of 25-85 °C.

3. Results

The obtained results confirmed the successful synthesis of NASICON-type $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) ceramics with high crystallinity using the molten flux method.

XRD analysis revealed that all samples predominantly consisted of the rhombohedral LATP phase, while only minor secondary phases appeared at higher lithium contents. The diffraction peaks indicated good crystallization and structural stability of the synthesized materials.

SEM observations demonstrated that lithium concentration significantly influenced the morphology and densification of the ceramics. The $\text{Li}_{1.4}$ composition exhibited larger and more densely packed grains with improved intergranular connectivity, whereas the $\text{Li}_{1.5}$ sample showed increased grain heterogeneity. These microstructural differences strongly affected the electrochemical properties of the materials.

EIS confirmed thermally activated lithium-ion transport behavior for all compositions. With increasing temperature, the resistance decreased while ionic conductivity increased, indicating enhanced lithium-ion mobility within the NASICON framework. $\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$ demonstrated the best electrochemical performance, including the highest density, lowest activation energy, and maximum

ionic conductivity of 1.85×10^{-4} S/cm at 25°C. The improved performance is attributed to optimized lithium content, enhanced grain connectivity, and reduced grain-boundary resistance.

3.1. XRD analysis

The X-ray diffraction (XRD) patterns of the synthesized $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ (LATP, $x = 0.3-0.5$) ceramics with different Li_{1+x} contents are shown in Figure 2. All samples exhibit well-defined diffraction peaks corresponding to the characteristic reflections of the NASICON-type rhombohedral structure (space group $R\bar{3}c$), consistent with the standard JCPDS card for $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$ (PDF# 35-0354). The observed diffraction patterns are in good agreement with previous reports on NASICON-type LATP synthesized by molten-flux and solid-state methods (Tolganbek et al., 2021; Baltash et al., 2023; Öksüzöğlu et al., 2024). The sharp and intense peaks confirm the high crystallinity of the obtained materials. For the composition $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$, a pure NASICON phase was obtained without detectable secondary phases. In contrast, when the Al content was increased to $x = 0.4$ and 0.5 , weak additional peaks appeared in the XRD patterns, which were indexed to minor secondary phases such as AlPO_4 , $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$, and TiP_2O_7 . The presence of these phases suggests that excessive Al substitution and lithium volatilization during high-temperature processing may lead to partial decomposition and phase segregation.

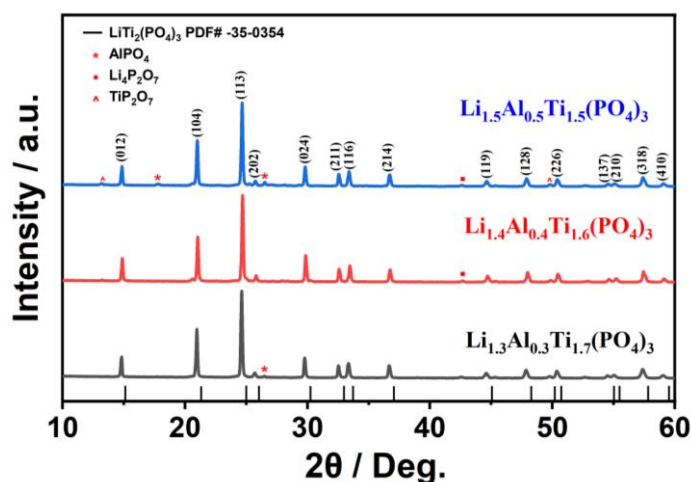


Figure 2. XRD patterns of LATP (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5 samples

Nevertheless, the main diffraction peaks remain dominant for all compositions, indicating that the NASICON-type phase is the primary crystalline phase across the studied Li_{1+x} content range ($x=0.3-0.5$). Moreover, with increasing Al substitution, a slight shift of the diffraction peaks toward higher 2θ angles can be observed, which maybe attributed to the partial replacement of larger Ti^{4+} ions ($0.605 \text{ \AA}$) by smaller Al^{3+} ions ($0.535 \text{ \AA}$) in the crystal lattice. This lattice contraction is consistent with previous reports on Al-doped LTP materials. Overall, the XRD results confirm that Al doping successfully stabilizes the NASICON framework while minor secondary phases appear at higher Al contents due to lithium loss and local structural distortions. Reliability factors obtained from Rietveld refinement of the LATP samples are summarized in Table 1.

Table 1. Reliability factors obtained from Rietveld refinement of the LATP samples

Sample	R _{wp} (%)	R _p (%)	S	χ^2	Main phase (wt. %)
Li _{1.3}	12.33	8.69	2.07	4.30	97.8
Li _{1.4}	9.40	7.26	1.59	2.54	88.2
Li _{1.5}	11.10	7.88	1.94	3.75	77.0

To further validate the crystal structure and phase composition, Rietveld refinement was performed for all samples. The calculated diffraction patterns showed good agreement with the experimental data, as indicated by the refinement confirmed that the NASICON-type LATP phase was the dominant crystalline phase in all samples ($R_{wp} = 9.40$ -12.33 %, $S = 1.59$ -2.07). In addition, minor secondary phases were detected, including $AlPO_4$ in Li_{1.3}, $Li_4P_2O_7$ in Li_{1.4}, and $Li_4P_2O_7$, $AlPO_4$, TiP_2O_7 in Li_{1.5}. (Ma et al., 2016; Yang et al., 2021). Table 2 shows the refined lattice parameters of LATP samples obtained from Rietveld refinement.

Table 2. Refined lattice parameters of LATP samples obtained from Rietveld refinement

Sample	Phase	a, Å	b, Å	c, Å	α , °	β , °	γ , °
Li _{1.3}	Lithium aluminum titanium tris(orthophosphate)	8.5067 (4)	8.5067 (4)	20.836 (2)	90.000	90.000	120.000
	Aluminum phosphate	13.494 (13)	13.494 (13)	13.494 (13)	90.000	90.000	90.000
Li _{1.4}	Lithium aluminum titanium tris(orthophosphate)	8.4987 (7)	8.4987 (7)	20.8166 (19)	90.000	90.000	120.000
	Tetralithium diphosphate(V)	8.577 (3)	7.109 (3)	5.183 (2)	111.51 (4)	89.94 (5)	103.005 (19)
Li _{1.5}	Lithium aluminum titanium tris(orthophosphate)	8.5063 (4)	8.5063 (4)	20.8626 (14)	90.000	90.000	120.000
	Tetralithium diphosphate(V)	8.580 (8)	7.142 (10)	5.187 (8)	112.37 (16)	90.31 (12)	103.08 (9)
	Berlinite	4.941 (7)	4.941 (7)	11.06 (3)	90.000	90.000	120.000
	Titanium phosphate	26.11 (16)	26.11 (16)	26.11 (16)	90.000	90.000	90.000

Rietveld refinement confirmed that the LATP phase remained the dominant crystalline phase in all samples, while minor changes in the lattice parameters were observed with increasing lithium content. The refinement also revealed the presence of secondary phosphate phases, particularly for the $\text{Li}_{1.5}$ composition, which is consistent with the XRD analysis.

3.2. Scanning electron microscopy

Figure 3 shows SEM images of the surface of LATP samples with different aluminum contents ($x = 0.3, 0.4$, and 0.5). It is observed that changing the stoichiometry has a significant impact on the morphology of the ceramic materials. For the LATP composition ($x = 0.3$), the microstructure is characterized by relatively fine and uniformly distributed grains of predominantly rectangular shape (Öksüzöğlu et al., 2024). Grain boundary regions are clearly defined, and individual pores indicate incomplete density of the material. With an increase in aluminum content to $x = 0.4$, coarsening of the crystallites with more distinct faceting and the formation of large block grains is observed. The grains are densely packed, indicating more intense crystallite growth and improved microstructural connectivity compared to the sample with $x = 0.3$. For LATP ($x = 0.5$), the characteristic polygonal particle shape is retained, but a broader grain size distribution is observed, including both small and large crystallites. This heterogeneity may be due to changes in grain growth kinetics with increased aluminum concentration.

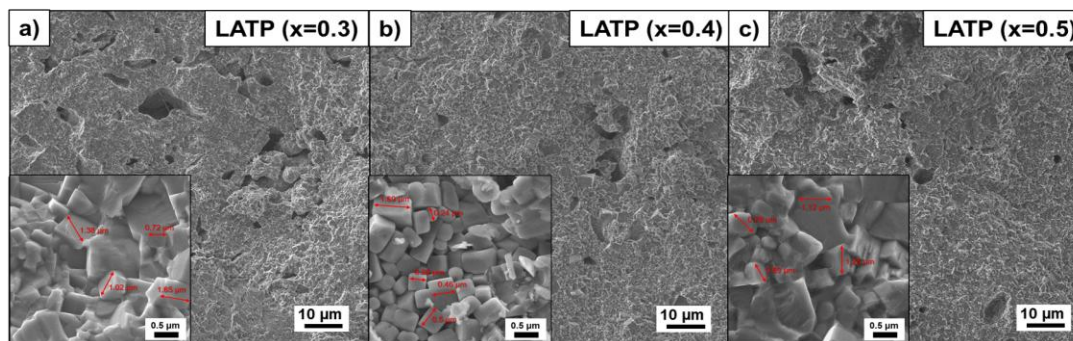


Figure 3. SEM images of $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5 pellets

In addition, the reduction in visible pore regions for the $x = 0.4$ composition suggests improved densification during the sintering process. Better grain-to-grain contact can facilitate lithium-ion migration by reducing grain-boundary resistance and creating more continuous ion-conduction pathways throughout the ceramic matrix. Such structural characteristics are favorable for achieving enhanced electrochemical performance in NASICON-type solid electrolytes.

For the $x = 0.5$ sample, although grain growth remains pronounced, the coexistence of differently sized crystallites indicates less uniform microstructural evolution. The presence of heterogeneous grains may introduce local structural disorder and nonuniform grain-boundary regions, which can negatively influence ionic transport. Furthermore, excessive aluminum substitution may promote the formation of secondary phases and induce local lattice distortions, leading to reduced structural homogeneity.

$\text{Li}_{1.4}$ composition demonstrated optimized microstructure, high densification, and uniform grain distribution play critical roles in improving lithium-ion transport properties. Therefore, controlling aluminum concentration is essential for tailoring the microstructural and electrochemical characteristics of LATP ceramics intended for solid-state electrolyte applications.

The SEM micrographs reveal that all LATP ceramics consist of densely packed polyhedral grains with well-developed faceted morphology, although noticeable differences in grain size and packing

density are observed with increasing lithium content. The measured grain size ranges from approximately 0.72–1.65 μm for LATP ($x = 0.3$), 0.24–1.69 μm for LATP ($x = 0.4$), and 0.69–1.26 μm for LATP ($x = 0.5$). The $x = 0.3$ sample exhibits relatively large angular grains together with visible intergranular pores, indicating incomplete densification. In contrast, LATP ($x = 0.4$) shows a more homogeneous microstructure with finer grains and a narrower grain size distribution, resulting in improved particle packing and reduced porosity. For LATP ($x = 0.5$), grain growth becomes more pronounced again, with larger faceted grains coexisting with smaller particles, leading to a broader microstructural heterogeneity. These observations suggest that a lithium content of $x = 0.4$ promotes the most uniform grain development and densification, which is consistent with its superior ionic conductivity compared with the other compositions.

Thus, the SEM study demonstrates that increasing the aluminum content promotes grain growth and microstructure densification. However, with a further increase ($x = 0.5$), increased grain heterogeneity is observed, which may affect the ionic conductivity and mechanical properties of the resulting ceramics.

4. Discussion

EIS measurements of LATP pelletized samples ($x = 0.3$ – 0.5) were performed over the temperature range of 25 to 85°C in order to evaluate the ionic transport properties and temperature-dependent electrochemical behavior of the synthesized materials. Figure 4 presents the impedance spectra obtained for the $\text{Li}_{1.3}$, $\text{Li}_{1.4}$, and $\text{Li}_{1.5}$ compositions. All spectra exhibit pronounced semicircular arcs in the high- and intermediate-frequency regions, corresponding to the combined contribution of bulk and grain-boundary resistance within the electrolyte. In the low-frequency region, inclined tails are observed, which are attributed to the polarization effect of the stainless steel blocking electrodes and the accumulation of lithium ions at the electrode/electrolyte interface (Xiao et al., 2023).

To analyze the impedance behavior, the experimental data were fitted using equivalent electrical circuits consisting of bulk resistance (R_b), grain-boundary resistance (R_{gb}), and constant phase elements (CPEs), which account for non-ideal capacitive behavior arising from structural inhomogeneity and grain-boundary effects. The fitting results demonstrated good agreement with the experimental spectra, confirming the validity of the selected equivalent circuit model for describing ionic transport in LATP ceramics.

As the temperature increased from 25 to 85°C, a significant reduction in the diameter of the semicircular arcs was observed for all compositions. This behavior indicates a decrease in total resistance and enhancement of lithium-ion mobility at elevated temperatures. The improved conductivity at higher temperatures can be explained by thermally activated ion transport, where lithium ions gain sufficient energy to migrate more easily through the NASICON framework and across grain boundaries. Such temperature-dependent behavior is characteristic of oxide solid electrolytes and confirms the ionic conduction mechanism in LATP materials.

Among the investigated samples, the $\text{Li}_{1.4}$ composition exhibited the smallest semicircle diameter and therefore the lowest total resistance across the studied temperature range. This result suggests that the $\text{Li}_{1.4}$ sample possesses the most favorable lithium-ion transport pathways and optimal balance between lithium concentration, phase composition, and microstructural characteristics. The enhanced ionic conductivity of this composition may be associated with improved grain connectivity and reduced grain-boundary resistance resulting from the optimized lithium content. In contrast, the $\text{Li}_{1.5}$ composition demonstrated the highest resistance values, indicating less efficient lithium-ion transport. Excess lithium concentration may contribute to the formation of secondary phases, lattice distortion, or increased structural disorder, which can hinder ion migration and increase resistance.

Furthermore, the differences in impedance behavior among the compositions indicate that lithium concentration strongly influences both bulk and interfacial conduction processes in LATP ceramics. Variations in lithium content can affect crystal structure stability, grain growth, and densification, all of which play important roles in determining the electrochemical performance of solid electrolytes. The obtained results therefore confirm that careful optimization of lithium concentration is necessary to achieve high ionic conductivity and stable electrochemical characteristics for thin-film electrolyte applications.

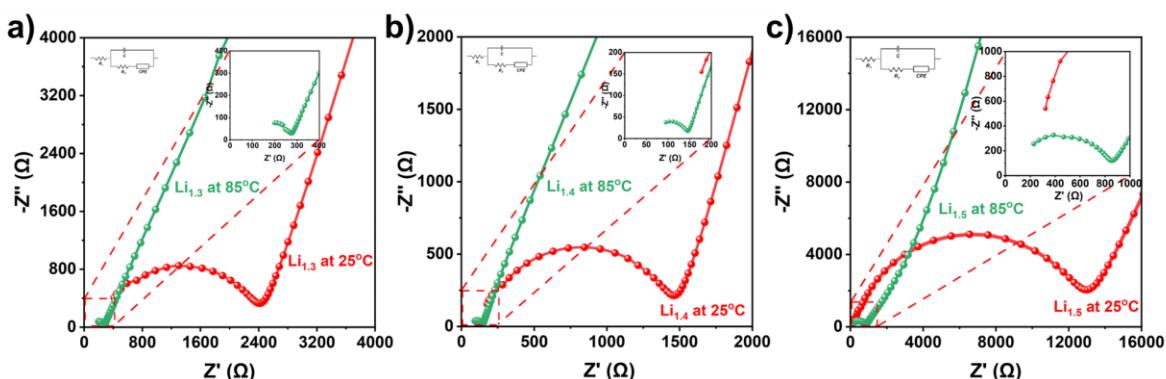


Figure 4. Nyquist plot of $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5 pellets

Table 3 presents the geometric parameters of the tablets, the sample density, and the calculated ionic conductivity values at 25°C and 85°C. The $\text{Li}_{1.4}$ sample demonstrated the highest conductivity values: $\sigma_{\text{total}} = 1.85 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ at 25°C and $\sigma_{\text{total}} = 1.45 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ at 85°C. For comparison, $\text{Li}_{1.3}$ exhibits intermediate values ($0.91 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ at 25 °C and $0.84 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ at 85 °C), while $\text{Li}_{1.5}$ has the lowest conductivity ($0.174 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ and $0.27 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$, respectively). It should be noted that $\text{Li}_{1.4}$ also has the highest density (2.668 g/cm^3), indicating a more densely packed structure and better formation of intergranular contacts, which facilitate efficient ion transport. The obtained ionic conductivity ($1.85 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$) is comparable to the values reported by Tolganbek et al. (2021) and Baltash et al. (2023), who synthesized LATP using the molten-flux method. However, it remains lower than the highest conductivities reported for highly densified LATP prepared by optimized solid-state routes. This difference may be attributed to variations in sintering conditions, relative density, and secondary phase formation.

Table 3. Characteristics of $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ ($x=0.3-0.5$) pellets

LATP ($x=0.3-0.5$)	d, cm	h, cm	S, cm^2	ρ , g/cm^3	$\sigma_{\text{total}}(25^\circ\text{C})$, $\times 10^{-4}$, S/cm	$\sigma_{\text{total}}(85^\circ\text{C})$, $\times 10^{-3}$, S/cm	E_a , eV
$\text{Li}_{1.3}$	0.772	0.109	0.468	2.57	0.91	0.84	0.36
$\text{Li}_{1.4}$	0.768	0.099	0.463	2.67	1.85	1.45	0.32
$\text{Li}_{1.5}$	0.767	0.111	0.462	2.64	0.17	0.27	0.43

Although the $\text{Li}_{1.4}$ sample contains a lower fraction of the LATP phase than $\text{Li}_{1.3}$, it exhibits the highest ionic conductivity. This behavior suggests that ionic transport is influenced not only by the LATP

phase fraction but also by the lower activation energy, favorable microstructure, and the nature of the secondary phases. The insulating AlPO_4 phase in $\text{Li}_{1.3}$ may contribute to higher grain-boundary resistance, whereas the $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$ phase in $\text{Li}_{1.4}$ has a less pronounced influence on Li^+ transport.

The temperature dependence of conductivity in Arrhenius coordinates confirms the impedance spectroscopy data. The Arrhenius plots of the samples are illustrated in Figure 5. Linear behavior is observed for all compositions, indicating a thermally activated mechanism of lithium-ion transport within the NASICON framework. The good linearity of the curves suggests that lithium-ion conduction occurs through a stable hopping mechanism without significant phase transitions in the investigated temperature range.

Approximation of the experimental curves allowed the determination of the activation energies for ionic conduction. For the $\text{Li}_{1.3}$ composition, the activation energy is 0.36 eV, for $\text{Li}_{1.4}$ it is 0.32 eV, while for $\text{Li}_{1.5}$ it reaches 0.43 eV. The lowest activation energy was recorded for $\text{Li}_{1.4}$, which corresponds to the highest ion mobility and is consistent with its minimum resistance and maximum conductivity values obtained from impedance measurements. The reduced activation energy indicates that lithium ions require less energy to migrate through the crystal lattice and grain boundaries, resulting in more efficient ionic transport.

The enhanced electrochemical performance of the $\text{Li}_{1.4}$ sample can be associated with its optimized lithium concentration and improved microstructural properties. Better grain connectivity and increased densification likely contribute to the formation of continuous lithium-ion transport pathways and reduced grain-boundary resistance. In addition, the relatively uniform grain structure observed in SEM images supports the improved ionic mobility of this composition.

In contrast, the $\text{Li}_{1.5}$ sample is characterized by the highest activation energy and the lowest ionic conductivity. The increase in activation energy suggests more difficult lithium-ion migration due to structural disorder, grain heterogeneity, or the presence of secondary phases formed at excessive lithium content. Such factors can obstruct lithium-ion diffusion pathways and increase interfacial resistance within the ceramic electrolyte.

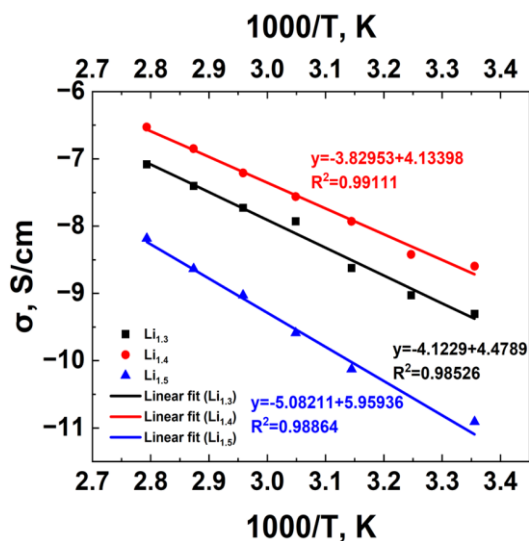


Figure 5. Arrhenius plot of $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5 pellets

Thus, a combined analysis of the impedance spectra, temperature dependences, and experimental data in the table confirms that the $\text{Li}_{1.4}$ composition is optimal among those studied. It combines

maximum density, minimum resistance, lowest activation energy, and highest ionic conductivity, making it a promising candidate for the further production of thin-film electrolytes.

5. Conclusion

The LATP solid electrolyte synthesis method using melting with flux technology produces polycrystals with a high degree of crystallinity and a dense NASICON-type structure. These samples are characterized by fewer structural distortions and higher ionic conductivity compared to materials obtained by other synthesis methods. The most optimal electrochemical parameters were demonstrated by the $\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$ sample, which has the highest density and ionic conductivity (up to 1.85×10^{-4} S/cm at 25°C).

The enhanced electrochemical performance of the $\text{Li}_{1.4}$ composition can be attributed to the optimized lithium content, which promotes efficient lithium-ion migration through the NASICON framework while minimizing grain-boundary resistance. In addition, the improved densification and phase purity of this sample contribute to better particle connectivity and reduced structural defects. These results indicate that controlled lithium excess is an effective strategy for obtaining highly conductive LATP electrolytes suitable for thin-film solid-state battery applications.

Structural and morphological analyses confirmed that lithium concentration strongly influences phase formation, grain growth, and densification behavior of LATP ceramics. The $\text{Li}_{1.4}$ sample exhibited the most favorable combination of structural homogeneity, dense microstructure, low activation energy, and high ionic conductivity. In contrast, excessive lithium content resulted in increased grain heterogeneity and reduced electrochemical performance. Overall, the obtained results demonstrate that optimization of lithium concentration is essential for improving the structural stability and ionic transport properties of LATP electrolytes, making the $\text{Li}_{1.4}$ composition a promising candidate for future thin-film all-solid-state lithium battery applications.

Furthermore, the impedance spectroscopy results confirmed that lithium-ion transport in LATP ceramics follows a thermally activated conduction mechanism, with conductivity increasing significantly at elevated temperatures. The combination of high crystallinity, reduced grain-boundary resistance, and improved microstructural connectivity observed for the $\text{Li}_{1.4}$ composition contributed to enhanced ionic mobility throughout the NASICON framework. The molten flux synthesis approach also proved to be an effective method for obtaining homogeneous LATP ceramics with stable electrochemical characteristics. Therefore, the developed $\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$ material can be considered a promising electrolyte candidate for further fabrication of thin-film solid-state lithium batteries and related electrochemical energy storage systems.

6. Supplementary Materials: No Supplementary Materials.

7. Author Contributions

Conceptualization - A.B., M.Y., Z.Ba.; methodology - A.B., M.Y., Z.Ba.; formal analysis - A.B., M.Y.; investigation - M.Y.; data curation - M.Y., G.T., A.N., A.M.; writing-original draft - A.B.; writing - review & editing - A.B., M.Y., Z.Ba.; visualization - A.B., M.Y., Z.Ba.; supervision - G.N., A.N., Z.Bk., A.M.; project administration - A.N., A.M.

8. Author Information

Bekmakhanova, Ayazhan – Master student, Department of Chemistry, L.N. Gumilov Eurasian National University, 2 Satpayev str., 010008; bekmahanovaaazan877@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-5430-9627>

Yegamkulov, Mukagali – Researcher, Institute of Batteries LLC, 53 Kabanbay Batyr Avenue, Astana, Kazakhstan, 010000; mukagali.yegamkulov@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1133-3201>

Bakhytzhanova, Zhansaya – Master student, Department of Chemistry, L.N. Gumilov Eurasian National University, 2 Satpayev str., 010008; zhansayab.1977@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9628-587X>

Tazhkenova, Gaukhar – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of chemistry, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., 010008, Astana, Kazakhstan gaukhar-1970@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0491-593X>

Nurpeissova, Arailym– PhD, Senior Researcher, Institute of Batteries LLC, 53 Kabanbay Batyr Avenue, Astana, Kazakhstan, 010000; arailym.nurpeissova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9657-2964>

Bakenov, Zhumabay – Professor, Institute of Batteries LLC, 53 Kabanbay Batyr Avenue, Astana, Kazakhstan, 010000; Zbakenov@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2781-4955>

Mukanova, Aliya – PhD, Associate Professor, Deputy Director, Institute of Batteries LLC, 53 Kabanbay Batyr Avenue, Astana, Kazakhstan, 010000; aliya.mukanova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1171-176X>

9. Funding: This research was supported by the targeted program #BR24992766 from the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

10. Acknowledgments: The authors would like to express their sincere gratitude to the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for supporting this research through the targeted program #BR24992766. We also thank all colleagues and laboratory staff who contributed to discussions, technical assistance, and the preparation of samples, which made this work possible.

11. Conflicts of Interest: No conflicts of interest are declared by the authors.

12. References

1. Arbi, K., Rojo, J. M., & Sanz, J. (2007). Lithium mobility in titanium based Nasicon $\text{Li}_{1+x}\text{Ti}_{2-x}\text{Al}_x(\text{PO}_4)_3$ and $\text{LiTi}_{2-x}\text{Zr}_x(\text{PO}_4)_3$ materials followed by NMR and impedance spectroscopy. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(13–15), 4215–4218. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.02.092>
2. Bachman, J. C., Muy, S., Grimaud, A., Chang, H. H., Pour, N., Lux, S. F., Paschos, O., Maglia, F., Lupart, S., Lamp, P., & Shao-Horn, Y. (2016). Inorganic solid-state electrolytes for lithium batteries: mechanisms and properties governing ion conduction. *Chemical Reviews*, 116(1), 140–162. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00563>
3. Baltash, Y., Mashekova, A., Yegamkulov, M., Trussov, I., Bakenov, Z., & Mukanova, A. (2023). Silicon doping of LATP via molten flux method. *Ionics*, 29(7), 2647–2655. <https://doi.org/10.1007/s11581-023-05032-4>
4. DeWees, R., & Wang, H. (2019). Synthesis and properties of NaSICON-type LATP and LAGP solid electrolytes. *ChemSusChem*, 12(16), 3713–3725. <https://doi.org/10.1002/cssc.201900725>
5. Liu, J., Liu, T., Pu, Y., Guan, M., Tang, Z., Ding, F., & Li, Y. (2017). Facile synthesis of NASICON-type $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ solid electrolyte and its application for enhanced cyclic performance in lithium ion batteries through the introduction of an artificial Li_3PO_4 SEI layer. *RSC Advances*, 7(74), 46545–46552. <https://doi.org/10.1039/C7RA08659A>

6. Liu, Y., Sun, Q., Zhao, Y., Wang, B., Kaghazchi, P., Adair, K. R., & Sun, X. (2018). Stabilizing the interface of NASICON solid electrolyte against Li metal with atomic layer deposition. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(37), 31240–31248. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b10924>
7. Lovett, A. J., Kursumovic, A., & MacManus-Driscoll, J. L. (2024). Lithium loss in vacuum deposited thin films. *ACS Energy Letters*, 9(4), 1753–1758. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.4c00315>
8. Ma, Q., Xu, Q., Tsai, C. L., Tietz, F., & Guillon, O. (2016). A novel sol-gel method for large-scale production of nanopowders: preparation of $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ti}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ as an example. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(2), 410–414. <https://doi.org/10.1111/jace.13930>
9. Mashekova, A., Baltash, Y., Yegamkulov, M., Trussov, I., Bakenov, Z., & Mukanova, A. (2022). Polycationic doping of the LATP ceramic electrolyte for Li-ion batteries. *RSC Advances*, 12(46), 29595–29601. <https://doi.org/10.1039/D2RA04924A>
10. Moustafa, M. G., Sanad, M. M. S., & Hassaan, M. Y. (2020). NASICON-type lithium iron germanium phosphate glass ceramic nanocomposites as anode materials for lithium ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 845, 156338. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156338>
11. Nuernberg, R. B., Landry, A. K., Le Cras, F., & Le Cras, B. P. (2024). Enhancing ionic conductivity of LiSiPON thin films electrolytes: overcoming synthesis challenges related to Li-migration in the precursor target. *Solid State Ionics*, 418, 116723. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2024.116723>
12. Öksüzoğlu, F., Ateş, Ş., Özkendir, O. M., Çelik, G., Eker, Y. R., & Baveghar, H. (2024). Structure and ionic conductivity of NASICON-type LATP solid electrolyte synthesized by the solid-state method. *Ceramics International*, 50(17), 31435–31441. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.05.214>
13. Randau, S., Weber, D. A., Kötz, O., Koerver, R., Braun, P., Weber, A., Ivers-Tiffée, E., & Janek, J. (2020). Benchmarking the performance of all-solid-state lithium batteries. *Nature Energy*, 5(3), 259–270. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0565-1>
14. Reddy, M. V., Julien, C. M., Mauger, A., Zaghib, K., & Chowdari, B. V. R. (2020). Sulfide and oxide inorganic solid electrolytes for all-solid-state Li batteries: a review. *Nanomaterials*, 10(8), 1606. <https://doi.org/10.3390/nano10081606>
15. Tolganbek, N., Yerkimbekova, Y., Khairullin, A., Bakenov, Z., Kanamura, K., & Mentbayeva, A. (2021). Enhancing purity and ionic conductivity of NASICON-typed $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ solid electrolyte. *Ceramics International*, 47(13), 18188–18195. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.104>
16. Waetzig, K., Rost, A., Heubner, C., Coeler, M., Nikolowski, K., Wolter, M., & Schilm, J. (2020). Synthesis and sintering of $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ (LATP) electrolyte for ceramics with improved Li^+ conductivity. *Journal of Alloys and Compounds*, 818, 153237. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153237>
17. Wolfenstine, J., Allen, J. L., Sakamoto, J., Siegel, D. J., & Choe, H. (2018). Mechanical behavior of Li-ion-conducting crystalline oxide-based solid electrolytes: a brief review. *Ionics*, 24(5), 1271–1276. <https://doi.org/10.1007/s11581-017-2374-2>
18. Wu, P., Zhou, W., Su, X., Li, J., Su, M., Zhou, X., & Lu, W. (2023). Recent advances in conduction mechanisms, synthesis methods, and improvement strategies for $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ solid electrolyte for all-solid-state lithium batteries. *Advanced Energy Materials*, 13(4), 2203440. <https://doi.org/10.1002/aenm.202203440>
19. Xiao, W., Li, J., Miao, C., Xin, Y., Nie, S., Liu, C., & He, M. (2023). Engineering and regulating the interfacial stability between $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ -based solid electrolytes and lithium metal anodes for solid-state lithium batteries. *Journal of Colloid and Interface Science*, 652, 1447–1455. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.08.083>

20. Xiao, W., Wang, J., Fan, L., Zhang, J., & Li, X. (2019). Recent advances in $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ solid-state electrolyte for safe lithium batteries. *Energy Storage Materials*, 19, 379–400. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.10.008>
21. Yang, K., Chen, L., Ma, J., He, Y. B., & Kang, F. (2021). Progress and perspective of $\text{Li}_{1+x}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$ ceramic electrolyte in lithium batteries. *InfoMat*, 3(11), 1195–1217. <https://doi.org/10.1002/inf2.122>
22. Yang, Z., Yuan, H., Zhou, C., Wu, Y., Tang, W., Sang, S., & Liu, H. (2020). Facile interfacial adhesion enabled LATP-based solid-state lithium metal battery. *Chemical Engineering Journal*, 392, 123650. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123650>
23. Zhang, B., Tan, R., Yang, L., Zheng, J., Zhang, K., Mo, S., & Pan, F. (2018). Mechanisms and properties of ion-transport in inorganic solid electrolytes. *Energy Storage Materials*, 10, 139–159. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.10.015>
24. Zhang, X., Butenko, D., Gao, L., Ye, X., Hong, B., Han, S., & Zhu, J. (2023). Synergistic ion diffusion in lithium titanium phosphate conductors: a tale from solo to ensemble. *Chemistry of Materials*, 35(11), 4541–4548. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c00479>
25. Zhang, Z., Shao, Y., Lotsch, B., Hu, Y. S., Li, H., Janek, J., Nazar, L. F., Nan, C. W., Maier, J., Armand, M., & Chen, L. (2018). New horizons for inorganic solid state ion conductors. *Energy & Environmental Science*, 11(8), 1945–1976. <https://doi.org/10.1039/C8EE01053F>
26. Zhu, X. B., Zhao, T. S., Wei, Z. H., Tan, P., & Zhao, G. (2015). A novel solid-state Li–O₂ battery with an integrated electrolyte and cathode structure. *Energy & Environmental Science*, 8(9), 2782–2790. <https://doi.org/10.1039/C5EE01353G>

Балқытылған флюс әдісімен синтезделген NASICON типті LATP қатты электролиттерінің литий мөлшеріне тәуелді иондық өткізгіштігі

Аяжан Бекмаханова, Мұқағали Егамкулов, Жансая Бахытжанова, Гаухар Тажкенова, Арайлым Нурпеисова, Жұмабай Бакенов, Алия Муканова

Аңдатпа. Бұл мақалада әртүрлі литий мөлшеріне ие литий алюминий титан фосфатының (LATP) қатты электролиттерінің құрылымдық және электрохимиялық қасиеттеріне салыстырмалы талдау жүргізілді LATP ($\text{Li}_{1.3-1.5}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$). NASICON құрылымды LATP поликристалдары балқытылған флюс әдісі арқылы синтезделді. Синтез процесі LiNO_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ және $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ прекурсорларын араластыруды, кейін 170°C, 500°C және 800°C температураларда кезең-кезеңімен қыздыруды, престоуді және соңғы 800°C температурада 4 сағат бойы күйдіруді қамтыды. Рентгендік дифракциялық талдау негізгі LATP кристалдық фазасының түзілгенін растады. Сонымен қатар, литий концентрациясының артуы $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$, AlPO_4 және TiP_2O_7 секілді қосымша фазалардың пайда болуына әкеліп, иондық өткізгіштікке әсер ететіні анықталды. Электрохимиялық импеданстық спектроскопия нәтижелері бойынша LATP ($\text{Li}_{1.4}$) үлгісі жоғары құрылымдық тығыздық пен оңтайлы фазалық құрамның арқасында $\text{Li}_{1.3}$ және $\text{Li}_{1.5}$ үлгілерімен салыстырғанда ең жоғары иондық өткізгіштікке ие болды (25°C-та $1.66-1.85 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$). Температуралық тәуелділік талдауы температураның жоғарылауы литий иондарының қозғалғыштығын арттыратынын көрсетті, бұл ион тасымалының термиялық белсендірілген табиғатын дәлелдейді. Осылайша, $\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$ құрамы қатты күйлі литий батареяларына арналған қатты электролит ретінде ең перспективалы қасиеттерді көрсетті.

Түйін сөздер: литий-ионды батареялар; NASICON; LATP; РЖ магнетронды тозаңдату; күйдіру; электрохимиялық импеданстық спектроскопия; электрохимиялық сипаттамалар.

Влияние содержания лития на ионную проводимость NASICON-подобных твердых электролитов LATP, синтезированных методом расплавленного флюса

Аяжан Бекмаханова, Мұқағали Егамкулов, Жансая Бахытжанова, Гаухар Тажкенова, Арайлым Нурпеисова, Жұмабай Бакенов, Алия Муканова

Аннотация. В статье представлена сравнительная оценка структурных и электрохимических свойств твердых электролитов на основе литий-алюмо-титан-фосфата (LATP) с различным содержанием лития LATP ($\text{Li}_{1.3-1.5}\text{Al}_x\text{Ti}_{2-x}(\text{PO}_4)_3$). Поликристаллы LATP с NASICON-подобной структурой были синтезированы методом расплавленного флюса, включающим смешивание прекурсоров LiNO_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ и $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ с последующим ступенчатым нагревом при 170°C , 500°C и 800°C , прессованием и финальным спеканием при 800°C в течение 4 часов. Рентгенофазовый анализ подтвердил формирование основной кристаллической фазы LATP, тогда как увеличение концентрации лития приводило к появлению вторичных фаз, таких как $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$, AlPO_4 , и TiP_2O_7 , что оказывало влияние на ионную проводимость. Исследования методом электрохимической импедансной спектроскопии показали, что образец LATP ($\text{Li}_{1.4}$) обладает наивысшей ионной проводимостью ($1.66\text{--}1.85 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ при 25°C) по сравнению с образцами $\text{Li}_{1.3}$ и $\text{Li}_{1.5}$ благодаря более высокой структурной плотности и оптимальному фазовому составу. Анализ температурной зависимости показал, что повышение температуры способствует увеличению подвижности литиевых ионов, подтверждая термоактивированный характер ионного транспорта. Таким образом, состав $\text{Li}_{1.4}\text{Al}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}(\text{PO}_4)_3$ демонстрирует наиболее перспективные характеристики в качестве твердого электролита для полностью твердотельных литиевых батарей.

Ключевые слова: литий-ионные батареи; NASICON; LATP; РЧ магнетронное распыление; отжиг; электрохимическая импедансная спектроскопия; электрохимические характеристики.

Advanced sorbents for oil spill cleanup: materials, methods, and future perspectives

Nurbatyr Mukhametgazy^{1*}, Nesipkhan Bektenov^{1,2}, Zhazira Mukatayeva¹, Meruyert Suleimenova¹, Klara Sarsekova¹

¹Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan;
nurbatyr.kaz@gmail.com, bekten_1954@mail.ru, jazira-1974@mail.ru,
suleimenova.me@gmail.com, k.sarsekova@mail.ru

²A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences, Almaty, Kazakhstan;
bekten_1954@mail.ru

*Correspondence: nurbatyr.kaz@gmail.com

Citation: Mukhametgazy, N., Bektenov, N.A., Mukatayeva, Zh.S., Suleimenova, M.T., Sarsekova K.A. (2026). Advanced sorbents for oil spill cleanup: materials, methods, and future perspectives. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 156(3), 66-91. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-66-91>

Academic Editor:
S.S. Dosmagambetova

Received: 21.05.2026
Revised: 27.06.2026
Accepted: 29.09.2026
Published: 30.09.2026



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: Oil spills are a vital environmental problems for animals, plants, and even the economy. As more companies search for oil in the ocean, the number of pests' increases. Therefore, we need to find ways to clean up the pollution quickly. One way to do this is to use special materials that absorb oil. These materials are easy to use, can absorb large amounts of oil, and are not too expensive. They also work well in a variety of environments. This article will review the advances in the development of these special materials, or oil sorbents. It will discuss the different types of materials, how they are made, and how well they work. Some of these materials come from nature, while others are man-made. To improve their performance, scientists use various techniques, such as modifying or shrinking their surface properties. The good news is that these advanced materials can remove oil from water very effectively. However, more research is needed to make them even better. This includes creating materials that are a combination of different substances, finding environmentally friendly ways to manufacture them, and ensuring that they last a long time. In this regard, it is important to develop materials that can clean up oil spills effectively and efficiently. We must continue to work on improving these materials to protect the environment from spills.

Keywords: oil spillfc remediation; oil sorbent materials; natural and synthetic sorbents; hybrid sorbent materials; sustainable remediation technologies; oil-water emulsions.

1. Introduction

Oil spills are a serious environmental problem. Over the past few years, numerous accidents and leaks have harmed our oceans and wildlife. We need to find more effective ways to clean up spills and prevent them from happening again. Just a few years ago, a large oil tanker named Sanchi sank in the East China Sea, causing a massive spill that damaged the marine ecosystem (Duarte et al., 2024). Then, in 2019, someone spilled oil all along the coast of Brazil, damaging numerous protected areas and ecosystems. In 2020, a large diesel fuel tank collapsed in Russia,

spilling thousands of tons of fuel into rivers and the Arctic environment. Around the same time, the MV Wakashan ran aground off the island of Mauritius, causing a major oil spill that damaged coral reefs and coastal wildlife (Chang et al., 2014). Similar accidents continue to occur. For example, most recently, a tanker sank in Manila Bay, spilling millions of liters of industrial oil into the water (National Transportation Safety Board, 2019). This is bad news for fish, coastal ecosystems, and people living nearby. All of these incidents demonstrate that we need to improve oil spill prevention and response (Soares et al., 2020). We need new technologies and strategies to protect the environment from the dangers of oil transportation and storage. The problem is not going away, and we need to take action to stop it. Oil spills can happen anywhere, anytime, and they can have devastating consequences for the environment (Astakhova et al., 2021). We must be prepared and equipped with the necessary tools and methods to respond quickly and effectively. This is a huge task, but we cannot afford to wait. We must work together to find solutions and protect our planet from the harm caused by oil spills. We must learn from the past and use this knowledge to create a better future (Ragoonaden et al., 2021). By learning about the impacts of oil spills and how to prevent them, we can make a real difference. It's time to take responsibility and do right by the environment. We owe it to ourselves, our children, and the future of our planet to take action against oil spills and protect the beauty and wonder of our oceans and wildlife (Philippine Coast Guard, 2024).

Increased oil exploration, transportation, and refining have led to increased oil pollution of our waters and land. This is due to the constant release of oil-containing waste from industrial processes. Oil spills and oil-contaminated wastewater pose a threat not only to our aquatic resources and the animals living in them but also cause long-term damage to the environment and the economy. This is because oil can remain in the environment for a long time and is toxic, meaning it can harm living organisms (Zodiatis, 2017; Fingas, 2016; Prince et al., 2015). Furthermore, oil dissolves very quickly in water, forms a film on the surface, and gradually sinks and accumulates in sediments. Currents and winds tend to cause even more rapid spread, leading to the degradation and even disappearance of large areas of marine life and the environment (Fodrie, 2011 & D'Andrea et al., 2013). In combination with the above conditions, a number of physicochemical parameters such as temperature and salinity can also determine the rate of spread of oil spills in a natural water body. (Fingas, 2011 and Zekri et al., 2005). Figure 1 shows that the most significant volume of oil entering the water comes from ships (25%), tankers (20%) and tank barges (15%), with an additional percentage coming from refineries, terminals (25%) and platforms (15%). The most commonly encountered types of oil are crude oil (35%), diesel fuel (20%), marine oil (10%), gasoline (8%) and oil condensates (3%).

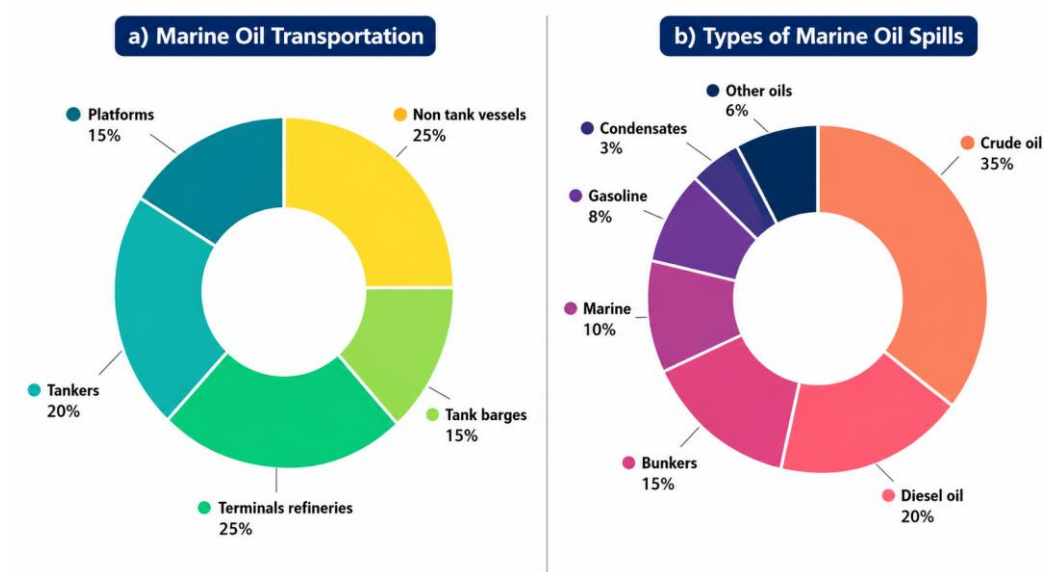


Figure 1. (a) Percentage (%) of oil spill origins in water. (b) Percentage (%) of oil types (adapted from Zamparas et al., 2020)

Traditional oil-water separation technologies, such as gravity separation, oil skimming, flotation, and membrane filtration, often suffer from inherent limitations, including low separation efficiency of fine emulsions, high energy and operating costs, membrane fouling, and the potential formation of secondary contaminants during treatment processes (Yang, 2022; Juraij et al., 2025). These drawbacks are particularly pronounced in complex industrial wastewaters, where small oil droplet sizes and stabilizing surfactants hinder efficient phase separation. As a result, extensive research has shifted toward advanced oil-sorbent materials as effective and environmentally compatible alternatives. Oil sorbents operate primarily through adsorption and absorption mechanisms, which are governed by physicochemical interactions such as surface wettability and capillary forces and affinity between the oil phase and the sorbent substrate (Pi, 2024; Sivashunmugam et al., 2021). Recent studies have identified a wide range of new sorbent materials, including hydrophobic/oleophilic polymer foams, biomass-derived porous absorbents, and functionalized nanostructured materials, which exhibit enhanced oil absorption, selectivity, and reusability compared to traditional methods (Liang, 2024; Hailan, 2025; Chen et al., 2024). These advanced sorbents promise to improve oil-water separation efficiency while reducing environmental impacts and operating costs. Figure 2 shows that traditional methods used in oil spill response techniques.

In recent years, organic oil sorbents, such as biomass-derived materials and synthetic polymer networks such as aerogels, foams, and electrospun fiber mats, have attracted considerable attention due to their inherently low density, high oil absorption capacity, and tunable surface chemistry (Abu, 2025; Li et al., 2024). Sorbents made from natural biomass (such as agricultural waste and plant fibers) and engineered polymer foams or fibers offer high sorption capacity and environmental benefits, bringing promise for oil spill response (Salim, 2018; Sarbatli et al., 2016). However, these materials often suffer from limited mechanical strength, poor recyclability, and stability issues, which may hinder large-scale deployment (Dehmani et al., 2023).

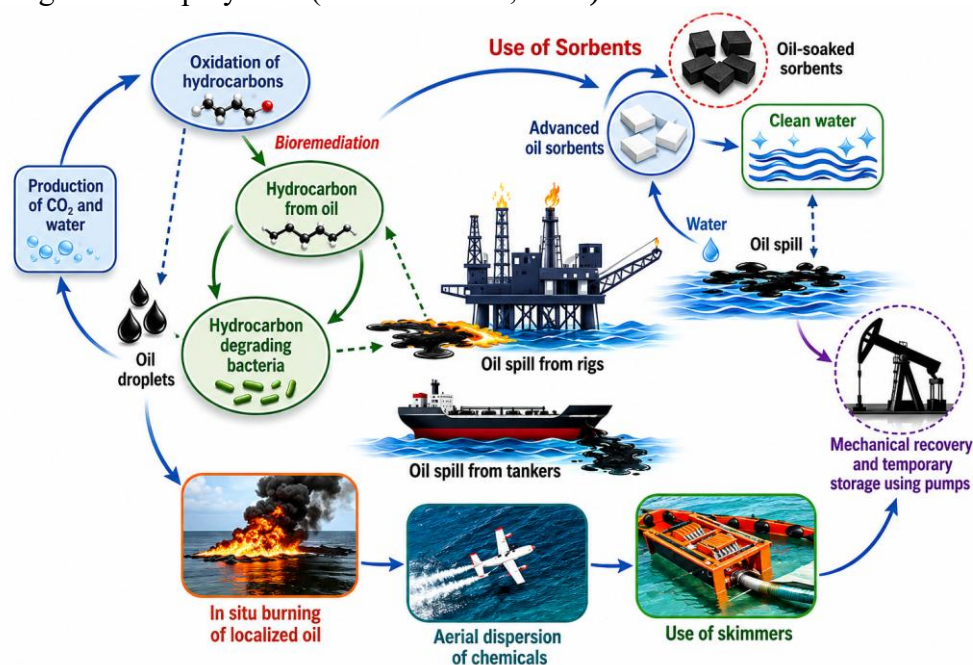


Figure 2. Traditional methods used in oil spill response (reprinted from Gote et al., 2023)

Conversely, inorganic oil sorbents, including clays, silica-based materials, metal oxides, zeolites, and carbon nanostructures, offer superior thermal and chemical properties, stability, and structural strength, which can enhance performance in harsh environments (Gao et al., 2024). These materials can exhibit lower oil selectivity, higher density, and more difficult recovery or regeneration

in practical applications (Wu et al., 2014). To overcome these limitations, organic-inorganic hybrid sorbents have emerged as a promising class of materials. By integrating organic components (providing hydrophobicity and flexible surface chemistry) with inorganic phases (providing durability and functionality), these hybrids can achieve synergistic improvements in surface area, hierarchical porosity, controlled wettability, and regenerability, resulting in enhanced oil sorption efficiency and practical utility (Zamparas et al., 2020). Recent advances in surface functionality, nanostructuring, magnetic modification, and green synthesis strategies have further enhanced the performance and sustainability of oil sorbent materials (Ge et al., 2016). However, significant challenges remain in terms of scalability, regeneration efficiency, environmental safety, and cost-effectiveness.

The widespread problem of oil spills and industrial pollutant emissions requires the development of highly efficient and sustainable remediation technologies (Wu et al., 2014). Traditional methods often fail to cope with the complexity and scale of pollution, prompting an urgent shift to advanced sorbent materials (Elgarahi et al., 2025). This includes a growing focus on innovative adsorbents that provide improved performance and minimize environmental impact compared to traditional remediation processes such as chemical precipitation or membrane filtration, which often incur high costs and generate secondary pollutants (Akhtar et al., 2024). The development of new sorbents, especially those derived from renewable resources, represents a promising direction for cost-effective and environmentally friendly remediation (Liu, 2025; Hailan et al., 2025). The urgency of developing practical solutions is highlighted by the severe impacts of oil pollution on the environment and human health, including coral reef bleaching and hypothermia in aquatic species (Ghobashi and Gaed, 2024). Consequently, significant research efforts have been focused on the development of advanced sorbent technologies for rapid and efficient oil recovery, recognizing their crucial role in remediation processes (Askari et al., 2025). These sorbents are crucial for addressing oil spill and contaminated wastewater issues by efficiently removing oil layers to produce purified water (Hoang et al., 2021). This focus includes the synthesis of eco-friendly adsorbents and the analytical information gained from their application, offering a more sustainable and economically viable approach to water treatment (Odoom et al., 2024). Indeed, various methods exist for oil spill control, such as mechanical containment, in-situ burning, bioremediation, and chemical dispersal (Gogol and Rahmati, 2024). However, physical adsorption using modern materials has proven to be a particularly attractive and simple method for cleaning up oil and solvent spills due to its ease of application and high efficiency (Gote et al., 2023).

These strategies improve the efficiency, selectivity, and environmental compatibility of oil sorbents, addressing the limitations of traditional materials. The integration of modern materials and innovative technologies is crucial for developing sorbents capable of effectively addressing oil spills and industrial pollutants. Key strategies and their implications are summarized below.

2. Methods

2.1. *Continental oil cleanup methods*

Physical response methods are the primary oil spill response mechanisms based on mechanical processes to contain, collect, and remove spilled oil from the affected environment (Sharma et al., 2024). These methods are particularly important during the initial phase of a response, when rapid containment can significantly reduce environmental damage (Zhong et al., 2023). Physical approaches include mechanical recovery systems, containment booms, skimmers, and manual collection methods. The selection and application of specific physical methods depends largely on the environmental and oceanic conditions at the spill site, including wave height, water temperature, wind speed, and proximity to sensitive ecosystems (Dhaka & Chattopadhyay, 2021). Additionally, artificial lift systems use various equipment designs to physically separate and collect oil from water surfaces. These systems include skimmers, vacuum devices, and specialized oil recovery vessels that utilize the difference in oil and water densities (Lee & Neff, 2018). Skimmers are the most widely deployed mechanical recovery technology, with designs ranging from barrage skimmers and

oleophilic drum skimmers to disc skimmers and rope mop systems (Khalil et al., 2022). Mechanical recovery efficiency is highly dependent on oil viscosity, sea state, and the presence of debris or ice (Chen et al., 2022). Recent advances have focused on improving skimmer performance through improved design features and automated operations (Dhaka and Chattopadhyay, 2021). Deployment strategies should consider spill trajectory modeling, shoreline protection priorities, and logistical constraints when assessing remote or challenging environments (Ekunke et al., 2025).

These floating barriers come in a variety of configurations, including booms, mounted booms, and fire-resistant booms for in-situ burn operations. Current velocity, wave action, and wind conditions significantly affect boom effectiveness, with failure occurring when these forces exceed the boom's holding capacity (Dhaka and Chattopadhyay, 2021). These labor-intensive approaches involve workers using shovels, rakes, absorbent materials, and hand-held equipment to remove oil-contaminated sediments and debris (Huynh et al., 2022). Shoreline cleanup operations must balance the need for thorough oil removal with the risk of causing additional environmental damage through excessive sediment disturbance. The effectiveness of onshore response operations is significantly influenced by the oil characteristics, substrate type and environmental sensitivity of the affected area (Keramea et al., 2026).

2.2. Chemical treatment methods

Chemical treatments use synthetic compounds to modify the properties of oil, improve dispersion, or facilitate degradation processes (Vu & Mulligan, 2023). These approaches include dispersants, curing agents, surface cleaners, and chemical oxidizers, which alter the physical and chemical characteristics of spilled oil. Although chemical methods allow for rapid cleanup of large spill volumes and access to areas inaccessible by mechanical means, concerns about the toxicity of treatment agents and their long-term environmental impacts have limited their use (Farahani & Zheng, 2022). The decision to use chemical treatments involves a complex tradeoff between immediate cleanup effectiveness and potential secondary environmental impacts.

Dispersants are the most widely used chemical treatment method, which act by reducing the interfacial tension between oil and water, promoting the formation of small oil droplets that disperse throughout the water column (Adofo et al., 2022). Modern dispersant formulations typically contain blends of surfactants and solvents designed to enhance effectiveness across a variety of oil types and environmental conditions (Farahani and Zheng, 2022). Application methods include aerial spraying from aircraft, ship-based spray systems, and underground injection into wellheads (Fernandes et al., 2019). However, the use of dispersants remains controversial due to concerns about increased bioavailability of toxic oil components, impacts on marine organisms, and limited effectiveness in cold water or with weathered oils (Olsen et al., 2013). As shown in Figure 3, dispersants are used in oil spill cleanup methods.

Solidifiers and gelling agents chemically convert liquid oil into semi-solid or solid materials that are easier to collect and remove from the water surface (Motta et al., 2018). These agents typically consist of polymeric materials that interact with oil molecules to form a gel-like matrix or solid mass (Shojaei et al., 2021). This solidification approach offers advantages in preventing oil spreading, reducing the volatilization of toxic components, and facilitating mechanical recovery (Sousa et al., 2019). Limitations of using solidifiers for oil spill response include high material costs and the need to use large quantities of product relative to the amount of oil being treated, which may make this approach economically impractical for large spills or emergency situations; decreased effectiveness due to weathered, thick, emulsified, or highly viscous oils, as these conditions hinder the complete penetration and reaction of the solidifier; and difficulty in handling and disposal of the resulting solidified oil-reagent mixture once formed, as this may require additional labor, equipment, or specialized waste management methods compared to other response options (Motta et al., 2018). These issues have been noted in reviews and experimental studies of solidification technology for oil spill response.

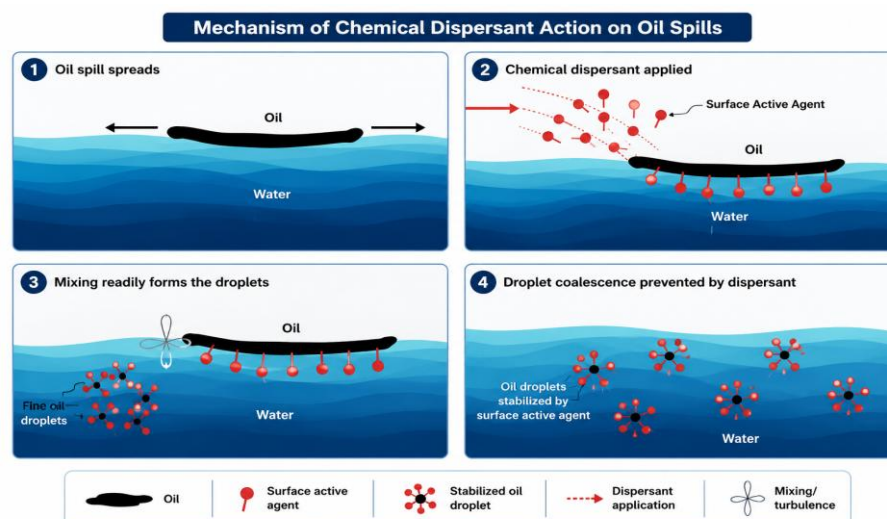


Figure 3. Dispersants as an oil spill clean-up technique (Reproduced from Adofo et al., 2022)

Surface active agents (SAA) are used in oil spill response to loosen and mobilize oil adhered to shorelines, enhancing its removal through mechanical reclamation or natural processes such as tidal action and wave action. Furthermore, these agents typically contain surfactants and solvents that reduce the interfacial tension of the oil substrate, facilitating oil removal from rocks, sand, or man-made structures (Bi et al., 2021). Application methods for SWAs range from low-pressure flushing to high-pressure hot water washing, with the choice of method depending on the type of substrate and the atmospheric conditions of the oil contamination, as highly weathered or viscous oil is more difficult to remove.

Despite their usefulness, concerns have been raised regarding the use of chemical washing regarding environmental impacts. Aggressive washing methods can dislodge sediment and potentially drive oil residues into deeper layers, where they can persist and increase the bioavailability of toxic components to interstitial tissues, which has long-term consequences for benthic fauna and habitat restoration (Zhao et al., 2024). These consequences highlight the need to balance oil removal efficiency with ecosystem protection when using surface cleaning products in sensitive coastal areas.

2.3. Biological remediation methods

Surface bioremediation utilizes natural microbial and plant processes to degrade petroleum hydrocarbons, offering cost-effective and environmentally compatible alternatives to purely physical or chemical remediation methods. These methods include bioremediation, which uses native or introduced microorganisms; phytoremediation, which uses plants to absorb contaminants; and natural attenuation, which relies on the environment's own processes to break down hydrocarbons over time (Ghazali et al., 2023). Biological methods are particularly valuable for treating residual contaminants, diffuse contamination, and sensitive environments where mechanical intervention could cause unacceptable environmental damage (Ahmed and Ibrahim, 2019). However, biological approaches typically require long periods of time to achieve significant degradation, and their effectiveness is largely dependent on environmental conditions such as temperature, nutrient availability, oxygen levels, and salinity, which influence microbial activity and the bioavailability of contaminants (Zhang et al., 2024). The underlying mechanisms of bioremediation utilize the metabolic capabilities of complex microbial communities that convert petroleum hydrocarbons into less harmful compounds such as carbon dioxide and water through enzymatic reactions. Common strategies include bioaugmentation, biostimulation (improving the activity of indigenous microbes through the addition of nutrients), and controlled natural attenuation (Ajona and Vasanti et al., 2021). The rate and pathways of crude oil biodegradation vary significantly depending on oil composition and

environmental conditions, and microbial responses can be modulated by factors such as salinity and other stressors that affect microbial growth and enzyme efficiency.

2.4. Thermal treatment technologies

Low-temperature thermal treatment and drying do not affect the oleophilic and hydrophobic properties of the sorbent. Its main effect is to remove some impurities from the surface, facilitating oil adsorption (El Gheriany et al., 2020). On the other hand, high-temperature thermal treatments, such as pyrolysis, lead to carbonization of the sorbent. Thus, the oil sorption capacity and oil-water selectivity are significantly improved (Jang et al., 2019). Thermal treatment technologies apply heat to volatilize, mobilize, or thermally decompose oil contaminants, achieving rapid volume reduction and effective destruction of many organic contaminants in contaminated soils and sediments (Vidonish et al., 2016). Primary thermal methods include in-situ combustion of surface oil slicks, thermal desorption of contaminated sediments or soils, and incineration of collected waste. Thermal methods also face significant limitations, including significant energy requirements and operating costs, the need for complex gas cleaning systems to control air emissions, and potential damage to soil properties or the environment as a whole due to prolonged or high-temperature heating (1, 4). Furthermore, in-situ and on-site combustion can generate air pollutants, including particulate matter and incomplete combustion products, raising air quality concerns and requiring careful emissions management, limiting their applicability in environmentally sensitive areas (Ding et al., 2019). Nowadays, various methods and technologies have been developed for the removal and collection of oil spills from the sea surface, which are mainly divided into three types as shown in Figure 4: (1) physical cleaning method, (2) chemical treatment method, (3) biological method.

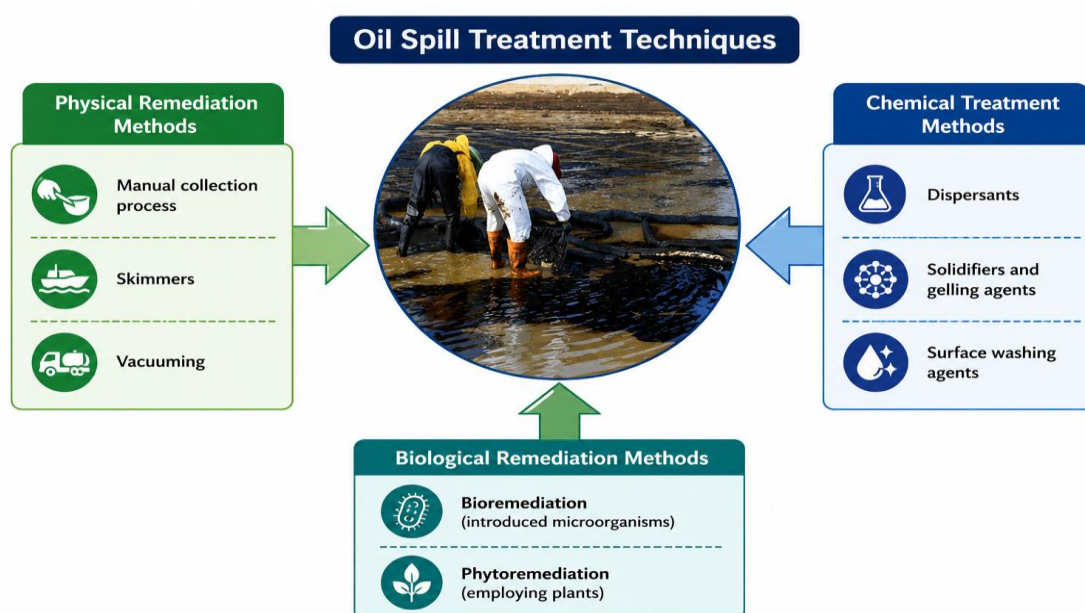


Figure 4. Three types of main techniques used for treating oil spills

According to the actual situation of the sea surface polluted by oil spills, these methods can be selected individually or in combination with each other. The chemical method involves in-situ burning, dispersion with dispersants, and solidification with solidifiers (Ding et al., 2019). In addition, in-situ burning (ISB) is an oil spill response method that involves the controlled burning of oil on the water surface, usually within the framework of fire-resistant booms that concentrate and contain the slick to maintain combustion (Niehaus et al., 2022). This method can quickly remove large volumes of oil with relatively limited equipment, and under favorable conditions, the combustion efficiency

often exceeds 80-90%, according to some studies. removal efficiency approaches 90-98% (Mullin & Champ, 2003).

Successful operations require certain conditions, including a minimum oil slick thickness (typically around 2-3 mm), relatively calm weather, and a sufficient distance from populated areas. ISB is associated with smoke generation during combustion (Brandvik et al., 2021). Despite its effectiveness, ISB raises environmental concerns because combustion produces airborne emissions such as particulate matter and semi-sweet aromatic hydrocarbons (PAHs), while combustion residues can sink and contaminate marine sediments or impact aquatic organisms (Fingas et al., 2014).

Thermal desorption is another thermal treatment technology widely used for the cleanup of oil-contaminated materials. In this process, contaminated soils or sediments are heated to vaporize hydrocarbons, which are subsequently captured and treated or destroyed in secondary systems. Thermal desorption typically operates at temperatures between 200 and 600°C, lower than those used in incineration to limit the formation of combustion byproducts (Bykova et al., 2021). These systems are commonly used to treat oil-contaminated soils, sediments, and solid waste generated during cleanup operations, achieving high removal efficiencies for petroleum hydrocarbons. Advantages include efficient contaminant removal and the ability to reuse treated materials, while limitations include high energy costs, the need for exhaust gas treatment systems, and limited mobility for on-site deployment (Kim et al., 2020).

2.5. Sorbent-based cleanup methods

Sorbent-based cleanup methods utilize materials with a high affinity for petroleum hydrocarbons, enabling the removal of oil from contaminated water surfaces or coastal substrates through absorption or adsorption processes. Furthermore, these methods are widely used in oil spill response because they are simple to use, relatively inexpensive, and allow for oil recovery in both marine and terrestrial environments. Sorbents can capture oil floating in water or present on solid surfaces, making them particularly useful in the later stages of spill response when residual contaminants remain (Motta et al., 2018).

Traditional sorbents are typically classified as natural organic, inorganic mineral, and synthetic polymeric materials. Natural organic sorbents include materials such as peat moss, straw, cotton fibers, and wood products, while inorganic mineral sorbents include clay, perlite, vermiculite, and other porous minerals. Synthetic sorbents, such as polypropylene fibers, polyurethane foams, and other polymeric materials, are widely used in commercial oil spill response products due to their high sorption capacity and hydrophobic characteristics (Gote et al., 2023). These materials function through a variety of mechanisms, including absorption, in which oil penetrates the internal porous structure of the material, and adsorption, in which oil adheres to the sorbent surface through intermolecular forces. The selection of suitable sorbents depends on several performance criteria, including oil sorption capacity, selectivity for oil over water, retention capacity, recoverability or reparability, and environmental compatibility (Adebajo et al., 2003). Sorbents with high selectivity and retention capacity are particularly valuable because they minimize secondary contamination and reduce material consumption during spill response operations.

For effective sorption, sorbent materials must have an appropriate critical surface tension, which promotes hydrophobic and oleophilic behavior, which can often be improved through physical or chemical surface modification methods. Furthermore, factors such as the porosity and porous structure of the sorbent, the viscosity and composition of the oil, and environmental conditions also influence the kinetics of oil sorption, all of which affect the overall sorption efficiency and oil removal rate (El Gheriany et al., 2020). Figure 5 shows a schematic representation of the oil absorption process.

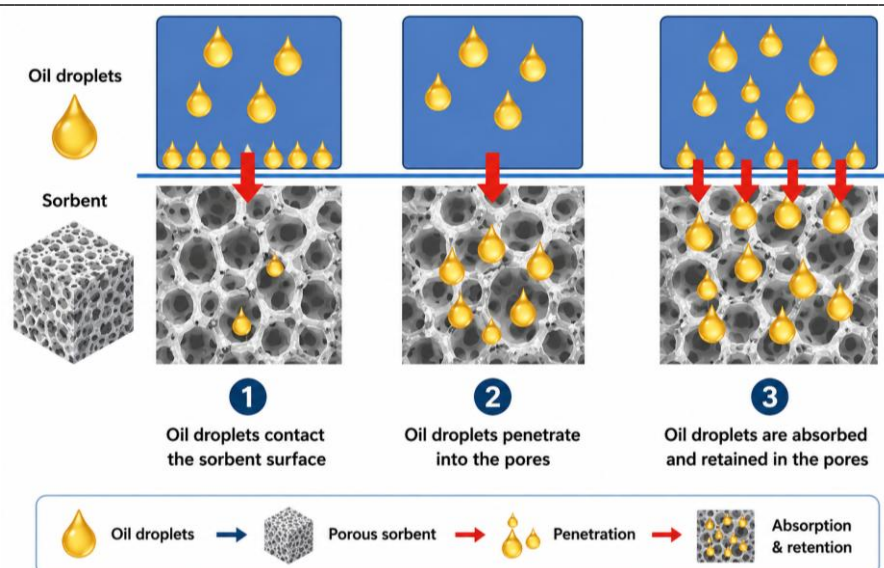


Figure 5. Schematic representation of the oil absorption process. (1) Oil droplets accumulate on the surface of the sorbents due to weak interaction forces; (2) Oil droplets penetrate into the intermolecular space of the sorbents under the action of capillary forces; (3) Both surface accumulation and intermolecular penetration exist (adapted from Ouyang et al., 2023)

Bioorganic sorbents are derived from plant-based materials such as agricultural waste, wood products, and natural fibers that are naturally oleophilic, allowing them to adsorb petroleum hydrocarbons from contaminated environments. Typical examples include peat moss, straw, sawdust, cotton fibers, and kenaf core fibers, which are widely used due to their biodegradability, low cost, and wide availability (Adebajo et al., 2003). These natural sorbents typically exhibit oil sorption capacities of approximately 3–15 times their own weight, depending on the physical structure of the material, pore distribution, and the physicochemical properties of the oil. However, bioorganic sorbents also have a number of limitations, including lower sorption capacity compared to many synthetic sorbents, reduced buoyancy after saturation, and difficulties associated with recovery and disposal after use (Ouyang et al., 2023). To address these issues, recent research has focused on chemical modification, surface functionality, and structural engineering of natural fibers to improve their hydrophobicity, oil selectivity, and sorption capacity (El Gheriany et al., 2020).

Mineral-based sorbents consist of naturally occurring inorganic materials such as clay minerals, perlite, vermiculite, and zeolites, which remove oil primarily through surface adsorption and capillary interactions within porous structures (Gote et al., 2023). These materials offer several advantages, including high thermal stability, chemical inertness, and the ability to be regenerated through thermal treatment, enabling their potential reuse in some remediation applications. The typical sorption capacity of mineral sorbents ranges from approximately 2 to 10 times their own weight, depending largely on the particle size distribution, surface area, and pore structure. However, mineral sorbents also have disadvantages, such as relatively low oil sorption capacity, limited selectivity due to significant water absorption, and high material density, which can lead to sorbent sinking after saturation (Motta et al., 2018). Consequently, their use is often limited to onshore spills or included as components in composite sorbent materials designed to improve overall performance.

2.6. Limitations of the conventional methods

Traditional oil spill response methods face numerous limitations that limit their overall effectiveness and highlight the need for more advanced response technologies. Mechanical recovery systems, such as skimmers, booms, and pumps, often recover only 10-15% of the total amount of spilled oil under real-world conditions, primarily due to operational limitations and oil dispersion

processes. Environmental factors also significantly impact cleanup effectiveness, as response operations can be delayed or suspended during adverse weather conditions, nighttime operations, or ice-covered waters, limiting rapid containment and restoration efforts (Fingas et al., 2016). Furthermore, the economic costs of large-scale oil spill response operations can reach hundreds of millions of dollars, particularly when long-term environmental remediation and ecosystem restoration are required. Traditional response methods can also cause secondary environmental impacts, including physical disturbance of sensitive habitats, toxicity of chemical dispersants, and incomplete removal of oil contaminants that persist in marine or coastal ecosystems (Dave & Ghaly, 2011).

Synthetic polymer sorbents are the most widely used industrial sorbent materials in oil spill response due to their high sorption capacity and strong oleophilic and hydrophobic properties. These sorbents are typically manufactured from polypropylene and polyurethane polymers and are available in a variety of configurations, such as loose fibers, pads, rods, and pillows, designed for a variety of spill containment and recovery scenarios (Adofo et al., 2022). Their oil sorption capacity typically ranges from approximately 10 to 70 times their own weight, and their hydrophobic characteristics minimize water absorption and improve oil selectivity. Polypropylene-based sorbents dominate the commercial market because they offer good performance at a relatively low cost, while polyurethane foams can offer even higher sorption capacities but are generally more expensive (Sharma et al., 2024). Despite their effectiveness, synthetic sorbents also have several drawbacks, including non-biodegradability, dependence on petroleum feedstocks, and difficulties associated with disposal or recycling after use, raising sustainability concerns (Ouyang et al., 2023). Traditional treatment methods can cause significant secondary environmental damage, which must be weighed against the benefits of treatment. Physical methods, including shoreline cleanup and sediment removal, can destroy habitat structure, disrupt ecological communities, and cause erosion (Sharma et al., 2024). Chemical dispersants and detergents can increase the bioavailability and toxicity of petroleum compounds to marine organisms. Bioremediation approaches, although generally environmentally friendly, can alter microbial community structure and introduce non-native organisms into bioaugmentation applications (Ouyang et al., 2023). The decision-making process for selecting a remediation strategy should include a comprehensive environmental impact assessment and stakeholder consultation.

The operational effectiveness of traditional oil spill response methods is severely limited by environmental conditions, equipment limitations, and logistical challenges that impact response operations (Fingas et al., 2016). Mechanical recovery systems such as booms and skimmers often lose effectiveness in rough seas, with many skimmer systems becoming difficult or impossible to operate when sea levels exceed approximately 1–2 meters (Keramea et al., 2021). Furthermore, oil weathering processes, including evaporation, emulsification, dissolution, and viscosity increase, gradually alter the physical and chemical properties of spilled oil, reducing the effectiveness of mechanical recovery and chemical response strategies (Dave & Ghaly et al., 2011). Delays in response times due to equipment mobilization, regulatory permits, and limited site accessibility allow spilled oil to spread over large areas and be subject to weathering processes. This significantly complicates containment and recovery efforts. Analysis of historical oil spill incidents shows that cleanup effectiveness is influenced by numerous factors, including spill volume, geographic location, oil type, environmental conditions, and the availability of response resources and infrastructure (Sörendgard et al., 2020). The economic costs of traditional oil spill response methods are significant and vary widely depending on the spill size, location, and response logistics, often reaching millions to billions of dollars for major incidents due to equipment deployment, personnel, materials, and monitoring requirements (Gnyazdovskaya, 2025). In addition to direct costs, indirect impacts such as damage to natural resources, economic losses, litigation, and long-term environmental monitoring further increase the overall financial burden. Cleanup operations also generate large volumes of contaminated waste, including oil-water mixtures, spent sorbents, and trash, requiring disposal methods such as incineration, landfill, or bioremediation, while the non-

biodegradable nature of many synthetic sorbents highlights the need for biodegradable alternatives and waste minimization technologies (Keramea et al., 2021).

3. Materials

3.1. *Materials development and challenges of oil sorbents in oil spill cleanup*

This section comprehensively reviews the existing literature on materials engineering, focusing on both fundamental theories and state-of-the-art advances. It explores the complex interplay between material properties, processing methods, and peak performance, highlighting the ongoing challenges in achieving optimal material performance for a variety of applications (Vidonish et al., 2016). Despite significant progress, the development of new materials often faces significant hurdles, particularly in areas requiring advanced performance characteristics such as those required for clean energy, efficient transportation, and sustainable infrastructure (Hastings et al., 2024). For example, tailoring the microstructure of high-entropy alloys to optimize their mechanical function remains a critical challenge, despite their promising advances in metallurgical design beyond traditional single-base element strategies (Oketola et al., 2025). However, addressing issues such as microstructural homogeneity, long-term environmental stability, and the development of cost-effective manufacturing processes for these complex materials remains an active area of research (Poulia & Karantzalis, 2025). Furthermore, the vast compositional space inherent in multicomponent systems such as high-entropy alloys presents significant challenges for efficient materials design and discovery (Muradj & Chen, 2023). This complexity requires innovative approaches to predict and control phase evolution, mechanical properties, and other critical behavioral characteristics (Rost et al., 2024). Moreover, scientific understanding of phase formation, phase stability, and microstructures at different time and temperature scales in these complex systems remains a significant hurdle for the materials science community (Kumar et al., 2022). Recent advances in computational materials science, particularly through atomistic modeling and data-driven methods, offer promising avenues to overcome these challenges. problems by revealing the complex interaction between chemical and structural complexities and their impact on material performance (Wang et al., 2024).

3.2. *Overview of oil spill problem and sorbent solutions*

Oil spills pose a serious environmental problem, causing widespread environmental damage that depends largely on the chemical composition of the oil, the characteristics of the affected environment, and the effectiveness of the recovery strategies employed during response operations. In marine ecosystems, spilled oil can undergo weathering processes such as emulsification and dispersion, forming stable oil-water emulsions, significantly complicating recovery and cleanup efforts. To address these issues, sorbent materials are widely used in oil spill response, as they can extract petroleum hydrocarbons through absorption within their porous structure or adsorption on their surfaces (Muvel et al., 2025). Due to their ease of use, cost-effectiveness, and ability to remove oil residues from water and solid surfaces, sorbents have become an important component of modern oil spill response technologies.

Absorbents are materials that retain liquids within their structure and swell significantly (more than 50%) when saturated. They must be at least 70% insoluble in the absorbed liquid. Oil-absorbing materials such as sponges, foams, nanoparticles, and aerogels can be tuned to have both hydrophobic and oleophilic wettability while exhibiting a porous structure. This can be advantageous for oil spill response in large-scale environmental and disaster situations, as these materials can readily absorb oil (Hose et al., 2023).

Adsorbents are materials that trap oil on their surface without significant swelling. These include meshes, textiles, and clays, which are often inexpensive and easy to produce. These materials can effectively absorb oil from larger spills. They adsorb adherent oil to the surface of the material, which can be useful for combating specific types of oil spills. Although sorbents provide a rapid response to oil spills, their effectiveness may vary depending on the type of oil and environmental

conditions, highlighting the need for ongoing research and development of sorbent technologies (Ismaylova et al., 2023).

3.3. Categories of oil sorbent materials

Oil sorbent materials are generally divided into synthetic and natural categories, each with different properties, advantages, and limitations in oil spill response applications. Synthetic sorbents typically consist of polymer-based materials such as polypropylene and polyurethane that are specifically designed to exhibit high oil sorption capacity, hydrophobicity, and recyclability, making them widely used in commercial oil spill response operations. However, growing environmental concerns about the non-biodegradability and oil-derived nature of synthetic sorbents have stimulated research into more sustainable alternatives (Adebajo et al., 2003).

Natural sorbents derived from renewable biomass resources, including agricultural waste and plant fibers, offer advantages such as biodegradability, low cost, environmental compatibility, and high availability. In particular, lignocellulosic materials have attracted considerable attention as environmentally friendly alternatives because their porous structure and surface chemistry allow for efficient oil sorption. Plant fibers are considered promising bio-based sorbents due to their natural hydrophobic and oleophilic properties, which can be further enhanced through physical or chemical surface modification. Recent advances in biomass-based sorbents have explored nanostructured modifications and advanced materials science approaches, enabling researchers to exploit the hierarchical architecture of natural biomass using nanotechnology to enhance sorption efficiency (Ajao and Yakubu, 2022). For example, modified sphagnum moss-based adsorbents demonstrated efficient oil-water separation due to their inherent porous structure and enhanced oil-water separation properties. These advances highlight the potential of sustainable bio-based sorbents to meet the growing demand for environmentally responsible technologies for oil spill response and oil-water remediation. The methods for modifying biomass materials are shown in Figure 6.

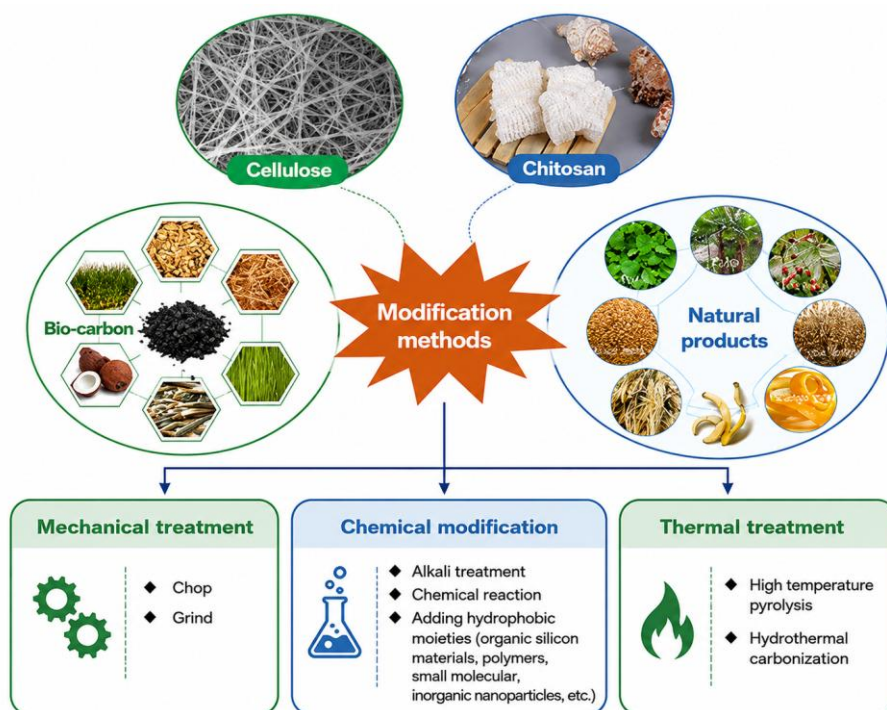


Figure 6. Modification methods for biomass materials (Zamparas et al., 2020)

Recent advances in biomass-based materials for oil spill response have focused on nanoscale modifications that enhance sorption capacity and selectivity. These materials utilize the hierarchical structure of natural biomass in combination with nanotechnology to improve surface roughness,

porosity, and wettability, thereby enabling efficient oil-water separation. In particular, hydrophobic biobased adsorbents derived from modified sphagnum moss have shown promising results. Sphagnum moss has a naturally porous structure and multiple functional groups that can be chemically modified to significantly enhance hydrophobicity and oil affinity, increasing adsorption efficiency and selectivity (Riyal et al., 2024). Recent studies have shown that such modified biomass materials can provide high oil storage capacity and reusability, making them effective candidates for environmental remediation. Furthermore, current research on bio-based sorbents emphasizes sustainable modification methods, resource circularity, and waste valorization strategies where used. Sorbents can be regenerated, reused, or converted into value-added products after oil extraction (Wang et al., 2025).

Synthetic sorbents include various polymer-based materials designed for oil absorption and adsorption. These materials have been extensively studied for their performance characteristics and reuse potential. Several new synthetic sorbents in the form of foams, sponges, fibers, meshes, nanoparticles, etc. have been developed to achieve high absorption capacity, oil/water selectivity, and reuseability for the effective separation and collection of oil from aqueous surfaces (Gui et al., 2013). Recently, much attention has been paid to synthetic polymers such as polypropylene (PP), polystyrene (PS), and polyurethane (PU) since they are viable sorbent materials among others. They have good oil sorption capacity (Sarbatly, 2016; Zhang et al., 2018). They are substantiated by properties such as lower density, high porosity, large surface area, and excellent mechanical strength. Polymers offer several advantages in that they can be easily processed, molded, and functionalized compared to other materials (Guo et al., 2017). However, certain drawbacks, such as poor resilience, low oil retention, and poor oil recovery, still limit their effectiveness in oil spill cleanup. Consequently, it has become necessary to modify these polymeric materials to increase their hydrophobicity and oleophilicity to improve their performance in oil/water separation (Zhou et al., 2013).

Surface wettability. The rate of oil and water absorption plays a critical role in the oil/water separation process, as only the oil component should be absorbed while minimizing or removing water. Sorption. This behavior is influenced by the wettability of the sorbent surfaces by both water and oil (Xue et al., 2014). It is typically assessed by measuring the contact angle for liquids of different polarities. The WCA of $133\pm3^\circ$ confirmed the hydrophobic nature of Foam 1. Accurately determining the WCA for Foam 2 is more challenging due to the roughness and inhomogeneity of the surface (Chen et al., 2019). These factors significantly influence the measured value, which was estimated as $71\pm3^\circ$ in Figure 7.

One research strategy has been to modify the surface of synthetic polymer sorbents by using certain low-surface-energy materials to increase their surface roughness and transform them into more hydrophobic and oleophilic materials to achieve higher oil absorption capacity (Lu et al., 2016). Generally, if the water contact angle (WCA) is below 90° , a solid surface is considered hydrophilic, and if the WCA is greater than 90° , it is considered hydrophobic. Highly hydrophobic surfaces made from low-surface-energy materials can achieve WCAs of up to $\approx 120^\circ$ (Chen et al., 2019). Some materials with highly rough surfaces can achieve static water absorption angles greater than 150° and dynamic water absorption angles less than 10° due to the presence of air pockets under liquid droplets and are called superhydrophobic surfaces. Several reports have been published illustrating the superior performance of superhydrophobic materials in oil-water separation systems due to their superantiwetting and self-cleaning properties (Chen et al., 2022). Over the past couple of decades, significant effort has been devoted to researching methods for producing and synthesizing durable superhydrophobic materials for effective oil-water separation during global oil spill response.



Figure 7. Wettability of foams by water and crude oil. Water and crude oil were colored for better visibility (derived from Hailan et al., 2025)

One of the drawbacks of using hydrophobic, highly porous polymeric materials for oil spill cleanup is the tendency of highly viscous oil to become trapped within the material's pores due to its low surface tension, which reduces regeneration and the potential for reuse of the material, which continues to absorb the oil. Therefore, modification of polymeric materials to enhance their adsorption capacity, surface self-cleaning, and regeneration properties should be carefully studied. Furthermore, the problems associated with reduced thermal stability of polymeric materials at high temperatures and low energy conversion efficiency must be overcome (Jose et al., 2023).

Bio-based sorbents for marine oil spill cleanup have been developed through modification methods, circular approaches, and waste valorization. These developments are aimed at creating closed-loop systems in which sorbent materials can be regenerated and reused or converted into value-added products after oil recovery (Cardoso et al., 2025). Modified polyurethane foams have been developed as reusable materials for the mechanical cleanup of marine oil spills. These materials are undergoing experimental characterization and field testing to validate their effectiveness under real-world conditions. The aspect of reusability addresses both the economic and environmental concerns associated with single-use sorbents (Niehaus et al., 2022). Recent advances in porous polymeric materials have shown significant advances in oil absorption applications. These materials are engineered with a specific pore structure of polymeric materials to optimize oil absorption capacity and selectivity (Rial et al., 2024). Development focuses on controlling porosity, surface chemistry, and mechanical properties to enhance performance. Furthermore, hydrophobic polyoxometalate-MOF-808 metalloorganic composites represent a new class of synthetic sorbents for oil absorption (Li et al., 2022). These advanced materials combine the structural advantages of metal-organic frameworks with hydrophobic modifications to achieve selective oil absorption while repelling water.

3.4. Ecofriendly biobased sorbents

An important trend in the current literature is the shift from purely synthetic sorbents (e.g., polypropylene, polyethylene) to bioderived, biodegradable materials that support circular economy principles. Biomass-based sorbents are attractive due to their low cost, natural abundance, and environmental compatibility (Silvani et al., 2017). A comprehensive analysis of biomass-derived materials for oil spill cleanup highlights agricultural waste, plant fibers, and biochar as promising candidates for sustainable remediation strategies. These materials often exhibit high porosity and sorption capacity due to their intrinsic structural features and can be further enhanced through

chemical or physical treatments to tailor their surface properties and hydrophobicity (Zhang et al., 2025). Agricultural waste and natural fibers such as rice husks, corn cob residues, wheat straw, and plant-based fibers have been identified as oil sorbents due to their high lignocellulose content and porous architecture. When carbonized, these residues form biospheres with significantly increased surface area and stability, making them effective at removing oils from both water and contaminated soils. Economic analysis of such biomass conversion suggests that increasing resource value not only provides environmental benefits but also increases the value of otherwise low-value waste (Zhang et al., 2019).

Recent studies of modified biomass sorbents show that treating natural sorbent materials with surface modifiers or functionalizing agents can significantly enhance their oil sorption performance. Surface treatment methods such as oxidation, alkali treatment, and silanization are widely used to modify the physicochemical properties of lignocellulosic materials, improving their hydrophobicity and oleophilicity (Silvani et al., 2017). For example, sphagnum moss treated with hydrogen peroxide, alkaline solutions, and silane-based modifiers has been reported to achieve a water contact angle of approximately 157° , indicating superhydrophobic behavior. This modification significantly enhances oil sorption capacity, with reported adsorption values exceeding 20 g of oil per g of sorbent, which is substantially higher than many untreated natural sorbents (Hubbe et al., 2013). These improvements are primarily attributed to changes in surface roughness and the introduction of hydrophobic functional groups, which reduce the affinity for water while promoting oil absorption. Despite these promising results, future research should focus on optimizing surface performance methods that remain durable, non-toxic, and compatible with large-scale industrial processes. Particular attention should be paid to the balance between hydrophobicity and biodegradability to ensure that modified materials do not become persistent secondary pollutants in the environment (Xue et al., 2014). Furthermore, the integration of waste valorization strategies, in which agricultural or forestry waste is converted into highly effective sorbents, represents an important path toward sustainable and circular environmental restoration technologies.

3.5. Nanotechnology and nanoenhanced sorbents

Nanomaterials offer significant potential for overcoming the limitations of traditional oil sorbents due to their extremely high surface-to-volume ratios, tunable surface chemistry, and enhanced mechanical strength. These properties enable nanoscale materials to exhibit enhanced sorption capacity, increased selectivity for hydrophobic compounds, and improved recovery properties compared to traditional materials (Bharadwaj et al., 2024).

In particular, nanocomposite sorbents—materials formed by integrating polymers with nanostructures such as carbon nanotubes (CNTs), graphene derivatives, and magnetic nanoparticles—have demonstrated significant improvements in the efficiency and stability of oil sorption (Benkhaya et al., 2024). Carbon-based nanocomposites, including graphene foams, CNT sponges, and mesoporous carbon fibers, have been extensively studied due to their inherent hydrophobicity, high specific surface area, and strong oleophilic interactions with hydrocarbons. These materials often exhibit exceptional oil sorption capacity, as well as structural robustness, which allows multiple reuse without significant performance loss (Kim et al., 2025). Recent developments include polyacrylonitrile (PAN)-based nanocomposite fibers that incorporate CNTs or graphene oxide to enhance porosity, hydrophobicity, and mechanical stability (Yan & Wang, 2023; Momenzadeh, 2024; Lu et al., 2024). These sorbents have shown oil absorption values of approximately 15 g/g with good performance under repeated reuse, indicating their potential for multiple applications.

3.6. Magnetic nanoparticles and smart recovery

The introduction of magnetic components (Fe_3O_4) into oil sorbents enables easy mechanical extraction from water, eliminating the need for sorption degreasing or manual collection. Functionalized magnetic nanoparticles embedded in polymer or biomass matrices have been shown

to provide nearly complete oil removal in laboratory settings. However, concerns remain regarding nanoparticle aggregation, potential ecotoxicity, and post-use environmental impacts. As shown in Figure 8, environmentally friendly and hydrophobic foams were developed by uniformly distributing natural rubber (NR) over the CNF surface [145]. The resulting composite foam exhibited excellent sorption capacity and rate (more than 50 g/g in 3 s), as well as excellent reusability of various organic solvents and oils. By fully exploiting the synergistic effect of cellulose and chitosan, Hardian et al. fabricated an oil- and solvent-resistant nanofiltration membrane with excellent separation efficiency and chemical stability (Lorevice et al., 2020). Two kinds of modified CNFs were used to create a hydrophilic and underwater oleophobic cellulose sponge, which exhibits high separation efficiency (99%) by gravity alone (Hardian et al., 2022). The phase separation process is illustrated in Figure 8.

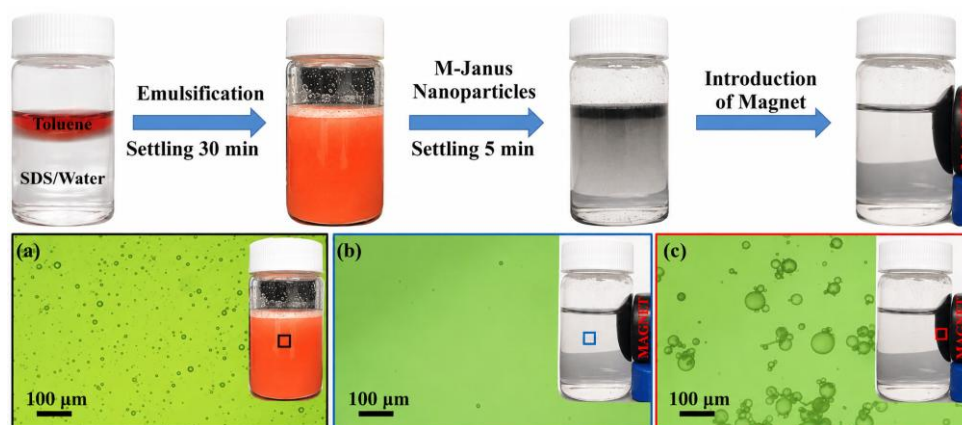


Figure 8. Phase separation process of SDS-stabilized toluene-water emulsions with the addition of M-Janus nanoparticles in an external magnetic field (top row) and micrographs of SDS-stabilized toluene emulsion droplets in water (bottom row). (a) Stable small toluene droplets before phase separation. (b) Pure water phase after phase separation and (c) toluene droplets labeled with M-Janus nanoparticles after phase separation (Reproduced from (He et al., 2019))

Furthermore, environmental impacts and safety considerations remain important concerns, particularly for sorbents that incorporate nanomaterials or functional surface coatings. Although these materials can significantly enhance adsorption capacity, hydrophobicity, or selectivity, their long-term environmental effects are not yet fully understood. Therefore, comprehensive environmental risk assessments and toxicological studies are needed to evaluate potential impacts on aquatic ecosystems and ensure that remediation technologies do not introduce new environmental hazards (Adebajo et al., 2003). Finally, performance under real environmental conditions remains poorly understood. Many laboratory studies rely on oil models and simplified experimental setups that do not fully reproduce the complexity of real spill scenarios. In the natural environment, spilled oil may undergo weathering processes, form stable emulsions, and interact with seawater, sediments, and biological materials. These factors can significantly affect sorbent performance. Thus, further research is needed to evaluate the effectiveness of sorbents when dealing with weathered crude oil, oil-in-water emulsions, and dynamic marine conditions such as waves, salinity, and temperature fluctuations (Cardoso et al., 2025). Addressing these challenges will be crucial for translating promising laboratory-scale sorbent technologies into practical and environmentally friendly solutions for large-scale oil spill response projects.

4. Conclusion

The increasing frequency and environmental impact of oil spills has increased the need for effective, sustainable, and environmentally responsible cleanup technologies. This review highlights significant advances in sorbent materials for oil spill cleanup, ranging from traditional synthetic sorbents to new nanostructured materials. Biomass-based sorbents derived from agricultural waste

and natural fibers are attracting increasing attention due to their abundance, low cost, biodegradability, and compatibility with circular economy principles. Through processes such as carbonization, surface functionalization, and chemical modification, these materials can achieve enhanced hydrophobicity, porosity, and oil sorption capacity, making them a viable alternative to traditional polymer sorbents.

Meanwhile, recent advances in nanotechnology have led to the emergence of advanced sorbent systems, including carbon-based nanocomposites, electrospun polymer nanofibers, and magnetically responsive materials. These technologies offer superior adsorption capacities, fast sorption kinetics, and improved recovery capabilities. For example, nanocomposites incorporating graphene, carbon nanotubes, or magnetic nanoparticles have demonstrated promising results in laboratory studies, enabling efficient oil capture and simplified sorbent recovery. However, despite these technological advances, a number of significant challenges remain. The scalability and economic feasibility of producing nanostructured sorbents on an industrial scale is still limited, and the long-term environmental and toxicological impacts of nanomaterials require further research.

Therefore, future research should prioritize the development of cost-effective, environmentally friendly sorbents that combine high performance with safe degradation and the possibility of large-scale production. Integrating biomass value-added strategies with advanced materials science technologies may offer a promising path to sustainable oil spill remediation. Ultimately, bridging the gap between laboratory innovation and practical field application will be essential for developing robust solutions capable of addressing large-scale environmental pollution challenges.

5. Supplementary Materials: No supplementary material.

6. Author Contributions

Conceptualization, N.M. and N.B.; methodology, N.M., N.B., and Zh.M.; formal analysis, N.M., Zh.M., and M.S.; investigation, M.S.; data curation, M.S. and K.S.; writing—original draft preparation, N.M. and N.B.; writing - review and editing, N.M., N.B., Zh.M., and K.S.; visualization, Zh.M. and K.S.; supervision, N.B.; project administration, N.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

7. Author Information

Mukhametgazy, Nurbatyr – PhD, Department of Chemistry, Faculty of Natural Sciences and Geography, Abai Kazakh National Pedagogical University, 13 Dostyk Avenue, Almaty, Kazakhstan, 050010; nurbatyr.kaz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5957-0305>

Bektenov, Nesipkhan – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Chemistry, Faculty of Natural Sciences and Geography, Abai Kazakh National Pedagogical University, 13 Dostyk Avenue, Almaty, Kazakhstan, 050010; A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences JSC, 106 Shokan Ualikhanov Street, Almaty, Kazakhstan, 050010; bekten_1954@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1427-438X>

Mukatayeva, Zhazira – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Chemistry, Faculty of Natural Sciences and Geography, Abai Kazakh National Pedagogical University, 13 Dostyk Avenue, Almaty, Kazakhstan, 050010; jazira-1974@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1584-5810>

Suleimenova, Meruyert – PhD Student, Department of Chemistry, Faculty of Natural Sciences and Geography, Abai Kazakh National Pedagogical University, 13 Dostyk Avenue, Almaty, Kazakhstan, 050010; suleimenova.me@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0773-2450>

Sarsekova, Klara – Lecturer, M.Sc., Department of Chemistry, Faculty of Natural Sciences and Geography, Abai Kazakh National Pedagogical University, 13 Dostyk Avenue, Almaty, Kazakhstan, 050010; k.sarsekova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2056-655X>

8. Funding: This research has not external funding programs.

9. Conflicts of Interest: The authors declare that there are no conflicts of interest between the authors that require disclosure in this article.

10. References

1. Abhinav, D., & Pradipta, C. (2021). A review on physical remediation techniques for treatment of marine oil spills. *Journal of Environmental Management*, 288, 112428. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112428>
2. Abu, T. O., Zubairu, A., Achepa, O. V., Olansile, G. K., Adewoye, T. L., & Hambali, H. U. (2025). Biomass-derived oil sorbents, their low density, biodegradability, and high oil adsorption potential: biomass-based sorbents for oil spill cleanup - a review. *Malaysian Journal of Catalysis*, 9(1), 1–15. <https://doi.org/10.11113/mjcat.v9n1.1928>
3. Adebajo, M. O., Frost, R. L., Klopprogge, J. T., Carmody, O., & Kokot, S. (2003). Porous materials for oil spill cleanup: a review of synthesis and absorbing properties. *Journal of Porous Materials*, 10(3), 159–170. <https://doi.org/10.1023/A:10274841170659>
4. Adofo, Y. K., Nyankson, E., & Agyei-Tuffour, B. (2022). Dispersants as an oil spill clean-up technique in the marine environment: a review. *Heliyon*, 8(8), e10226. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10226>
5. Ahmed, F. I., & Ibrahim, S. A. (2019). Bioremediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbons: A review of remediation techniques. *Environmental Technology & Innovation*, 15, 100526. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>
6. Ajao, O., & Yakubu, M. (2022). Sustainable hydrophobic bio-based adsorbents from modified sphagnum moss for oil–water separation. *Scientific Reports*, 12, 14628. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18888-311>
7. Ajona, M., & Vasanthi, P. (2021). Bioremediation of petroleum-contaminated soils – a review. *Materials Today: Proceedings*, 45(7), 7117–7122. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.949>
8. Akhtar, M. S. (2024). Innovative adsorbents for pollutant removal: Exploring the latest advancements and sustainable prospects. *Molecules*, 29(18), 4317. <https://doi.org/10.3390/molecules29184317>
9. Askari, E., Alipour, V., & Rahmanian, O. (2025). Synthesis and application of adsorbent pads for removal of oil pollutants from water. *Heliyon*, 11(4), e42885. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42885>
10. Assumma, V., Bottero, M., De Angelis, E., Lourenço, J. M., Monaco, R., & Soares, A. J. (2021). A decision support system for territorial resilience assessment and planning: an application to the Douro Valley (Portugal). *Science of the Total Environment*, 756, 143806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143806>
11. Benkhaya, S., El Harfi, A., & El Idrissi, N. (2024). Recycled PET–lignocellulose/carbon nanotube–graphene nanosheet nanocomposite as an efficient extractor for oil spill remediation. *Processes*, 12(11), 2437. <https://doi.org/10.3390/pr12112437>
12. Bharadwaj, R., Kumar, A., & Singh, R. (2024). Nano-welded carbon nanotube sponges for efficient oil spill remediation. *Journal of Cleaner Production*, 467, 142841. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142841>
13. Bi, H., An, C., Owens, E., Lee, K., Chen, Z., Mulligan, C., Taylor, E., & Boufadel, M. (2021). A framework for the evaluation and selection of shoreline surface washing agents in oil spill response. *Journal of Environmental Management*, 287, 112346. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112346>
14. Brandvik, P. J., et al. (2021). Offshore field experiments with in-situ burning of oil: emissions and burn efficiency. *Environmental Research*, 203, 112419. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112419>
15. Bykova, M. V., Alekseenko, A. V., Pashkevich, M. A., & Drebenstedt, C. (2021). Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soils of tundra, taiga, and forest

- steppe landscapes. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(6), 2331–2346. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00802-021>
16. Cardoso, C. K. M., Moreira, Í. T. A., de Souza Queiroz, A. F., de Oliveira, O. M. C., & de Carvalho Lima Lobato, A. K. (2025). Bio-based sorbents for marine oil spill response: advances in modification, circularity, and waste valorization. *Resources*, 14(9), 140. <https://doi.org/10.3390/resources1409014022>
17. Chang, S. E., Stone, J., Demes, K., & Piscitelli, M. (2014). Consequences of oil spills: a review and framework for informing planning. *Ecology and Society*, 19(2), Article 28. <https://doi.org/10.5751/ES-06873-1902281>
18. Chen, B., Zhang R., Fu, H., Xu, J., Jing, Y., Xu, G., Wang, B., & Hou, X. (2022). Efficient oil–water separation coating with robust superhydrophobicity and high transparency. *Scientific Reports*, 12, 2187. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06220-923>
19. Chen, C., Weng, D., Mahmood, A., Chen, S., & Wang, J. (2019). Separation mechanism and construction of surfaces with special wettability for oil/water separation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(12), 11006–11027. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b0129324>
20. Chen, J., Ni, Y., Gou, Y., Zhu, T., Sun, L., Chen, Z., Huang, J., Yang, D., & Lai, Y. (2024). Hydrophobic organogel sorbent and its coated porous substrates for efficient oil/water emulsion separation and effective spilled oil remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 461, 132674. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.1326744>
21. Chen, X., Bi, H., Yue, R., Chen, Z., & An, C. (2022). Effects of oil characteristics on the performance of shoreline response operations: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1033909. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.103390925>
22. D’Andrea, M. A., & Reddy, G. K. (2013). Health consequences among subjects involved in Gulf oil spill clean-up activities. *The American Journal of Medicine*, 126(11), 966–974. <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2013.05.01426>
23. Dave, D., & Ghaly, A. E. (2011). Remediation technologies for marine oil spills: a critical review and comparative analysis. *American Journal of Environmental Sciences*, 7(5), 423–440. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2011.423.4402728>
24. Dehmani, Y., Ba Mohammed, B., Oukhrib, R., Dehbi, A., Lamhasni, T., Brahmi, Y., El-Kordy, A., Franco, D. S. P., Georgin, J., Lima, E. C., Alrashdi, A. A., Tijani, N., & Abouarnadasse, S. (2024). Adsorption of various inorganic and organic pollutants by natural and synthetic zeolites: a critical review. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(1), 105474. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105474>
25. Duarte, H., Aliano-González, M. J., Romano, A., & Medronho, B. (2024). Advancements in detection and mitigation strategies for petroleum-derived contaminants in aquatic environments: a comprehensive review. *Sensors (Basel)*, 24(11), 3284. <https://doi.org/10.3390/s241132841>
26. Ekunke, O. V., Odor, G. E., Sani, S. M., Ojeilua, C. H., Attairu, M. L., Ahmed, M. A., & Elabor, I. (2025). A review of modern technologies and best practices for oil spill containment and response. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 25(3), 2117–2128. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.3.09336>
27. El Gheriany, I. A., El Saqa, F. A., Amer, A. A. E. R., & Hussein, M. (2020). Oil spill sorption capacity of raw and thermally modified orange peel waste. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 925–932. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.0249>
28. Elgarahy, A., Eloffy, M. G., Ak, P., Zirari, M., Ali, M., Alkhatib, L., Alqahtani, M., & Al-Wakeel, K. (2025). Sustainable biopolymer-based materials for oil spill remediation: artificial intelligence integration and technoeconomic insights – a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 332, 148310. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.14831015>
29. Falciglia, P. P., Lumia, L., Giustra, M. G., Gagliano, E., Roccaro, P., Vagliasindi, F. G. A., & Di Bella, G. (2020). Remediation of petrol hydrocarbon-contaminated marine sediments by

- thermal desorption. *Chemosphere*, 260, 127576.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127576>
30. Farahani, M. D., & Zheng, Y. (2022). The formulation, development and application of oil dispersants. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 425.
<https://doi.org/10.3390/jmse100304251231>
31. Fernandes, J. C., Agrawal, N. R., Aljirafi, F. O., Bothun, G. D., McCormick, A. V., John, V. T., & Raghavan, S. R. (2019). *Langmuir*, 35(50), 16630–16639.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b0218412>
32. Fingas, M. (2011). Oil spill dispersants: a technical summary. In M. Fingas (Ed.), *Oil spill science and technology: Prevention, response, and cleanup* (pp. 435–582). Elsevier, Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-943-0.10015-23>
33. Fingas, M. (2014). In-situ burning of oil spills: a historical perspective. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.04632>
34. Fingas, M. (2016). *Oil Spill Science and Technology* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04066-42>
35. Fodrie, F. J., & Heck, K. L. (2011). Response of coastal fishes to the Gulf of Mexico oil disaster. *PLoS ONE*, 6(7), e21609. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.002160926>
36. Gao, P., Zhang, Y., & Zhao, L. (2024). Synthetic zeolites derived from fly ash as effective mineral sorbents for diesel fuel spill remediation. *Clays and Clay Minerals*, 64(5), 552–559.
<https://doi.org/10.1346/CCMN.2016.06403529>
37. Ge, J., Shi, L., Wang, Y. C., Zhao, H. Y., Yao, H. B., Zhu, Y. B., Zhang, Y., Zhu, H. W., Wu, H. A., & Yu, S. H. (2016). A superhydrophobic magnetic cellulose aerogel for oil absorption. *Angewandte Chemie International Edition*, 55(25), 7081–7085.
<https://doi.org/10.1002/anie.20160194633>
38. Ge, J., Shi, L.-A., Wang, Y.-C., Zhao, H.-Y., Yao, H.-B., Zhu, Y.-B., Zhang, Y., Zhu, H.-W., Wu, H.-A., & Yu, S.-H. (2017). Joule-heated graphene-wrapped sponge enables fast clean-up of viscous crude-oil spill. *Chemical Engineering Journal*, 308, 696–703.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.10234>
39. Ghazali, F. M., Rahman, R. N. Z. R. A., Salleh, A. B., Basri, M., & Noor, M. J. M. (2023). New insights into the bioremediation of petroleum contaminants: a systematic review. *Chemosphere*, 333, 138391. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.13839135>
40. Ghobashy, M. M., & Gayed, H. M. (2024). Thermal conversion of irradiated LLDPE waste into sustainable spongelike compounds: a novel approach for efficient tracelevel oil–water removal. *Scientific Reports*, 14, Article 4833. <https://doi.org/10.1038/s4159802455401136>
41. Gniazdowska, J. (2025). The potential of waste-derived sorbents for absorbing oil spills: implications for cleanup cost and waste management. *Materials*, 18(16), 3752.
<https://doi.org/10.3390/ma1816375237>
42. Googol, F., & Rahmati, A. (2024). Synthesis of dicholesteryl organogelator as a green sorbent nanomaterial for oil spill remediation. *Scientific Reports*, 14, 21111.
<https://doi.org/10.1038/s4159802472077938>
43. Gote, M. G., Dhila, H. H., & Muley, S. R. (2023). Advanced synthetic and bio-based sorbents for oil spill clean-up: a review of novel trends. *Nature Environment and Pollution Technology*, 22(1), 39–61. <https://doi.org/10.46488/nept.2023.v22i01.0048>
44. Gui, X., Wei, J., Wang, K., Cao, A., Zhu, H., Jia, Y., Shu, Q., & Wu, D. (2013). Carbon nanotube sponges as excellent absorbents for oil spill cleanup. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(12), 5845–5850. <https://doi.org/10.1021/am401256740>
45. Guo, F., Wen, Q., Peng, Y., & Guo, Z. (2017). Multifunctional hollow superhydrophobic SiO₂ microspheres with robust and self-cleaning and separation of oil/water emulsion properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 494, 54–63.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.01.07041>

46. Hailan, S. M., Krupa, I., & McKay, G. (2025). Removal of oil spills from aqueous systems by polymer sorbents. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 3833–3854. <https://doi.org/10.1007/s1376202405959036>
47. Hailan, S. M., Nógellová, Z., Popelka, A., Ilčíková, M., Mrlík, M., Minářík, A., Mikulka, F., McKay, G., & Krupa, I. (2025). Utilization of polyethylene waste for designing foamy oil sorbents. *Emergent Materials*, 8, 3075–3087. <https://doi.org/10.1007/s42247-025-01024-9424>
48. Hardian, R., Alammari, A., Holtzl, T., & Szekely, G. (2022). Fabrication of sustainable organic solvent nanofiltration membranes using cellulose–chitosan biopolymer blends. *Journal of Membrane Science*, 658, 120743. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.12074342>
49. Hastings, J. R., Lee, M., & Patel, S. (2024). Advanced materials for sustainable energy, transportation, and infrastructure systems. *Progress in Materials Science*, 142, 101212. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.10121243>
50. He, X., Liang, C., Liu, Q., & Xu, Z. (2019). Magnetically responsive Janus nanoparticles synthesized using cellulosic materials for enhanced phase separation in oily wastewaters and water-in-crude oil emulsions. *Chemical Engineering Journal*, 378, 122045. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.12204542>
51. Hoang, A. T., Nguyen, X. P., Duong, X. Q., & Huynh, T. T. (2021). Sorbent-based devices for the removal of spilled oil from water: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(23), 28876–28910. <https://doi.org/10.1007/s1135602113775z16>
52. Hubbe, M. A., Rojas, O. J., Fingas, M., & Gupta, B. S. (2013). Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. *Bioresource Technology*, 160, 206–221. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.09644>
53. Huynh, T. B., Groth, C. P., Ramachandran, G., Banerjee, S., Stenzel, M., Blair, A., Sandler, D. P., Engel, L. S., Kwok, R. K., & Stewart, P. A. (2022). Estimates of inhalation exposures among land workers during the Deepwater Horizon oil spill clean-up operations. *Annals of Work Exposures and Health*, 66, i124–i139. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxab0287>
54. Ismayilova, R. A., Aliyev, E. N., & Geraybeyli, S. A. (2023). Innovative technologies for oil spill response by adsorption separation of oil and water: A review. *Caspian Hydrometeorological Studies*, 7(2), Article 25003. <https://doi.org/10.25514/chs.2023.2.2500345>
55. Jang, E., Choi, S. W., & Lee, K. B. (2019). Effect of carbonization temperature on the physical properties and CO₂ adsorption behavior of petroleum coke-derived porous carbon. *Fuel*, 248, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.05120>
56. José, M. H., Canejo, J. P., & Godinho, M. H. (2023). Oil/water mixtures and emulsions separation methods - an overview. *Materials*, 16(6), 2503. <https://doi.org/10.3390/ma160625032245>
57. Juraij, K., Sagitha, P., & Sujith, A. (2025). Electrospun nanofibrous membranes based sorbents for oil/water separation: blends, composites, functionalized, and smart membranes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 116262. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.11626246>
58. Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., & Sylaios, G. (2021). Oil spill modeling: a critical review on current trends, perspectives, and challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 181. <https://doi.org/10.3390/jmse90201812837>
59. Keramea, P., Zodiatis, G., & Sylaios, G. (2026). Analysis of major global oil spill incidents: part 1-environmental and ecological impacts. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14(2), 153. <https://doi.org/10.3390/jmse1402015331>
60. Khalil, M., El-Boghdady, I., & Reda, E. (2022). Oil-recovery performance of a sponge-covered drum skimmer. *Alexandria Engineering Journal*, 61, 12653–12660. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.06.01125>
61. Kim, J., Lee, H., & Park, S. (2025). Electrospun PVC/graphene composite nanosponges for oil spill cleanup. *Fibers and Polymers*, 26, 1061–1073. <https://doi.org/10.1007/s12221-024-00820-018>

62. Kim, Y. (2020). Removal of petroleum hydrocarbons from contaminated soils using thermal desorption. *Applied Biological Chemistry*, 63, 69. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00569-z39>
63. Kumar, R., Singh, P., & Gupta, A. (2022). Phase stability and microstructure evolution in complex alloy systems: A review. *Journal of Materials Science*, 57(18), 8754–8775. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07123-547>
64. Lee, K., & Neff, J. M. (2018). Oil spill cleanup techniques and response strategies: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 129(1), 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.01125>
65. Li, A., Huber, T., Barker, D., Nazmi, A. R., & Najaf Zadeh, H. (2024). An overview of cellulose aerogels and foams for oil sorption: preparation, modification, and potential of 3D printing. *Carbohydrate Polymers*, 343, 122432. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.12243248>
66. Li, C., Zhang, Q., Wang, X., Li, X., & Wu, T. (2022). Hydrophobic polyoxometalate–MOF-808 composites for selective oil adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 450, 138427. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.13842749>
67. Liang, J., Zhou, Y., Wu, Q., Zhu, Z., Lin, K., He, J., Hong, H., & Luo, Y. (2024). Superhydrophobic foam combined with biomass-derived TENG based on upcycled coconut husk for efficient oil-water separation. *RSC Advances*, 14, 13005–13015. <https://doi.org/10.1039/D4RA01841A50>
68. Liu, Y., Yin, Z., & Cai, H. (2025). Enhanced global oil spill dataset from 1967 to 2023 based on textform incident information. *Scientific Data*, 12, 1394. <https://doi.org/10.1038/s4159702505601936>
69. Lorevice, M. V., Mendonça, E. O., Orra, N. M., Borges, A. C., & Gouveia, R. F. (2020). Porous cellulose nanofibril–natural rubber latex composite foams for oil and organic solvent absorption. *ACS Applied Nano Materials*, 3(11), 10954–10965. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c02203>
70. Lu, S., Xu, X., & Wang, Y. (2016). Facile fabrication of superhydrophobic meshes with different water adhesion and their influence on oil/water separation. *RSC Advances*, 6(93), 90824–90830. <https://doi.org/10.1039/C6RA15123A23>
71. Lu, T., Zhang, Q., Yang, J., Xin, Y., Zhang, Z., Hu, J., Qin, Q., & Yang, H. (2024). Preparation of PAN/graphene oxide composite nanofiber membrane for oil-containing wastewater treatment. *Carbon Letters*, 34, 109–122. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00637-651>
72. Momenzadeh, Z., Ashjari, M., Nemati Laya, E., & Paki, M. (2024). Highly efficient and reusable polyacrylonitrile-based nanocomposite sorbents for oil spill removal. *Advanced Composite Materials*. <https://doi.org/10.1080/09243046.2024.238741351>
73. Mooraj, S., & Chen, L. (2023). Exploring the compositional space of high-entropy alloys using computational design approaches. *Computational Materials Science*, 215, 111788. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2023.11178852>
74. Motta, F. L., Stoyanov, S. R., & Soares, J. B. P. (2018). Application of solidifiers for oil spill containment: a review. *Chemosphere*, 194, 837–846. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.10319>
75. Mullin, J. V., & Champ, M. A. (2003). Introduction/overview to in-situ burning of oil spills. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(4), 323–330. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(03\)00076-832](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(03)00076-832)
76. Muvel, H., Jindal, M. K., Tewari, P. K., & Anand, V. (2025). Minimizing oil pollution: a review of current status and its treatment options. *RSC Sustainability*, 3(9), 3681–3723. <https://doi.org/10.1039/D5SU00403A45>
77. Niehaus, D., Hofmann, S., Kumar, S. B., Hoffmann, M., Cisneros-Aguirre, J., & Schlüter, M. (2022). Experimental characterisation and field experience of a reusable, modified polyurethane foam for the mechanical clean-up of oil spills on the sea surface. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1369. <https://doi.org/10.3390/jmse10101369>

78. Niehaus, D., Hofmann, S., Kumar, S. B., Hoffmann, M., Cisneros-Aguirre, J., & Schlüter, M. (2022). Experimental characterisation and field experience of a reusable, modified polyurethane foam for the mechanical clean-up of oil spills on the sea surface. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10, 1369. <https://doi.org/10.3390/jmse10101369>
79. Odoom, D., Agyepong, L., Dick-Sago, C., & Mensah, E. O. (2024). Unveiling the social media landscape: exploring factors influencing usage patterns among tertiary education students in Ghana. *Education and Information Technologies*, 30, 3861–3883. <https://doi.org/10.1007/s1063902412944016>
80. Oketola, F., Johnson, T., & Adeyemi, O. (2025). Microstructure control and mechanical performance of high-entropy alloys: challenges and opportunities. *Materials Today Advances*, 16, 100356. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2025.100356>
81. Olsen, G. H., Klok, C., Hendriks, A. J., Geraudie, P., De Hoop, L., De Laender, F., Farmen, E., Grøsvik, B. E., Hansen, B. H., Hjorth, M., Jansen, C. R., Nordtug, T., Ravagnan, E., Viaene, K., & Carroll, J. (2013). Toxicity data for modeling impacts of oil components in an Arctic ecosystem. *Marine Environmental Research*, 90, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.05.00753>
82. Ouyang, D., Lei, X., & Zheng, H. (2023). Recent advances in biomass-based materials for oil spill cleanup. *Nanomaterials*, 13(3), 620. <https://doi.org/10.3390/nano130306201013>
83. Philippine Coast Guard. (2024). Report on the sinking of MT Terranova and oil spill response operations in Manila Bay. <https://www.coastguard.gov.ph/17>
84. Pi, P. (2024). A review of various dimensional superwetting materials for oil-water separation. *Nanoscale*. <https://doi.org/10.1039/D4NR01473A46>
85. Poulia, A., & Karantzalis, A. (2025). Processing challenges and environmental stability of multicomponent alloys for advanced structural applications. *Metals*, 15(2), 204. <https://doi.org/10.3390/met1502020452>
86. Prince, R. C. (2015). Oil spill dispersants: boon or bane? *Environmental Science & Technology*, 49(11), 6376–6384. <https://doi.org/10.1021/es504808r26>
87. Ragoonaden, S. (2021). Environmental impact of the MV Wakashio oil spill on the coastal ecosystems of Mauritius. *Regional Studies in Marine Science*, 48, 102008. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.10200817>
88. Riser-Roberts, E. (2020). Treatment of petroleum-contaminated soils. (n.d.). USDA Forest Service. <https://www.fs.usda.gov/td/pubs/htmlpubs/htm02712801/section07.htm56>
89. Riyal, I., Sharma, H., & Dwivedi, C. (2024). Arising hydrophobic wettable materials for oil spill clean-up: A review. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101274. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.10127440>
90. Rost, C. M., Pickering, E. J., & Miracle, D. B. (2024). High-entropy alloys: From fundamentals to advanced structural materials. *Nature Reviews Materials*, 9, 215–232. <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00564-747>
91. Saleem, J., Riaz, M. A., & McKay, G. (2018). Oil sorbents from plastic wastes and polymers: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 341, 424–437. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.07248>
92. Sarbatly, R., Krishnaiah, D., & Kamin, Z. (2016). A review of polymer nanofibres by electrospinning and their application in oil–water separation for cleaning up marine oil spills. *Marine Pollution Bulletin*, 106(1–2), 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.0374857>
93. Sharma, K., Gupta, S., & Verma, R. (2024). Structure–processing–property relationships in advanced engineering materials. *Materials Science and Engineering: A*, 882, 145527. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.14552713>
94. Sharma, K., Shah, G., Singh, H., Bhatt, U., Singhal, K., & Soni, V. (2024). Advancements in natural remediation management techniques for oil spills: challenges, innovations, and future

- directions. *Environmental Pollution and Management*, 1, 128–146. <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.08.00338>
95. Shojaei, N., Aminsharei, F., & Abbastabar Ahangar, H. (2021). Application of hydrophobic polymers as solidifiers for oil spill cleanup. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, 1419–1424. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02882-y54>
96. Silvani, L., Vrchotova, B., Kastanek, P., Demnerova, K., & Petrangeli Papini, M. (2017). Characterizing biochar as alternative sorbent for oil spill remediation. *Scientific Reports*, 7, 43912. <https://doi.org/10.1038/srep4391258>
97. Sivashunmugam, S. (2021). Biocarbons as emerging and sustainable hydrophobic/oleophilic sorbent materials for oil/water separation. *Sustainable Materials and Technologies*, e00268. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e0026850>
98. Soares, M. O., Teixeira, C. E. P., Bezerra, L. E. A., Paiva, S. V., Tavares, T. C. L., & Garcia, T. M. (2020). Oil spill in South Atlantic (Brazil): environmental and governmental disaster. *Marine Policy*, 115, 103879. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.10387955>
99. Söregård, M., Lindh, A. S., & Ahrens, L. (2020). Thermal desorption as a high removal remediation technique for soils contaminated with per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *PLoS One*, 15(6), e0234476. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.023447637>
100. Sousa, A. L., Matos, H. A., & Guerreiro, L. P. (2019). Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9, 2091–2107. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0609-x54>
101. Vidonish, J. E., Zygourakis, K., Masiello, C. A., Sabadell, G., & Alvarez, P. J. J. (2016). Thermal treatment of hydrocarbon-impacted soils: a review of technology innovation for sustainable remediation. *Engineering*, 2(4), 426–437. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2016.04.0054356>
102. Vu, K. A., & Mulligan, C. N. (2023). An overview on the treatment of oil pollutants in soil using synthetic and biological surfactant foam and nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 1916. <https://doi.org/10.3390/ijms2403191631>
103. Wang, Y. (2024). Data-driven materials design and atomistic simulations for complex alloys. *npj Computational Materials*, 10, 64. <https://doi.org/10.1038/s41524-024-01120-347>
104. Wang, Y., Zhang, X., Li, J., Chen, H., Liu, Q., & Zhao, L. (2025). Sustainable hydrophobic bio-based adsorbent from modified sphagnum moss for efficient oil–water separation. *Scientific Reports*, 15, 96059. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96059-740>
105. Wu, D., Fang, L., Qin, Y., Wu, W., Mao, C., & Zhu, H. (2014). Oil sorbents with high sorption capacity, oil/water selectivity and reusability for oil spill cleanup. *Marine Pollution Bulletin*, 84(1–2), 263–267. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.05.00533>
106. Wu, Z.-Y., Li, C., Liang, H.-W., Zhang, Y.-N., Wang, X., Chen, J.-F., & Yu, S.-H. (2014). Carbon nanofiber aerogels for emergent cleanup of oil spillage and chemical leakage under harsh conditions. *Scientific Reports*, 4, 4079. <https://doi.org/10.1038/srep0407959>
107. Xue, Z., Cao, Y., Liu, N., Feng, L., & Jiang, L. (2014). Special wettable materials for oil/water separation. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(7), 2445–2460. <https://doi.org/10.1039/C3TA13397D2444>
108. Yan, X., & Wang, Y. (2023). Janus polyacrylonitrile/carbon nanotube nanofiber membranes for oil/water separation. *ACS Applied Nano Materials*, 6(6), 4511–4521. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c0000651>
109. Yang, Y., Guo, Z., & Liu, W. (2022). Special superwetting materials from bioinspired to intelligent surface for on-demand oil/water separation: a comprehensive review. *Small*, 18(48), 2204624. <https://doi.org/10.1002/sml.20220462446>
110. Zamparas, M., Tzivras, D., Dracopoulos, V., & Ioannides, T. (2020). Application of sorbents for oil spill cleanup focusing on natural-based modified materials: a review. *Molecules*, 25(19), 4522. <https://doi.org/10.3390/molecules251945223>
111. Zekri, A. Y., & Chaalal, O. (2005). Effect of temperature on biodegradation of crude oil. *Energy Sources*, 27, 233–244. <https://doi.org/10.1080/009083104904509713>

112. Zhang, D., Wang, G., Zhi, S., Xu, K., Zhu, L., Li, W., & Zeng, Z. (2018). Superhydrophilicity and underwater superoleophobicity $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite membrane with ultra-low oil adhesion for highly efficient oil-in-water emulsions separation. *Applied Surface Science*, 458, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.07.05257>
113. Zhang, H., Tazhibayeva, S., & Yang, J. (2025). Development of biochar adsorbents based on walnut shell with magnetic modification for efficient crude oil removal from water. *Scientific Reports*, 15, 38174. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-22084-158>
114. Zhang, M., Chen, Q., & Gong, Z. (2024). Microbial remediation of petroleum-contaminated soil focused on the mechanism and microbial response: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31, 33325–33346. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33474-914>
115. Zhang, W., Cao, F., & Zhang, Y. (2019). Sorption and removal of crude oil spills from seawater using peat-derived biochar: an optimization study. *Journal of Environmental Management*, 250, 109465. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.10946544>
116. Zhao, Y., Sun, Y., Sun, H., Zuo, F., Kuang, S., Zhang, S., & Wang, F. (2024). Surfactant-based chemical washing to remediate oil-contaminated soil: the state of knowledge. *Toxics*, 12(9), 648. <https://doi.org/10.3390/toxics1209064835>
117. Zhong, L., Wu, J., Wen, Y., Yang, B., Grifoll, M., Hu, Y., & Zheng, P. (2023). Analysis of factors affecting the effectiveness of oil spill clean-up: a bayesian network approach. *Sustainability*, 15, 4965. <https://doi.org/10.3390/su150649655>
118. Zhou, X., Zhang, Z., Xu, X., Guo, F., Zhu, X., Men, X., & Ge, B. (2013). Robust and durable superhydrophobic cotton fabrics for oil/water separation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(15), 7208–7214. <https://doi.org/10.1021/am401534641>
119. Zodiatis, G., Coppini, G., Perivoliotis, L., Lardner, R., Alves, T., Pinardi, N., Liubartseva, S., De Dominicis, M., Bourma, E., & Sepp Neves, A. A. (2017). Numerical modeling of oil pollution in the Eastern Mediterranean Sea. In A. Carpenter & A. G. Kostianoy (Eds.), *Oil pollution in the Mediterranean Sea: Part I: The international context* (The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 83, pp. 215–254). Springer. <https://doi.org/10.1007/6982017131>

Мұнай төгінділерін тазалауға арналған жетілдірілген сорбенттер: материалдар, әдістер және болашақ перспективалар

Нұрбатыр Мұхаметғазы, Несіпхан Бектенов, Жазира Мукатаева, Меруерт Сулейменова, Клара Сарсекова

Аңдатпа. Мұнай төгінділері қоршаған орта үшін үлкен мәселе болып табылады. Олар жануарларға, өсімдіктерге және тіпті экономикаға зиян келтіреді. Мұхитта мұнай өндіруге қызығушылық артқан сайын, апаттардың орын алу қаупі де жоғарылайды. Сондықтан төгілген мұнайды тез әрі тиімді тазарту әдістерін табу қажет. Осындай әдістердің бірі – мұнайды сіңіре алатын арнайы материалдарды пайдалану. Бұл материалдар қолдануға оңай, көп мөлшерде мұнайды сіңіре алады және салыстырмалы түрде арзан. Сонымен қатар, олар әртүрлі орта жағдайларында тиімді жұмыс істейді. Мақалада мұндай арнайы материалдарды – мұнай сорбенттерін әзірлеу саласындағы жетістіктер қарастырылады. Онда материалдардың түрлері, оларды дайындау тәсілдері және олардың тиімділігі сипатталады. Бұл материалдардың кейбірі табиғи болса, басқалары жасанды жолмен өндіріледі. Олардың қасиеттерін жақсарту үшін ғалымдар әртүрлі әдістерді қолданады, мысалы, беттік қасиеттерін өзгерту немесе өлшемдерін кішірейту. Қуантатыны, мұндай жетілдірілген материалдар судан мұнайды өте тиімді түрде жоя алады. Дегенмен, оларды одан әрі жетілдіру үшін қосымша зерттеулер қажет. Бұл әртүрлі компоненттерден тұратын гибриді материалдарды жасау, экологиялық таза өндіру әдістерін

табу және олардың ұзақ қызмет етуін қамтамасыз ету сияқты бағыттарды қамтиды. Мұнай төгінділерін экологиялық тұрғыдан қауіпсіз әрі тиімді тазалайтын материалдарды әзірлеу аса маңызды. Қоршаған ортаны қорғау үшін бұл бағыттағы зерттеулерді жалғастыру қажет.

Түйін сөздер: мұнай төгінділерін жою; мұнай сорбенттері; табиғи және синтетикалық сорбенттер; гибриді сорбенттік материалдар; тұрақты тазарту технологиялары; мұнай-су эмульсиялары.

Современные сорбенты для ликвидации разливов нефти: материалы, методы и перспективы развития

Нұрбатыр Мұхаметғазы, Несіпхан Бектенов, Жазира Мукатаева, Меруерт Сулейменова, Клара Сарсекова

Аннотация. Разливы нефти представляют собой серьёзную проблему для окружающей среды. Они наносят вред животным, растениям и даже экономике. По мере роста интереса к добыче нефти в океане увеличивается риск возникновения аварий. Поэтому необходимо находить способы быстрого и эффективного устранения разливов нефти. Одним из таких способов является использование специальных материалов, способных поглощать нефть. Эти материалы просты в применении, способны поглощать большие объёмы нефти и являются относительно недорогими. Кроме того, они эффективно работают в различных условиях окружающей среды. В данной статье рассматриваются достижения в области разработки таких специальных материалов, нефтяных сорбентов. Описываются типы материалов, способы их получения и их эффективность. Некоторые из этих материалов имеют природное происхождение, другие создаются искусственно. Для улучшения их свойств учёные применяют различные методы, например, изменение поверхностных характеристик или уменьшение размеров. Радует то, что такие усовершенствованные материалы способны очень эффективно удалять нефть из воды. Однако для их дальнейшего совершенствования необходимы дополнительные исследования. Это включает создание гибридных материалов, состоящих из различных компонентов, поиск экологически безопасных способов их производства и обеспечение их долговечности. Разработка материалов, способных эффективно и экологически безопасно очищать разливы нефти, имеет важное значение. Для защиты окружающей среды необходимо продолжать исследования в данном направлении.

Ключевые слова: ликвидация разливов нефти; нефтяные сорбенты; природные и синтетические сорбенты; гибридные сорбентные материалы; устойчивые технологии очистки; нефтеводные эмульсии.

Анализ эффективности применения холодного пластика для горизонтальной дорожной разметки

Лязат Толымбекова, Нурия Успанова, Гайни Сейтенова*

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан; tolymbekova_lb@enu.kz;

nuriya.uspanova@gmail.com

*Корреспонденция: seitenova_gzh@enu.kz

Аннотация. В условиях роста автотранспортного потока и повышения требований к безопасности дорожного движения возрастает значимость качественной и долговечной горизонтальной дорожной разметки. В статье рассматриваются физико-химические свойства и эксплуатационные характеристики холодного пластика на основе метилметакрилата (ММА), применяемого для устройства дорожной разметки. Проведён анализ отечественных и международных нормативных требований (СТ РК 1124–2019, ГОСТ 32952), а также сравнительная оценка холодного пластика с традиционными материалами - лакокрасочными покрытиями и термопластиками. Установлено, что холодный пластик обладает высокой износостойкостью, устойчивостью к химическим реагентам, ультрафиолету и абразивным нагрузкам, что обеспечивает срок его службы до 5 лет. Дополнительно рассматривается влияние дорожной инфраструктуры на аварийность и подчеркивается роль дорожной разметки как одного из факторов, снижающих риск дорожно-транспортных происшествий. Представлены статистические данные по уровню ДТП в Республике Казахстан, выявлены ключевые проблемы в области нанесения дорожной разметки. В статье описана технология нанесения холодного пластика и даны рекомендации по его применению в целях повышения безопасности и экологической устойчивости дорожной инфраструктуры.

Цитирование: Толымбекова, Л., Успанова, Н., Сейтенова, Г. (2026). Анализ эффективности применения холодного пластика для горизонтальной дорожной разметки. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия Химия. География. 156(3), 92-112. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-92-112>

Академический редактор:
С.С. Досмагамбетова

Поступила: 19.03.2026
Исправлена: 23.02.2026
Принята: 29.09.2026
Опубликована: 30.09.2026



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: холодный пластик; дорожная разметка; метилметакрилат (ММА); безопасность дорожного движения; износостойкость; нормативные требования; дорожно-транспортное происшествие (ДТП); дорожная инфраструктура.

1. Введение

Современное развитие транспортной инфраструктуры сопровождается возрастанием требований к обеспечению дорожной безопасности, что делает особенно актуальным вопрос выбора надёжных и долговечных материалов для организации дорожного движения.

Одной из значимых социальных и экономических проблем остаются дорожно-транспортные происшествия (ДТП), последствия

которых включают как человеческие жертвы, так и значительные финансовые потери (Chand et al., 2021). В научной и прикладной литературе причины возникновения ДТП подразделяются на временные, средовые и управленческие факторы (Van et al., 2023), при этом к числу ключевых факторов, способствующих снижению риска аварий, относится эффективная система визуальной навигации, в том числе дорожная разметка (Abdunazarov et al., 2023). В статье дорожная разметка рассматривается как элемент системы организации дорожного движения, при этом основное внимание уделяется горизонтальной дорожной разметке, выполненной с применением холодного пластика.

Горизонтальная дорожная разметка, являясь элементом пассивной безопасности, выполняет важную функцию в регулировании транспортных потоков, обеспечении читаемости маршрутов и повышении уровня дисциплины участников дорожного движения. Она визуально разделяет полосы, предупреждает о зонах повышенного риска и способствует соблюдению правил (Wang et al., 2023).

Качественная и долговечная дорожная разметка особенно важна в условиях интенсивной эксплуатации дорог, неблагоприятного климата и сезонной нагрузки, характерных для многих регионов Казахстана (Teltaev et al., 2022).

На фоне технологического прогресса и перехода к материалам нового поколения, особое внимание уделяется холодному пластику - двух- или трёхкомпонентному композиционному материалу на основе метилметакрилата (ММА), отверждающемуся в результате химической реакции при обычных температурах (Yuan et al., 2023). Благодаря своим физико-химическим свойствам - высокой адгезии к минеральным и асфальтобетонным основаниям, стойкости к ультрафиолетовому излучению, абразивному износу, солевым реагентам и влаге - данный тип покрытия демонстрирует улучшенные эксплуатационные характеристики по сравнению с традиционными лакокрасочными и термопластичными составами (Naidu et al., 2020).

Применение холодного пластика не требует предварительного нагрева, что способствует сокращению энергозатрат и снижению риска производственного травматизма при нанесении (Nadizadeh et al., 2020). Дополнительным преимуществом является возможность интеграции в состав отражающих элементов - стеклянных микросфер и структурных компонентов, обеспечивающих отличную видимость дорожной разметки как в дневное, так и в ночное время, при любых погодных условиях (Mazzoni et al., 2024). При правильной технологии нанесения и соблюдении эксплуатационных требований срок службы дорожной разметки на основе холодного пластика может достигать 3–5 лет, что в несколько раз превышает долговечность лакокрасочных материалов (Kassem et al., 2021).

Актуальность темы обусловлена необходимостью исследования свойств холодного пластика для дорожной разметки. Выбор эффективных материалов для дорожной разметки представляет собой стратегически важную задачу в условиях модернизации транспортной системы (Milachowski et al., 2020). Применение покрытий с улучшенными характеристиками позволяет не только повысить безопасность дорожного движения, но и сократить частоту обновления дорожной разметки, снизить расходы на обслуживание и минимизировать экологическую нагрузку. В этих условиях холодный пластик выступает как инновационное решение, способное заменить традиционные материалы и обеспечить устойчивый эффект в долгосрочной перспективе (CARO, 2023).

Цель исследования – комплексное изучение физико-химических и эксплуатационных свойств холодного пластика на основе метилметакрилата, применяемого для устройства горизонтальной дорожной разметки, а также анализ его технологических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с традиционными материалами, такими как термопластики и лакокрасочные композиции. Особое внимание уделяется нормативным аспектам, условиям применения, сроку службы и влиянию на безопасность дорожного движения.

2. Нормативные требования и практика применения материалов дорожной разметки

В условиях роста численности населения и увеличения потребности в транспортной мобильности вопросы обеспечения безопасности дорожного движения приобретают особую актуальность. Анализ современной практики показывает необходимость разработки и внедрения новых технических, организационных и правовых решений, направленных на повышение уровня комфорта и безопасности перемещения (Zhandarbekova et al., 2024).

Дорожно-транспортные происшествия формируют не только медико-социальные, но и существенные экономические потери: прямые расходы на лечение и реабилитацию, временная или стойкая утрата трудоспособности, снижение доходов домохозяйств и утрата человеческого капитала при летальных исходах. При этом рост автопарка и субурбанизация усиливают нагрузку на улично-дорожную сеть, повышают вероятность заторов и, как следствие, риск конфликтных ситуаций в потоке (Chand et al., 2021; Faheem et al., 2024). В объяснении причинности ДТП значимый вклад относится к поведенческим факторам водителей, что подчёркивает важность визуально-эргономичной, легко считываемой дорожной разметки как элемента, снижающего когнитивную нагрузку при вождении (Mohammed et al., 2025). Отдельные расчётные исследования допустимой скорости при различных плотностях потока демонстрируют академическую ценность, но при отсутствии учёта полного набора факторов риска (микроклимат, состояние покрытия, освещённость, читаемость дорожной разметки) их прикладная состоятельность ограничена (Abdunazarov et al., 2023). Экспериментальные наблюдения влияния дорожной разметки и знаков в ночное время показывают, что качественно выполненная горизонтальная дорожная разметка снижает вероятность аварийных событий, стабилизирует поведение водителя и уменьшает стресс за рулём (Babich et al., 2020).

Эмпирическую основу сопоставления материалов дополняют данные о реальной практике закупок. По информации портала «Государственные закупки Республики Казахстан» регулярно приобретается дорожная краска марки АК-511 (белая, жёлтая, красная, чёрная), применяемая для дорожной разметки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, взлётно-посадочных полос, терминалов, парковочных пространств и иных объектов транспортной инфраструктуры (Портал государственных закупок Республики Казахстан, 2025; ЭООО «Сибкраска», 2025). Согласно технической документации производителя, материал характеризуется быстрым высыханием, удовлетворительной стойкостью к истиранию и устойчивостью к климатическим и химическим воздействиям; одновременно для акриловой АК-511 типичен средний срок службы, не превышающий одного сезона эксплуатации при стандартной нагрузке (Zhang et al., 2023; Brusentseva et al., 2019).

Анализ статистических данных о дорожно-транспортных происшествиях в Республике Казахстан показывает устойчивую тенденцию к росту числа аварий. Существенная часть ДТП связана с ненадлежащим состоянием дорожной инфраструктуры, включая недостаточную видимость или полное отсутствие дорожной разметки. Это подчёркивает необходимость внедрения современных, долговечных и экологически безопасных материалов, таких как холодный пластик, способных повысить видимость и долговечность дорожной разметки, а следовательно - и уровень безопасности на дорогах (Bakishhev et al., 2021; Правительство Республики Казахстан, 2014; TRA conference, 2025).

Нормативная база определяет перечень допустимых материалов и целевые эксплуатационные показатели. В соответствии со СТ РК 1124–2019 для постоянной дорожной разметки применяются краски (эмали), термопластики и холодные пластики (по ГОСТ 32830), для временной - полимерные ленты. Минимальный срок службы составляет 3 месяца для лакокрасочных материалов и лент, а для холодного пластика – 6 месяцев. Износостойкость зависит от толщины слоя и предельного износа: до 25 % для пластиковых систем и до 50 % для эмалей и лент (Committee for Standardization RK, 2019). СТ РК 2066–2010 «Материалы для дорожной разметки» уточняет требования к физико-химическим свойствам (прочность, износостойкость, оптическая заметность) применяемых покрытий с учётом разнообразия эксплуатационных условий в РК (Committee for Standardization RK, 2010). Соответствие готовой дорожной разметки требованиям ГОСТ 32952 «Разметка дорожная» оценивается по

геометрическим параметрам, координатам цветности, коэффициентам яркости (горизонтальной и вертикальной), показателям долговечности и износа, а также функциональной стойкости во времени (ГОСТ 32952–2014, 2014).

При сравнении материалов необходимо учитывать характер действующих нагрузок. Лакокрасочные покрытия испытывают интенсивное механическое воздействие со стороны колёс, абразивное действие пыли и противогололёдных реагентов, деградацию под ультрафиолетом и при температурных циклах, а также загрязнение атмосферными осадками и техногенными частицами (Zhao et al., 2023). Эти факторы ускоряют потерю контрастности и ночной видимости, деградацию колориметрических характеристик, что обосновывает актуальность регламентов качества и периодического контроля оптических свойств дорожных красок и компаундов (Taheri, Jahanfar, & Ogino, 2017).

Ключевым компонентом оптической системы дорожной разметки являются светоотражающие стеклянные микросферы, обеспечивающие ретрорефлексию в тёмное время суток и при неблагоприятной погоде. Их применение должно сопровождаться полевыми испытаниями на соответствие целевым критериям безопасности и износостойкости, включая оценку индекса ретрорефлексии (RL) и коэффициента дневной яркости (Qd); дополнительно используются антискользящие добавки для сохранения требуемого уровня сцепления (Ahmadiev et al., 2019; Burghardt et al., 2021).

Измерение коэффициента световозвращения RL выполняется в полевых условиях с использованием портативных дорожных ретрорефлектометров геометрии 30 м, предназначенных для измерений на проезжей части и соответствующих требованиям стандартов EN 1436 и ASTM E1710. Определение коэффициента дневной яркости Qd осуществляется с применением люминансметров либо комбинированных приборов RL/Qd, обеспечивающих стандартную геометрию освещения и наблюдения. Перед началом измерений все применяемые приборы подвергались обязательной калибровке с использованием сертифицированных эталонных калибровочных пластин, рекомендованных изготовителем оборудования, в соответствии с требованиями действующей нормативной документации. Контрольные измерения выполнялись после нанесения дорожной разметки, а также в процессе её эксплуатации с заданной периодичностью, что обеспечивало возможность оценки изменения (деградации) оптических характеристик дорожной разметки во времени (Babić et al., 2024).

Европейский стандарт SIST EN 1423:2012 устанавливает требования к стеклянным микросферам: высокая сферичность, ограничение дефектов фракции ~ 1 мм, отсутствие тяжёлых металлов (сурьма, мышьяк, свинец), диапазон pH 5–11, химическая стойкость к воде и растворам: HCl, CaCl₂, Na₂S. Классификация ведётся по показателю преломления (класс A $n \geq 1,5$; класс B $n \geq 1,7$; класс C $n \geq 1,9$). Гранулометрический состав подбирается в зависимости от целевого назначения: более мелкие фракции увеличивают долговечность системы, более крупные - повышают начальную ретрорефлексию, но быстрее изнашиваются. Для непрозрачного противоскользящего заполнителя цвет должен соответствовать заданным координатам цветности (x, y) (EN 1423:2012, 2012).

Системные требования к горизонтальной дорожной разметке включают такие параметры, как долговечность, функциональность, технологичность нанесения и экологическую приемлемость на всех этапах жизненного цикла. Горизонтальная дорожная разметка подразделяется на постоянную и временную. Водоразбавляемые краски преимущественно предназначены для временных задач, тогда как постоянное покрытие традиционно выполняется на основе растворителей либо полимерных систем. Внедрение холодного пластика как связующего звена технологичности и экологичности позволяет одновременно повысить структурную прочность и долговечность покрытия, сократить частоту обновлений и снизить риски, связанные с использованием классических органических растворителей, без ущерба для оптических характеристик и безопасности движения (Babić et al., 2015).

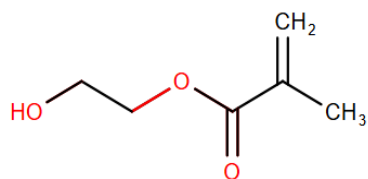
3. Результаты обзора литературы

3.1. Анализ современных решений и их сравнительная характеристика

Холодный пластик для горизонтальной дорожной разметки представляет собой двухкомпонентную систему на основе метилметакрилата (ММА) с инициатором отверждения (как правило, пероксид бензоила). По сравнению с термопластичными материалами ММА-системы характеризуются быстрым отверждением (быстрым набором прочности), длительным сроком службы, высокой износостойкостью, атмосферостойкостью, высокими противоскользящими свойствами и низкой склонностью к загрязнению поверхности. Показано, что целевая оптимизация рецептуры и режимов нанесения холодного пластика позволяет дополнительно улучшать эксплуатационные показатели покрытия при сохранении технологичности процесса (Hadizadeh, Pazokifard, Mirabedini, 2020).

Материалы лакокрасочной группы для постоянной горизонтальной дорожной разметки должны удовлетворять повышенным требованиям экологической и операционной безопасности. Акриловые связующие характеризуются универсальностью применения за счёт выраженной плёнообразующей способности, развитой адгезии к минеральным основаниям, коллоидной и цветовой стабильности, обратимости плёнообразования и отсутствия длительного пожелтения (Taheri, Jahanfar, Ogino, 2017). Экспериментальные исследования подтверждают, что краски на основе акриловых полимеров обеспечивают удовлетворительную износостойкость при абразивном воздействии колёс и сохраняют высокие адгезионные характеристики к асфальтобетону при переменном увлажнении и температурном циклировании (Bi Y et al., 2021). Широкая практика применения акриловых систем связана также с их колориметрической стабильностью, прозрачностью и устойчивостью к воздействию климатических факторов. Акриловые смолы представляют собой сополимеры (мет)акрилатных эфиров, получаемые радикальной полимеризацией с участием основы и отвердителя (Friel & Nungesser, 1995).

В качестве иллюстрации мономерного фрагмента акрилатного ряда на уравнении 1 приведена структура 2-гидроксиметилметакрилата (2-hydroxymethyl methacrylate), используемого для модификации свойств полимерной матрицы и формирования требуемого баланса жёсткости/вязкости плёнки при отверждении (Lim W. et al., 2023).



В Республике Казахстан требования к материалам дорожной разметки и результатам их применения регламентированы, в частности, СТ РК 1124–2019 и сопряжёнными стандартами (а также ГОСТ 32830 для пластиковых систем). Ниже представлены таблицы 1, 2, 3 и 4, в которых приведены ключевые показатели холодного пластика, подлежащие контролю при приёмке и эксплуатации.

Таблица 1. Координаты цветности высушенной плёнки холодного пластика (границы четырёхугольника цветовой области)

Цвет	Обозначение координат цветности	Координаты угловых точек с 1-й по 4-ю цветовую область дорожной разметки			
		1	2	3	4

Белый	X	0,355	0,305	0,285	0,335
	У	0,355	0,305	0,325	0,375
Желтый	X	0,443	0,545	0,465	0,389
	У	0,399	0,455	0,535	0,431
Оранжевый	X	0,506	0,570	0,610	0,585
	У	0,404	0,429	0,390	0,375

Таблица 2. Коэффициент яркости b (%) высушенной плёнки холодного пластика

Цвет	Класс разметочного материала	Коэффициент яркости b , %
Белый	B6	70-79
	B7	Более 80
Желтый	B3	40-49
	B4	50-59
Оранжевый	B2	30-39
	B3	40-49

Таблица 3. Плотность отвердевших холодных пластиков

Класс разметочного материала	Плотность, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ПП1	Более 2,1
ПП2	От 1,9-2,1
ПП3	Менее 1,9

Таблица 4. Время отверждения холодных пластиков

Класс разметочного материала	Время отверждения в минутах
BT1	От 10-20
BT2	От 5-9
BT3	Менее 5

Представленные нормируемые показатели обеспечивают требуемую читаемость горизонтальной дорожной разметки днём и ночью (через контроль координат цветности и коэффициента яркости), механическую и химическую стойкость (плотность, устойчивость к электролитам и щёлочам), а также минимизацию времени ограничения движения при ремонтах (классы отверждения BT1-BT3). С практической точки зрения это означает, что холодный пластик, при корректном подборе класса по яркости и времени отверждения и соблюдении технологии нанесения, способен поддерживать устойчивые оптические и фрикционные свойства в широком диапазоне климатических условий Казахстана.

3.2. Статистика дорожно-транспортных происшествий

На частоту и тяжесть дорожно-транспортных происшествий влияет совокупность факторов - психофизиологическое состояние водителя, погодные условия и геометрические параметры дороги. Современный подход к снижению аварийности опирается на интеграцию статистики ДТП, телеметрии с датчиков и видеорегистраторов, данных социальных сетей и

алгоритмов искусственного интеллекта для оперативного выявления очагов риска (Robles-Serrano et al., 2021). В Казахстане внедрена интеллектуальная транспортная система (ITS), обеспечивающая автоматизированное управление потоками, фиксацию нарушений, распознавание регистрационных знаков и мониторинг общественного транспорта (включая контроль расписаний, автоматизацию оплаты, повышение безопасности и экологичности перевозок) (Агтила, 2024). При этом меры профилактики традиционно фокусируются на человеческом факторе и техническом состоянии транспортного средства, а влияние состояния покрытия и читаемости горизонтальной дорожной разметки учитывается неполно: хотя «карточка учёта ДТП» содержит графы, относящиеся к дорожной инфраструктуре, на практике инфраструктурные причины часто интерпретируются как второстепенные (Генеральная прокуратура РК, 2015).

Научные обзоры показывают, что качество и видимость дорожных разметок существенно влияют на поведение водителей и безопасность движения. Систематический анализ более чем 50 рецензируемых исследований подчеркивает связь между видимостью разметки и снижением аварийности (Babić et al., 2020). Исследования по анализу факторов риска ДТП, также отмечают, что характеристики дорожной инфраструктуры, включая элементы разметки, являются предикторами опасных ситуаций в городской среде (Petrov, 2024). Помимо этого, экспериментальные данные указывают на влияние видимости элементов разметки на когнитивную нагрузку водителя, что может косвенно отражаться на частоте ДТП (Fiočić, 2023). Официальные статистические данные Республики Казахстан также свидетельствуют о необходимости повышения качества дорожной инфраструктуры и обеспечения соответствия элементов разметки действующим нормативным требованиям, что является важным условием повышения безопасности дорожного движения (Biuro natsional'noi statistiki RK, 2023).

Данные зарубежных исследований согласуются с этим выводом: например, анализ в Иране показал, что эффективность дорожной разметки зависит от класса дороги и условий видимости; туман и дым до восхода солнца резко ухудшают считываемость, а истирание покрытия статистически связано с ростом аварийности. В таблице 5 представлены данные исследования влияния факторов на частоту и тяжесть дорожно-транспортных происшествий (Sadeghi & Goli, 2024).

Таблица 5. Влияние факторов на частоту и тяжесть ДТП

Группа факторов	Фактор	Влияние на частоту ДТП	Влияние на тяжесть ДТП	Примечание
Состояние дорожного покрытия	Коэффициент сцепления и микрошероховатость	Увеличение	Увеличение	Наиболее выражено в ночное время и при осадках
Состояние дорожного покрытия	Колейность покрытия	Существенное увеличение	Значительное увеличение	Особенно характерно для скоростных дорог
Класс дороги	Высокоскоростные дороги	Не выявлено	Увеличение	Усиление кинетической энергии столкновений
Класс дороги	Низкоскоростные дороги	Увеличение	Увеличение	Изменение структуры аварий
Геометрия проезжей части	Двухполосные дороги	Увеличение	Увеличение	Повышенная чувствительность

				к дефектам покрытия
Геометрия проезжей части	Многополосные дороги	Снижение	Снижение	Более равномерное распределение транспортных потоков
Погодные условия	Атмосферные осадки	Линейное увеличение	Переменное	Зависит от интенсивности и продолжительност и
Погодные условия	Туман и дым	Существенно е увеличение	Существенно е увеличение	Особенно до восхода солнца
Демографически е факторы	Молодые водители	Не выявлено	Увеличение	Связано с рискованным стилем вождения
Демографически е факторы	Пожилые водители	Не выявлено	Значительное увеличение	Ограничения реакции и физиологии
Демографически е факторы	Женщины	Не выявлено	Увеличение	Более высокая тяжесть последствий
Прочие факторы	Наличие билбордов	Увеличение	Не выявлено	Отвлечение внимания водителей
Прочие факторы	Загрязнение атмосферного воздуха	Увеличение	Не выявлено	Снижение контрастности и видимости

В совокупности это аргументирует целесообразность приоритетного применения холодного пластика на участках с высокой интенсивностью движения и в зонах повышенной аварийности. Стабильность оптических характеристик (в том числе при дождевом намокании и в ночных условиях), высокая износостойкость и ускоренное отверждение позволяют снижать суммарные эксплуатационные издержки за счёт реже проводимых обновлений и меньших «окон» для перекрытия движения, одновременно повышая безопасность за счёт устойчивой читаемости горизонтальной дорожной разметки в течение всего межремонтного периода.

На рисунке 1 приведены данные ресурса World Population Review по странам с наибольшим абсолютным количеством ДТП: лидируют США, что коррелирует с масштабом автопарка и объёмом транспортного спроса. Казахстан занимает 20-е место - 16 614 ДТП в 2024 г. (World Population Review, 2025). Следует учитывать, что методики статистического учёта различаются по странам (критерии регистрации, полнота охвата и т. п.), тем не менее данный массив данных задаёт сравнимый фон для оценки роли инфраструктурных мероприятий, в том числе качества и долговечности горизонтальной дорожной разметки.

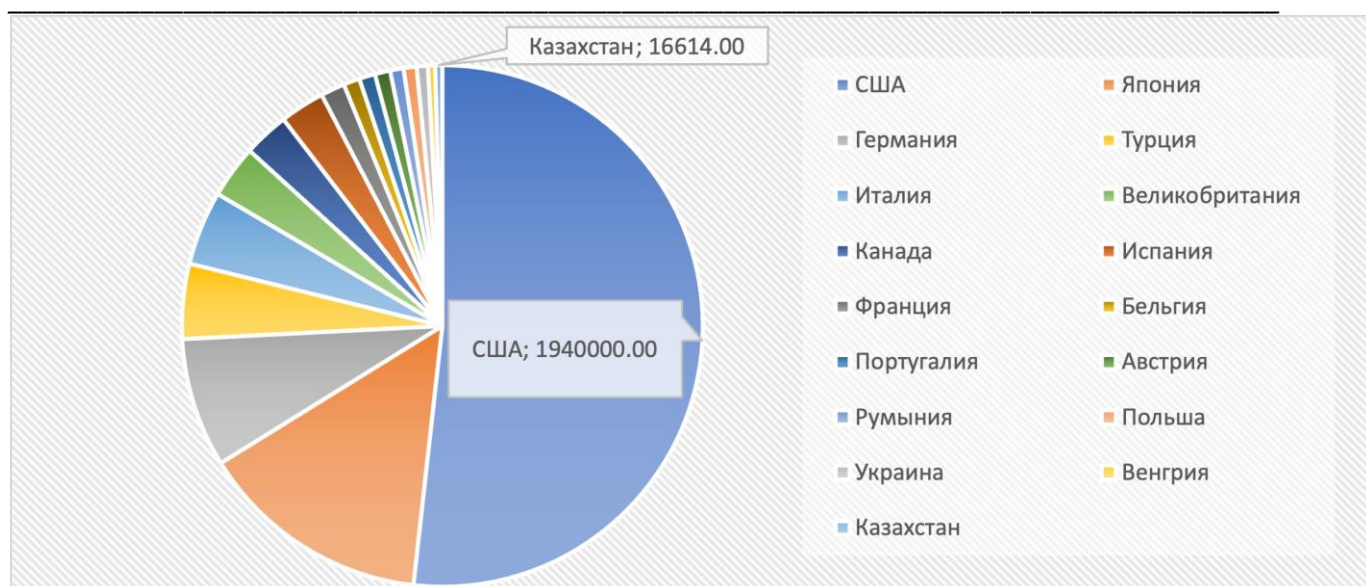


Рисунок 1. Топ-20 стран по количеству аварий (по данным World Population Review)

На рисунке 2 представлена ежегодная динамика по ряду европейских стран, рассчитанная в пересчёте на 1 млн населения. Из графиков видно, что рост транспортного потребления (включая автомобилизацию и пробеги) влечёт увеличение ДТП, как правило, не выше $\approx 15\%$, однако в ряде государств - Польше, Чехии, Италии и некоторых соседних странах - наблюдается снижение показателей (Statista, 2023). Выбор временного интервала анализа (2020–2021 гг.) обусловлен ограниченной доступностью сопоставимых статистических данных по странам Европы в открытых официальных источниках за более продолжительный период. Это снижение связывают с комплексной политикой безопасности дорожного движения: совершенствованием инженерных решений (включая долговечные материалы дорожной разметки с устойчивыми оптическими свойствами), оптимизацией организации движения, усилением контроля и адресными программами по уязвимым участкам сети. Важна и сопоставимость метрик: переход к нормированию «на 1 млн населения» позволяет нивелировать эффект масштаба и точнее проследить вклад инфраструктурных мер - в частности, применения износостойких систем на основе холодного пластика, обеспечивающих стабильную ретрорефлексию в ночное время и при намокании.

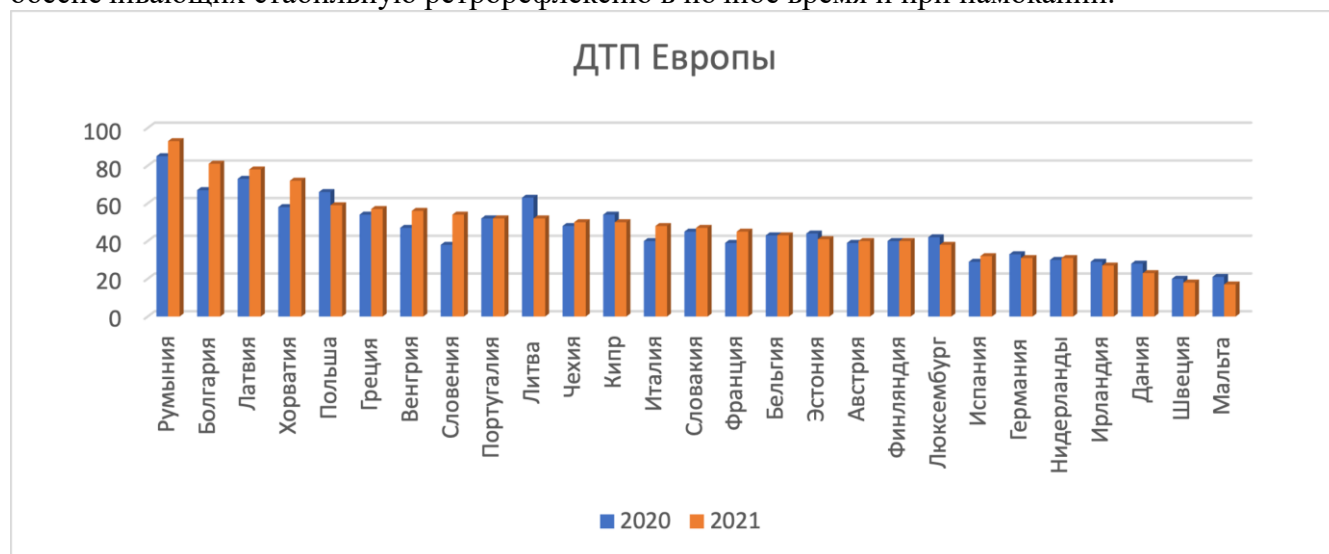


Рисунок 2. Динамика ДТП в странах Европы (случаев на 1 млн населения, 2020–2021 гг.)

На рисунке 3 представлены обновлённые данные правовой статистики по Казахстану: за 6 месяцев 2025 г. зарегистрировано 15698 ДТП, что на 54,0 % выше уровня аналогичного периода 2024 г. (10 191). Число пострадавших выросло на 62,7 % - до 22346 человек против 13738 годом ранее. Выбор данного временного интервала обусловлен использованием наиболее актуальных и сопоставимых данных официальной открытой статистики за последние отчётные периоды. Наибольшая концентрация пострадавших фиксируется в г. Алматы, Алматинской, Жамбылской, Актюбинской и Атырауской областях. Длинный ряд (2015–2024 гг.) демонстрирует рост числа пострадавших (раненых и погибших), что подчёркивает необходимость системных мер именно на стороне инфраструктуры, включая повышение долговечности и видимости горизонтальной дорожной разметки (Комитет по правовой статистике и специальным учётам при Генеральной прокуратуре РК, 2025). Для инженерной практики это означает приоритизацию материалов с длительным межремонтным циклом, высокой устойчивостью к истиранию и сохранением параметров RL (ретрорефлексия) и Qd (дневная яркость) в течение всего срока службы.

Анализ состояния безопасности дорожного движения в Республике Казахстан показывает, что официальная статистика ДТП публикуется компетентными органами и отражает динамику аварийности по годам (Ibrayev et al., 2019). Согласно данным исследования, аварийность на магистральных дорогах Казахстана в последние годы стабилизировалась на уровне около 9,85 ДТП на 100 км сети, а число тяжёлых аварий остаётся значительным, что подчёркивает необходимость комплексных мер по повышению безопасности инфраструктуры (Ikromov et al., 2023). Ведомственные материалы указывают, что своевременное обновление горизонтальной дорожной разметки относится к наиболее эффективным и относительно малозатратным мерам, обеспечивающим комплексное снижение количества ДТП за счёт улучшения визуального ориентирования и дисциплины потока (Elete et al., 2024). В этих условиях холодный пластик (ММА-системы) выступает предпочтительным материалом для участков с интенсивным движением и повышенной аварийностью, поскольку сочетает быстрое отверждение, устойчивую ретрорефлексию при намокании, высокую износостойкость и редкую потребность в обновлении по сравнению с традиционными лакокрасочными покрытиями.



Рисунок 3. Казахстан: число погибших и раненых в ДТП (2015–2024 гг.; оперативная динамика за I полугодие 2025 г.)

3.3. Технологические аспекты

Методика полевого нанесения холодного пластика технологически проста и воспроизводима. На подготовленное покрытие (асфальтобетон/цементобетон) наносится смоляная композиция на основе акрилатных мономеров и олигомеров (ММА), после чего добавляется инициатор (типично - пероксидная система), запускающий радикальную полимеризацию *in situ*. Низкая вязкость состава обеспечивает капиллярное проникновение в микротрещины и поры, что повышает механическую адгезию; химически обработанные стеклянные микросферы (включая праймеры на основе силановых/метакрилатных групп) формируют устойчивое механохимическое закрепление и стабильную ретрорефлексию. Подбор пигментов, минеральных наполнителей и функциональных добавок (регуляторов реологии, стабилизаторов, антискользящих гранулятов) позволяет оптимизировать рецептуру под целевые классы по яркости (B2–B7), времени отверждения (BT1–BT3) и долговечности. В результате достигаются как долговечность и стабильность оптических параметров, так и экологическая приемлемость решения за счёт сокращения частоты ремонтных работ и уменьшения совокупных выбросов и отходов на протяжении жизненного цикла горизонтальной дорожной разметки (Burghardt, Babić, & Pashkevich, 2021).

4. Обсуждение

4.1. Сравнение холодного пластика и термопластичного материала для дорожной разметки

Наиболее распространёнными материалами для горизонтальной дорожной разметки дорог являются холодный пластик на основе метилметакрилата (ММА) и термопластичный материал (горячего нанесения) (Xu et al., 2021).

4.1.1. Природа материала и механизм формирования покрытия

Холодный пластик представляет собой химически отверждаемую систему, в которой после смешения смолы и отвердителя происходит радикальная полимеризация с формированием трёхмерной сшитой матрицы. В результате сформированное покрытие характеризуется высокой когезионной прочностью и стабильной микроструктурой. Термопласт относится к физически отверждаемым материалам и наносится в расплавленном состоянии, набирая прочность по мере охлаждения и кристаллизации. Таким образом, для ММА критичными факторами являются корректная дозировка отвердителя и контроль «времени жизни» смеси, тогда как для термопласта ключевую роль играют температурные режимы плавления, вязкость материала и скорость охлаждения (Sadid et al., 2010).

4.1.2. Технологичность и условия нанесения

Холодный пластик наносится при положительных температурах воздуха, как правило, от 5 °С, без применения котлов разогрева, что позволяет продлить строительный сезон и выполнять локальные ремонты при пониженных температурах. Ограничением данного материала является ограниченное «время жизни» смеси, требующее строгого соблюдения дозирования и оперативной укладки. Термопласт обеспечивает высокую производительность на протяжённых участках дорожной разметки благодаря механизированной укладке при температуре 180–220 °С и минимальным задержкам на остывание. Вместе с тем его применение требует наличия специализированной техники, строгого температурного контроля и сухого основания. В обоих случаях качество посадки стеклянных микросфер и равномерность толщины слоя определяют исходные значения ретрорефлекторности и дневной видимости (Xu et al., 2021; Sadid et al., 2010).

4.1.3. Функциональные показатели: видимость и сцепление

Сшитая матрица ММА эффективно фиксирует стеклянные микросферы, благодаря чему ретрорефлекторность и дневная видимость сохраняются стабильными даже при частичном износе поверхности. ММА-составы позволяют формировать агломератные и рифлёные профили, что улучшает видимость в условиях мокрой ночи и повышает тактильно-звуковую воспринимаемость горизонтальной дорожной разметки (Tajnin et al., 2023; Babić et al., 2024).

Термопласт характеризуется высокими стартовыми значениями ретрорефлекторности при соблюдении температурных режимов, однако чувствителен к глубине посадки стеклянных микросфер и при интенсивном абразивном воздействии подвержен их ускоренной потере, что приводит к снижению значений ретрорефлекторности. По показателям сцепления оба материала достигают нормативных значений, при этом для ММА проще дозировать минеральный наполнитель и формировать шероховатую поверхность, обеспечивая высокий коэффициент сцепления на пешеходных переходах и стоп-линиях (Xu et al., 2021; Tajnin et al., 2023; Bao et al., 2025).

4.1.4. Долговечность и износостойкость

На участках с высоким сдвиговым воздействием, таких как зоны разгона и торможения, повороты и автобусные карманы, холодный пластик демонстрирует более низкую скорость износа за счёт сопротивления сшитой матрицы пластической деформации. В этих условиях ММА-покрытия лучше сохраняют рельеф дорожной разметки, менее подвержены срыву стеклянных микросфер и снижению высоты профиля при работе снегоочистителей (Tajnin et al., 2023).

Термопласт остаётся стабильным на протяжённых прямолинейных участках, однако в жарком климате может проявлять ползучесть и смятие, а при низких температурах — повышенную хрупкость, что ускоряет деградацию покрытия в зонах интенсивных манёвров (Sadid et al., 2010; Babić et al., 2024).

4.1.5. Климатическая устойчивость

Холодный пластик работоспособен в широком диапазоне температур эксплуатации и допускает нанесение при более низких температурах основания, что особенно важно для регионов с коротким строительным сезоном (Tajnin et al., 2023). Сшитая структура покрытия также обеспечивает устойчивость к воздействию нефтепродуктов и противогололёдных реагентов. Термопласт более чувствителен к экстремально высоким и низким температурам, поскольку механические свойства покрытия определяются реологией термопластичной матрицы. В связи с этим при проектировании дорожной разметки требуется подбор рецептуры с учётом ожидаемых климатических условий и дорожных нагрузок (Sadid et al., 2010; Xu et al., 2021).

4.1.6. Ремонтопригодность и эксплуатация

Холодный пластик удобен для локального ремонта, так как свежий материал хорошо связывается с ранее нанесённым слоем без необходимости разогрева оборудования. Это позволяет сократить простои и оперативно восстанавливать горизонтальную дорожную разметку на участках повышенной опасности, таких как пешеходные переходы и стоп-линии (NASEM, 2016).

Термопласт более эффективен при масштабных линейных ремонтах с применением высокопроизводительной техники и значительных объёмов работ. Однако локальные ремонтные операции при низких температурах и повышенной влажности требуют дополнительных технологических решений (Xu et al., 2021; Sadid et al., 2010).

4.1.7. Экономика жизненного цикла

На протяжённых участках сплошной дорожной разметки термопласт выигрывает по стоимости за счёт высокой скорости укладки и меньших трудозатрат. Холодный пластик характеризуется более высокой стоимостью за погонный метр, однако на участках интенсивного износа часто оказывается экономически целесообразнее благодаря увеличенной межремонтной долговечности, стабильной ретрорефлекторности и снижению частоты ремонтных вмешательств. При выборе системы дорожной разметки следует учитывать не только закупочную стоимость материалов, но и совокупные издержки жизненного цикла, включая интервалы обслуживания, продолжительность закрытия движения, а также требования к технике и персоналу (Qiao et al., 2023; Tajnin et al., 2023; Xu et al., 2021).

4.1.8. Ограничения и характерные риски

Для холодного пластика на основе ММА характерны чувствительность к дозировке отвердителя, зависимость качества покрытия от влажности основания, повышенные требования к безопасности при работе с пероксидами и выраженный запах мономера (Zhang et al., 2011). Для термопласта ключевые риски связаны с перегревом материала, нарушением температурных режимов нанесения и безопасностью горячих работ. В условиях жаркого климата или при интенсивных поперечных нагрузках возможны пластические деформации покрытия. В обоих случаях итоговое качество горизонтальной дорожной разметки существенно зависит от подготовки основания, равномерности толщины слоя и корректной посадки стеклянных микросфер (Sadid et al., 2010; Yellow thermoplastic road markings, 2021).

Сравнительные характеристики холодного пластика и термопластичного материала представлены в таблице 6.

Таблица 6. Сравнение холодного пластика и термопластичного материала

Основные аспекты	Холодный пластик	Термопластичный материал
Состав материала	Двухкомпонентный полимер, отверждаемый химическим путем	Терморазмягчающий полимер, расплавленный перед использованием
Температура применения	Температура окружающей среды (от -5 °C до 40 °C)	Необходим нагрев до 160 °C –200 °C
Время отверждения	10–20 минут	Охлаждение после нанесения
Способ применения	Смешивание химикатов и ручное/машинное распыление	Нагреваемая плавильная и экструзионная машина
Адгезия к основанию	Химическое склеивание с асфальтом/бетоном	Физическая адгезия за счет нагрева
Долговечность и износостойкость	Высокая эластичность, устойчивость к растрескиванию и истиранию	Высокая стойкость к истиранию, но мягче при высоких температурах
Отражательная способность	Высокий, украшенный стеклянными бусинами	Стандартный со стеклянными бусинами
Воздействие на окружающую среду	Низкое содержание летучих органических соединений, энергоэффективность (без отопления)	Более высокое энергопотребление из-за нагрева
Условия эксплуатации	Может применяться в более широком диапазоне температур	Требуется теплая, сухая погода
Ремонт и техническое обслуживание	Простой локальный ремонт без снятия всего слоя	Требуется снятие или повторного нагрева для ремонта
Толщина слоя нанесения	1,5-3,0 мм	1,5-4,0 мм
Стоимость	Более высокая стоимость материалов, но потенциально более низкая стоимость жизненного цикла благодаря долговечности	Более низкие первоначальные затраты, но более высокие затраты на электроэнергию

С позиции безопасности дорожного движения и устойчивости показателей во времени холодный пластик обладает выраженными преимуществами на перекрёстках, пешеходных переходах, стоп-линиях, островках безопасности, в зонах интенсивного торможения и на участках, подверженных снегоочистке и действию реагентов (Xu et al., 2021; Dwyer et al., 2020; Tajnin et al., 2023). Его сшитая структура обеспечивает лучшее удержание текстуры и стеклянных микросфер, а технологичность при низких температурах расширяет окно работ (Бао et al., 2025). Термопласт остаётся рациональным выбором для длинных продольных линий при умеренных нагрузках и жёстких ограничениях по стоимости на километр, где критична высокая скорость укладки (Qiao et al., 2023; Но et al., 2021). В комплексных проектах наилучший результат чаще достигается комбинированием: ММА – на узлах повышенного износа и мокрой ночи, термопласт – на протяжённых участках с контролем толщины и качества посадки стеклянных микросфер (Tajnin et al., 2023; Qiao et al., 2023).

4.2. Применение холодного пластика в Казахстане

В Республике Казахстан двухкомпонентные ММА-системы (холодный пластик) поэтапно вводятся в эксплуатацию как базовое решение для долговечной горизонтальной дорожной разметки на улично-дорожной сети. Практика их применения концентрируется в крупных агломерациях и на участках с повышенной интенсивностью движения, где требуются длительный межремонтный интервал, стабильная читаемость и устойчивость к абразивному износу. По типологии задач холодный пластик применяется для продольной дорожной разметки (осевая, краевая, направляющая) и поперечных элементов (пешеходные переходы, стоп-линии), с приоритетом зон повышенного риска ДТП – вблизи образовательных учреждений, остановок общественного транспорта, на сложных перекрёстках и участках концентрации пешеходного трафика. Полевые условия Казахстана (континентальный климат, значительные суточные и сезонные перепады температур, воздействие реагентов и снежно-плужных работ) предъявляют завышенные требования к механической и оптической стойкости покрытия, что и определяет выбор материала.

В условиях интенсивной эксплуатации сохранение коэффициента дневной яркости Q_d на уровне 100–160 $\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ и устойчивость к истиранию до 70–80 % исходной толщины покрытия рассматриваются как критические показатели долговечности пластиковых систем (Nadizadeh et al., 2020).

Технология работ основана на отверждении двухкомпонентного состава при температуре окружающей среды с иницированием радикальной полимеризации *in situ*. *In situ* – измерения яркости, хроматических координат, светоотражающей способности непосредственно на дороге, а не лабораторным путем, что обеспечивает точные и реалистичные данные (Coves-Campos et al., 2018). Это обеспечивает производственную гибкость в межсезонье, когда применение термопластов ограничено температурным режимом. Низкая вязкость ММА-композиции способствует капиллярному проникновению в поры и микротрещины покрытия, формируя развитую механохимическую адгезию; химически модифицированные стеклянные микросферы обеспечивают стабильную ретрорефлексию при намокании и в ночное время (Lanxing, 2025; Boytorun Kimya Sanayi A.Ş., 2025). Межремонтный цикл дорожной разметки из холодного пластика в городских условиях достигает 3–5 лет при типичной толщине наносимого слоя 1,5–3,0 мм и начальных значениях ретрорефлексии RL порядка 200–350 $\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$, что существенно превышает ресурс традиционных лакокрасочных материалов (Babić et al., 2020; Mazzoni et al., 2024). По данным эксплуатационных наблюдений дорожных служб, межремонтный цикл дорожной разметки из холодного пластика в городских условиях достигает 3–5 лет, что существенно превышает ресурс традиционных лакокрасочных материалов (порядка 6–12 месяцев) и не уступает, а нередко превосходит показатели термопластичных систем на интенсивных маршрутах (Lanxing, 2025; Harun et al., 2019). Эксплуатационные характеристики холодного пластика обобщены в таблице 7.

Таблица 7. Эксплуатационные характеристики холодного пластика для дорожной разметки

Параметр	Типичный диапазон значений
Толщина наносимого слоя	1,5–3,0 мм
Срок службы в городских условиях	3–5 лет
Индекс ретрорефлексии RL (начальный)	200–350 mcd/m ² /lx
Коэффициент дневной яркости Qd	100–160 mcd/m ² /lx
Сохранение слоя при интенсивном износе	70–80 %

В последние годы в ряде городов Казахстана реализуются проекты по внедрению холодного пластика для устройства горизонтальной дорожной разметки, прежде всего на пешеходных переходах и участках с интенсивной транспортной нагрузкой. Муниципальная практика демонстрирует переход от традиционных лакокрасочных материалов к пластиковым системам, часто в сочетании с термопластиком для магистральных линий. Отмечается стремление к увеличению межремонтных интервалов, повышению износостойкости и стабильности оптических характеристик разметки, в том числе за счёт применения стеклянных микросфер. Представленные региональные примеры носят иллюстративный характер и отражают общую тенденцию модернизации дорожной инфраструктуры. Обобщённые данные о практике внедрения холодного пластика в городах Республики Казахстан представлены в таблице 8.

Таблица 8. Иллюстративные примеры внедрения холодного пластика в городах Республики Казахстан

Город	Объём работ, м ²	Тип материала	Наблюдаемый эксплуатационный результат
Астана	≈ 5000	Холодный пластик	Повышенная износостойкость и сохранение цветовых характеристик в течение длительного срока эксплуатации
Алматы	≈ 3000	Термопластик	Локальные дефекты покрытия после длительной эксплуатации
Шымкент	≈ 4500	Холодный пластик	Устойчивость к температурным колебаниям и механическому износу

Таким образом, анализ текущей практики применения холодного пластика в Республике Казахстан показывает формирование устойчивой тенденции к использованию долговечных полимерных систем для устройства горизонтальной дорожной разметки в условиях интенсивной эксплуатации и сложных климатических воздействий. Накопленный практический опыт свидетельствует о повышении межремонтных интервалов, стабильности оптических характеристик и эксплуатационной надёжности горизонтальной дорожной разметки. Дальнейшее развитие применения холодного пластика в Казахстане связано с расширением его использования на участках с повышенной транспортной нагрузкой, оптимизацией технологических режимов нанесения и возможностью локального производства материалов с учётом региональных климатических особенностей.

5. Заключение

Проведённый анализ показал, что холодный пластик на основе ММА является технически и экономически обоснованным материалом для долговечной горизонтальной дорожной разметки в условиях континентального климата и высокой транспортной нагрузки. Материал обеспечивает быстрое отверждение при температуре окружающей среды, развитую адгезию к минеральным основаниям и устойчивость к износу, УФ-воздействию, влаге и реагентам, сохраняя оптические характеристики (ретрорефлексию и дневную яркость) на протяжении межремонтного интервала. Полевые случаи в городах Казахстана подтверждают межремонтный цикл порядка 3–5 лет и снижение частоты повторных работ.

Практическая значимость выражается в повышении читаемости горизонтальной дорожной разметки в тёмное время и при намокании, что особенно важно на участках концентрации ДТП (пешеходные переходы, остановки, сложные пересечения). Рационально приоритизировать ММА-системы на таких участках, подбирая класс материала по яркости, времени отверждения и требуемым фрикционным характеристикам, а также регламентировать регулярный контроль показателей RL/Qd во времени.

Для масштабирования эффекта целесообразны уточнение нормативов (включая требования к оптическим и сцепным параметрам в эксплуатации), развитие локальной кооперации поставок и производства компонентов, что снизит себестоимость и повысит доступность технологии. Перспективные направления исследований – долговременный мониторинг деградации оптических/фрикционных свойств в разных дорожно-климатических зонах и оптимизации рецептур и текстуры покрытия для совместного улучшения видимости и противоскольжения при минимальной экологическом следе.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

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

8. Информация об авторах

Толымбекова, Лязат – кандидат технических наук, старший преподаватель, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; tolymbekova_lb@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3785-7943>

Успанова, Нурия – магистрант образовательной программы «М089-Химия», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; nuriya.uspanova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-2285-7680>

Сейтенова, Гайни – кандидат химических наук, доцент, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; seitenova_gzh@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

9. Финансирование: BR24992883 «Создание научно-технологического парка нефтехимии и полимерных материалов для предоставления услуг и внедрения прикладных результатов НИР в приоритетные сектора экономики страны».

10. Благодарность: Выражаем благодарность АО «Парк ядерных технологий». г. Курчатов.

11. Конфликты интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Спонсоры не принимали участия в разработке исследования, сборе, анализе или интерпретации данных, написании рукописи или принятии решения о публикации результатов.

12. Список литературы

1. Abdunazarov, D., Shukurov I., Nishonov A., & Shaumarov S. (2023). Analysis of existing problems in ensuring road traffic safety in major cities of Uzbekistan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1142(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1142/1/012039>
2. Ahmadiev, G. M. (2019). Comparative assessment of extraction methods of 3,4-benzopyrene from soils, bottom sediments and sewage sludge. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 570, Article 012002). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/570/1/012002>
3. Attila, D. (2024). Implementation of intelligent transport systems to improve public transport in Astana (Vnedrenie intellektual'nykh transportnykh sistem dlya uluchsheniya obshchestvennogo transporta v Astane in Russian). *Science Bulletin (Vestnik nauki)*, 1(6(75)), 2228–2233. <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-intellektualnyh-transportnyh-sistem-dlya-uluchsheniya-obshchestvennogo-transporta-v-astane>
4. Babić, D., & Burghardt, T. E. (2015). Application and characteristics of waterborne road marking paint. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 5(2), 150–169. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2015.5\(2\).06](https://doi.org/10.7708/ijtte.2015.5(2).06)
5. Babić, D., Kayner, H., Šruk, A., & Fiolić, M. (2020). Influence of road markings and signs on stress, eye movement, and young drivers' behaviour at night: A driving simulator study. *Safety*, 6(2), Article 24. <https://doi.org/10.3390/safety6020024>
6. Babić, D., Fiolić, M., Babić, D., & Burghardt, T. E. (2024). Systematic testing of road markings' retroreflectivity to increase their sustainability through improvement of properties: Croatia case study. *Sustainability*, 16(15), Article 6653. <https://doi.org/10.3390/su16156653>
7. Bakishev, K. A., Bashirov, A. V., & Fetkulov, A. K. (2017). Analysis and prediction of the state of road accidents and traffic crimes in the Republic of Kazakhstan. *Journal of Advanced Research in Law and Economics*, 8(5), 1456–1466. <https://journals.aserspublishing.eu/jarle/article/view/1693>
8. Bi, Y., Pei, J., Chen, Z., Zhang, L., Li, R., & Hu, D. (2021). Preparation and characterization of luminescent road-marking paint. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(2), 252–258. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0229-3>
9. Biuro natsional'noi statistiki Respubliki Kazakhstan. (2023). *Statistics of road traffic accidents in the Republic of Kazakhstan* (Statistika dorozhno-transportnykh proisshestvii v Respublike Kazakhstan in Russian). <https://stat.gov.kz/>
10. Boytorun Kimya Sanayi A.Ş. (2025). *Why choose MMA pavement marking paint? Benefits and advantages*. Retrieved March 15, 2025. <https://www.boytorun.com/why-choose-mma-pavement-marking-paint/>
11. Brusentseva, T., Shikalov, V., & Fomin, V. (2019). Application of thermoplastic powder by cold spraying for road marking. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 221, Article 01006). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922101006>
12. Burghardt, T. E., Babić, D., & Pashkevich, A. (2021). Performance and environmental assessment of prefabricated retroreflective spots for road marking. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00555. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00555>
13. Burghardt, T. E., & Pashkevich, A. (2024). Field study of pedestrian crossings deterioration over time: Assessment of microplastics emission from road markings. In *Transport Research Arena Conference* (pp. 17–23). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95284-5_3

14. Chand, A., Jayesh, S., & Bhasi, A. B. (2021). Road traffic accidents: An overview of data sources, analysis techniques and contributing factors. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5135–5141. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.415>
15. Climate Action Regional Offices. (2023). *Cold applied road markings: County Cork case study*. Retrieved March 15, 2025. <https://www.caro.ie/projects-research/case-studies/cold-applied-road-markings>
16. Committee for Legal Statistics and Special Records under the General Prosecutor's Office of the Republic of Kazakhstan. (2025). *Pokazateli DTP* [Road traffic accident indicators]. Retrieved March 15, 2025. <https://qamqor.gov.kz/crimestat/indicators/accident>
17. Coves-Campos, A., Bañón, L., Coves-García, J. A., & Ivorra, S. (2018). In situ study of road marking durability using glass microbeads and antiskid aggregates as drop-on materials. *Coatings*, 8(10), 371. <https://doi.org/10.3390/coatings8100371>
18. Elete, T., Odujobi, O., Nwulu, E. O., & Onyeke, F. O. (2024). Safety-first innovations: Advancing HSE standards in coating and painting operations. *International Journal of Applied Engineering Research and Development*, 20(12), 290–298. https://www.researchgate.net/publication/387707604_Safety-First_Innovations_Advancing_HSE_Standards_in_Coating_and_Painting_Operations
19. European Committee for Standardization. (2012). *Road marking materials – Drop on materials – Glass beads, antiskid aggregates and mixtures of the two* (EN 1423:2012). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/1c3914e0-973f-4bdf-a113-65f732342bfe/en-1423-2012>
20. Faheem, H. B., El Shorbagy, A. M., & Gabr, M. E. (2024). Impact of traffic congestion on transportation system: challenges and solutions - a review. *Mansoura Engineering Journal*, 49(2), Article 18. <https://doi.org/10.58491/2735-4202.3191>
21. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. (2014). *Public roads. Road markings. Control methods* (Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Razmetka dorozhnaya. Metody kontrolya in Russian) (GOST 32952–2014). <https://matest.ru/uploads/russian-standards/GOST32952.pdf>
22. Fiolić, M., Babić, D., & Tomasović, S. (2023). Effect of road markings and road signs quality on driving behaviour, driver's gaze patterns and driver's cognitive load at night-time. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 99, 306–318. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.10.025>
23. Friel, D. M., & Nungesser, E. (1995). Acrylic polymers as coating binders. In *Paint and coating testing manual* (pp. 39–52). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/MNL12186M>
24. General Prosecutor's Office of the Republic of Kazakhstan. (2015, December 11). *Order of the General Prosecutor of the Republic of Kazakhstan No. 131 "On approval of the reporting form 'On road traffic accidents causing death or injury' and the instructions for its preparation"* (Prikaz General'nogo Prokurora Respubliki Kazakhstan No. 131 «Ob utverzhdenii formy otcheta "O dorozhno-transportnykh proisshestviyakh, povlekshikh gibel' ili ranenie lyudey" i instruksii po ego formirovaniyu» in Russian). Legal act. Adilet. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1100006942>
25. Government of the Republic of Kazakhstan. (2014, November 13). *On the approval of traffic rules of the Republic of Kazakhstan (Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 1196)* (Ob utverzhdenii Pravil dorozhnogo dvizheniya Respubliki Kazakhstan (Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan No. 1196) in Russian). Adilet. <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/V1400010096>
26. Hadizadeh, E., Pazokifard, S., & Mirabedini, S. M. (2020). Optimizing practical properties of MMA-based cold plastic road marking paints using mixture experimental design. *Progress in Organic Coatings*, 147, Article 105784. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105784>
27. Harun, F., Ahmad, A., & Ismail, N. (2019). High performance thermoplastic and cold-applied plastic road markings: How long do they last? Retrieved March 15, 2025.

- https://www.researchgate.net/publication/332642894_High_performance_thermoplastic_and_cold_applied_plastic_road_markings_how_long_do_they_last
28. Ho, L. L., Filho, J. S. B., Fujii, W. Y., Machado, C. S., Bernucci, L. L. B., & Quintanilha, J. A. (2021). Pavement markings: Identification of relevant covariates and controllable factors of retroreflectivity performance as a road safety measure. *Transportation Safety and Environment*, 3(6). <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa034>
 29. Ibrayev, K., Ibrayev, A., Kapskiy, D., Kot, Y., Rybinskiy, A., & Bogdanovich, S. (2019). Analysis of the state of the road traffic safety in the Republic of Kazakhstan. *Science and Technique*, 18(6), 482–489. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-6-482-489>
 30. Ikromov, A. G., Makhmudov, G., Shovkatov, X., & Abruyev, S. (2023). State of road safety on the roads of Kazakhstan. *Global Scientific Review*, 21, 60–67. <https://scientificreview.com/index.php/gsr/article/view/297>
 31. Kassem, E., Lowery, M., Fanidjo, E., Mohamed, M., & Pacific Northwest Transportation Consortium. (2021). *Deterioration of green conflict paint for bicycle facilities* (Report No. 2018-S-UI-2). Pacific Northwest Transportation Consortium. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/58694/dot_58694_DS1.pdf
 32. Kazinform. (2020, October 29). *Experts: Poor-quality road signs and markings may cause accidents in the Republic of Kazakhstan* (K avariya v RK mogut privodit nekachestvennye dorozhnye znaki i razmetki – eksperty in Russian). Kazinform.kz. https://www.inform.kz/ru/k-avariya-v-rk-mogut-privodit-nekachestvennye-dorozhnye-znaki-i-razmetki-eksperty_a3712424
 33. Komitet po Standartizatsii Respubliki Kazakhstan (Committee for Standardization of the Republic of Kazakhstan). (2010). Materials for road markings. Technical requirements (ST RK 2066-2010) (Materialy dlya dorozhnoi razmetki. Tekhnicheskie trebovaniya (ST RK 2066-2010) in Russian). <https://meganorm.ru/Data2/1/4293741/4293741278.pdf>
 34. Komitet po Standartizatsii Respubliki Kazakhstan (Committee for Standardization of the Republic of Kazakhstan). (2019). *Technical means of road traffic organization. Road markings. Classification. Technical specifications* (ST RK 1124-2019) (Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya. Razmetka dorog. Klassifikatsiya. Tekhnicheskie trebovaniya (ST RK 1124-2019) in Russian). <https://vostoktranssignal.kz/upload/%D0%A1%D0%A2%20%D0%A0%D0%9A%201124-2019.pdf>
 35. Lanxing. (2025). *Cold plastic road marking: The ultimate guide for 2025*. Retrieved March 15, 2025. <https://lanxingco.com/cold-plastic-road-marking/>
 36. Lim, W.-B., Kim, J.-W., Lee, J.-H., Bae, J.-H., Min, J.-G., & Huh, P. (2023). Synthesis of a room-temperature curable acrylic-urethane polymer binder for road markings with high transmittance. *Materials*, 16(3), 1322. <https://doi.org/10.3390/ma16031322>
 37. Mazzoni, L. N., Vasconcelos, K., Albarracín, O., Bernucci, L., & Linhares, G. (2024). Field data analysis of retroreflectivity of road markings and its correlation with paint and glass bead characteristics. *Applied Sciences*, 14(10), 4205. <https://doi.org/10.3390/app14104205>
 38. Milachowski, K., & Wagner, K. (2020). Materials selection for structured horizontal road markings: Financial and environmental case studies. *European Transport Research Review*, 12(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-0397-x>
 39. Mohammed, O., & Khudhair, H. A. (2025). Understanding the impact of driver behavior on traffic safety: A comprehensive review of behavioral, technological, and environmental factors. *Al-Rafidain Journal of Engineering Sciences*, 3(1), 626–642. <https://rjes.iq/index.php/rjes/article/view/186/157>
 40. Naidu, V., & Bhaiswar, V. (2020). Review on machinery and materials for road marking application. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 954, Article 012016. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/954/1/012016>

41. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). *Communicating the value of pavement markings: a synthesis of highway practice* (NCHRP Synthesis 484). The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23255>
42. Petrov, A. I. (2024). Spatial distribution of road traffic accidents and infrastructure quality assessment. *Regional Research of Russia*, 5, 64. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-5-64>
43. Portal of State Procurements of the Republic of Kazakhstan. (n.d.). *Announcement of procurement No. 10619492* (Ob'yavlenie o zakupke No. 10619492 in Russian). Retrieved March 15, 2025. <https://www.goszakup.gov.kz/ru/announce/index/10619492>
44. Qiao, F., Kazimi, S. A., Ekezie, E., & Du, J. (2023). *Synthesis of best application and verification practices for long-life pavement markings: final report* (Texas Department of Transportation Research Report 0-7135-R1). Texas Southern University. <https://library.ctr.utexas.edu/hostedpdfs/tsu/0-7135-r1.pdf>
45. Robles-Serrano, S., Sanchez-Torres, G., & Branch-Bedoya, J. (2021). Automatic detection of traffic accidents from video using deep learning techniques. *Computers*, 10(11), 148. <https://doi.org/10.3390/computers10110148>
46. Sadeghi, P., & Goli, A. (2024). Investigating the impact of pavement condition and weather characteristics on road accidents. *International Journal of Crashworthiness*, 29(6), 973–989. <https://doi.org/10.1080/13588265.2024.2348269>
47. Sibkraska LLC. (n.d.). AK-511 – paint for road markings (AK-511 – kraska dlya dorozhnoy razmetki in Russian). Retrieved March 15, 2025. <https://sibkraska.ru/ak511.html>
48. Statista. (2023). *International and UK road deaths*. <https://www.statista.com/statistics/323869/international-and-uk-road-deaths/>
49. Taheri, M., Jahanfar, M., & Ogino, K. (2017). Self-cleaning traffic marking paint. *Surfaces and Interfaces*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.07.004>
50. Teltaev, B., Oliviero, C., Aytbaev, K., & Suppes, E. (2022). Freezing and thawing processes of automobile roads in Kazakhstan. *Applied Sciences*, 12(23), 11938. <https://doi.org/10.3390/app122311938>
51. Van, Y., Liu, H., Zhang, Q., & Chen, L. (2023). Analysis of causes and classification of road traffic accidents based on complex networks. *Applied Sciences*, 13(23), 12963. <https://doi.org/10.3390/app132312963>
52. Wang, D., Yang, X., Chu, X., Liu, P., He, Y., & Fan, Z. (2023). A novel method for evaluating the durability and environmental pollution of road markings on asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 411, 137255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137255>
53. World Population Review. (2025). *Countries with the most car accidents 2025*. <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/countries-with-the-most-car-accidents>
54. Yuan, J., Pan, Y., Chen, Y., Yao, W., Lu, S., Zhang, K., & Ling, T. (2023). International perspectives on skid resistance requirements for pavement markings: a comprehensive synthesis and analysis. *Lubricants*, 13(1), 29. <https://doi.org/10.3390/lubricants13010029>
55. Zhandarbekova, A. M., & Murzabekova, K. A. (2024). Analysis of road safety status in Almaty city (Analiz sostoyaniya dorozhnoy bezopasnosti v gorode Almaty in Russian). *KazATK Bulletin*, 133(4), 16–23. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-133-4-16-23>
56. Zhang, Y., Pike, A. M., Ge, H., & Carlson, P. J. (2011). Comparison of designs of field test decks for pavement marking materials. *Transportation Research Record*, 2258(1), 95–102. <https://doi.org/10.3141/2258-11>
57. Zhang, L., Liu, X., Zhang, Y., Li, H., Wang, J., & Liu, Z. (2023). Study on the reflective principle and long-term skid resistance of a sustainable hydrophobic hot-melt marking paint. *Sustainability*, 15(13), 9950. <https://doi.org/10.3390/su15139950>
58. Zhao, L., Ding, H., Sun, J., Wu, G., Xing, H., Wang, W., & Song, J. (2023). *Prediction of service life of thermoplastic road markings on expressways*. *Sustainability*, 15(21), Article 15237. <https://doi.org/10.3390/su152115237>

Көлденең жол таңбалары үшін суық пластикті қолданудың тиімділігін талдау

Лязат Толымбекова, Нурия Успанова, Гайни Сейтенова

Аңдатпа. Автокөлік ағынының өсуі және жол қозғалысы қауіпсіздігіне қойылатын талаптардың артуы жағдайында сапалы әрі ұзақ мерзімді жол таңбаларының маңызы арта түсуде. Осы мақалада жол таңбаларын салуда пайдаланылатын метилметакрилат (ММА) негізіндегі суық пластиктің физика-химиялық қасиеттері мен пайдалану сипаттамалары қарастырылады. СТ РК 1124–2019 және ГОСТ 32952 құжаттарына сүйене отырып, нормативтік талаптарға талдау жасалды, сондай-ақ суық пластиктің дәстүрлі материалдармен - лак-бояу жабындарымен және термопластиктермен салыстырмалы бағасы берілді. Зерттеу нәтижелері суық пластиктің тозуға төзімділігі жоғары, химиялық реагенттерге, ультракүлгін сәулелерге және абразивтік әсерге тұрақты екенін, соның арқасында оның қызмет ету мерзімі 5 жылға дейін жететінін көрсетті. Сонымен қатар, жол инфрақұрылымының авариялық деңгейге ықпалы талданып, жол таңбалары ЖКО тәуекелін төмендететін факторлардың бірі ретінде айқындалды. Қазақстан Республикасындағы жол-көлік оқиғаларының деңгейі бойынша статистикалық деректер келтіріліп, жол таңбаларын салу саласындағы негізгі мәселелер анықталды. Мақалада суық пластикті жағу технологиясы сипатталып, жол инфрақұрылымының қауіпсіздігі мен экологиялық тұрақтылығын арттыру мақсатында оны қолдану бойынша ұсынымдар берілген.

Түйін сөздер: суық пластик; жол таңбасы; метилметакрилат (ММА); жол қозғалысы қауіпсіздігі; тозуға төзімділік; нормативтік талаптар; жол-көлік оқиғасы (ЖКО); жол инфрақұрылымы.

Analysis of the effectiveness of using cold plastic for horizontal road markings

Lyazat Tolymbekova, Nuriya Uspanova, Gaini Seitenova

Abstract: Against the backdrop of increasing traffic volumes and more stringent road-safety requirements, durable and high-quality pavement markings are gaining heightened importance. This article examines the physicochemical properties and in-service performance of methyl methacrylate (MMA)-based cold plastic used for road markings. National and international regulatory requirements (ST RK 1124–2019, GOST 32952) are reviewed, and a comparative assessment of cold plastic versus traditional materials - paint coatings and thermoplastics - is provided. The analysis shows that cold plastic offers high wear resistance and resistance to chemical agents, ultraviolet radiation, and abrasive loads, enabling a service life of up to five years. The paper also considers the influence of road infrastructure on crash occurrence and highlights road markings as a factor that reduces the risk of road traffic accidents. Statistical data on the level of road traffic accidents in the Republic of Kazakhstan are presented, and key issues in marking application are identified. The technology for applying cold plastic is described, and recommendations are given on its use to enhance the safety and environmental sustainability of road infrastructure.

Keywords: cold plastic; road markings; methyl methacrylate (MMA); road traffic safety; wear resistance; regulatory requirements; road traffic accidents; road infrastructure.

Structure and properties of Langmuir–Blodgett films based on poly(9-vinylcarbazole) and poly(methyl methacrylate) blends

Mikhail Shrubok, Galina Melnikova*, Dmitry Sapsaliou, Tatyana Tolstaya, Sergei Chizhik

A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus; mihashrubok@gmail.com, galachkax@gmail.com, dsapsalev@list.ru, tolstaya.tn@yandex.ru, chizhiksa@tut.by

*Correspondence: galachkax@gmail.com

Citation: Shrubok, M., Melnikova, G., Sapsaliou, D., Tolstaya, T., Chizhik, S. (2026). Structure and properties of Langmuir–Blodgett films base on poly(9-vinylcarbazole) and poly(methyl methacrylate) blends. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 156(3), 113-123.

<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-113-123>

Academic Editor:
S.S. Dosmagambetova

Received: 31.08.2026
Revised: 09.09.2026
Accepted: 29.09.2026
Published: 30.09.2026



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: The relevance of creating coatings based on polymer blends is driven by the challenges of modern materials science, which include obtaining materials with specified performance characteristics by changing the composition of chemical systems and studying their properties. This paper presents the results of a study of the structural, mechanical characteristics and surface wettability of nanostructured films based on polymer blends of polyvinylcarbazole (PVK) and poly(methyl methacrylate) (PMMA). PVK, PMMA and PVK-PMMA films were formed using the Langmuir – Blodgett (LB) method via horizontal deposition onto the pre-hydrophilized silicon substrates. A correlation has been established between atomic force microscopy (AFM) data of the structural, mechanical properties and the wettability of the polymeric coatings. It was shown that at PVK mass content of up to 45 % in the polymer blend solution, the formed LB films are characterized by a disruption of a structural integrity and the formation of spherical and elongated conglomerates. According to static force spectroscopy data, the local values of the elastic modulus and adhesion force of LB films based on PVK-PMMA blends aren't depend on the quantitative ratio of components. The water contacts angle (CA) values for the polymer blends ranged from $74.31^\circ \pm 1.21^\circ$ to $80.11^\circ \pm 1.55^\circ$ and are determined by the properties of the component whose mass content is predominant. The formation of a dense LB film based on a polymer blend with significantly different molecular weights is possible when the low molecular weight component content in the blend is up to 15 wt. %, which is confirmed by AFM data for the PVK-PMMA sample with a component mass ratio is of 87.1 % – 12.9 %. The wettability of this film differs from that one of the homopolymer samples, which expands the application prospects of these polymers.

Keywords: Langmuir – Blodgett method; nanostructured films; polymer blends; poly(9-vinylcarbazole); poly(methyl methacrylate); atomic force microscopy; elastic modulus; wettability.

1. Introduction

Polymer films are promising material which is currently used as sensitive elements in gas (Youssef et al., 2016) and electrochemical (Li et

al., 2024) sensors, components of drug delivery systems (Albarahmieh et al., 2018), and optoelectronic devices (Bilger et al., 2019). However, there remains a need to enhance still problems of challenges remain in expanding the functional characteristics and physicochemical properties of known materials. One approach to solving this problem is the fabrication of film materials based on multicomponent systems: polymer composite materials (Mo et al., 2019; Prakash et al., 2013), polymer blends (Goettler & Scobbo, 2019) and their combinations (Brulé & Flat, 2006).

Researchers are focusing on the development of new materials with the required range of properties based on polymers, because of their wide variety and easy susceptibility to physical and chemical modifications. In (Shahbazi et al., 2016), the changes of the initial material properties were demonstrated by the introduction of various biopolymers into a polyvinyl alcohol (PVA) matrix. It was established that the introduction of k-carrageenan, alginate or chitosan was accompanied by the compaction a denser of the PVA film structure and an increase in its tensile strength values. An increase in the k-carrageenan content in the polymer blend led to a decrease in the wettability of the films. According to Patil et al. (2021), the introduction of PVA into a starch matrix was accompanied by an improvement in the complex mechanical properties of the films compared to the matrix component. The study by Oh et al. (2026) demonstrated that the synergy of properties of the synthesized copolymer poly (glycidyl methacrylate-g-polypropylene glycol)-co-poly(oxyethylene methacrylate) and small amounts of polyactin (25 wt.%) allows for obtaining thin film composite membranes with a semi-interpenetrating network structure with high CO₂/N₂ separation selectivity and minimal adhesion.

A number of studies (Ding et al. 2023; Qin et al., 2026; Li et al.2024) have focused on optimization of the polymer blends composition. It was shown that blending polymers leads to an improvement in the complex of mechanical, optical, and dielectric properties of films.

A wide range of studies have been dedicated to investigating the fundamental aspects of changes in the rheological properties of solutions, as well as the formation of coatings based on polymer blends. Thus, the paper (Xue et al., 2012) showed that the formation of coatings based on polymer blends is generally accompanied by a process of component phase separation as a consequence of their low mutual solubility. Phase separation underlies the structural diversity of multicomponent polymer coatings. It is noted (Kamanyi et al., 2008; Rodríguez-Hernández, 2016) that the film fabrication methods, the conditions of their implementation, the nature and the quantitative ratio of the components of polymer blends influence the phase separation process. Thus, phase separation is a key factor in the structure formation of polymer films, which also determines the material properties.

To form polymer coatings, drop-casting, spin-coating, and Langmuir – Blodgett methods are generally used (Da Rocha Rodrigues et al., 2020). It is known that the LB and spin-coating methods provide a high degree of control over the structure and molecular organization of coatings (Da Rocha Rodrigues et al., 2020; Agarwal et al., 2023). Papers (Mitsui et al., 2012; Kawaguchi, 2017; Torrisi et al., 2010) indicate that the formation of polymer blend films at the air-water interface leads to the “extrusion” of one of the components onto the surface of the monolayer.

The localization of components on the subphase is determined by a combination of their physicochemical properties and their compatibility, including hydrophilic-hydrophobic properties, branching of component molecules, intermolecular interactions, the possibility of forming associates and aggregates, etc. As a result, the structure formation process of films under the LB method conditions is a multi-stage process. Application of the solution to the subphase is accompanied by component restriction and the formation of the thermodynamically equilibrium dense monolayer, which is reflected in the monolayer compression isotherms. The structure of the monolayer is determined by the conditions of the subphase level lowering and the interaction of the monolayer with the substrate surface (Arslanov, 1994).

AFM allows for a comprehensive analysis of the structural and mechanical properties of the resulting monolayer LB films at the nanoscale and reveals the features of their formation at different component contents.

The aim of this work is to form LB films based on PVK-PMMA polymer blends with various quantitative ratios of components and to research their structural, mechanical and hydrophilic properties.

2. Materials and methods

Monolayer polymer coatings were prepared from blends of PVK (Sigma Aldrich, $M = 100\,000$) and PMMA (Sigma Aldrich, $M = 15\,000$). PVK-PMMA solutions with various quantitative ratios of components were used, obtained by mixing PVK solutions ($c = 0.75\text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$) and PMMA ($c = 1\text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$) in chloroform. To achieve uniform component distribution, the PVK-PMMA solutions were subjected to ultrasonic treatment for 10 min. As a result, samples of the following compositions (Table 1) were obtained.

Table 1. Qualitative and quantitative composition of samples

Abbreviation	Sample (mass content (%) of corresponding component)
S1	PMMA
S2	PVK-PMMA (7.7-92.3)
S3	PVK-PMMA (24.3-75.7)
S4	PVK-PMMA (42.9-57.1)
S5	PVK-PMMA (63.6-36.4)
S6	PVK-PMMA (87.1-12.9)
S7	PVK

Monolayer polymer films were formed using the LB-method on the surface of silicon substrates (111 orientation) by horizontal deposition using the “Automated complex for modifying membrane surfaces with molecular and ultrathin layers” (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus) (Mel'nikova et al., 2025). PVK-PMMA films were deposited at a surface pressure (π) $15\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ (determined on the basis of an analysis of experimentally obtained monolayer compression isotherms in the « $\pi - A$ » coordinates, monolayer compression rate – $0.3\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, aqueous subphase temperature – 20°C). Preliminary hydrophilization of silicon substrates was carried out according to the method described in (Sapsalyov et al., 2021).

The monolayer compression modulus (k) was calculated from the linear regions of the polymer blend monolayer compression isotherms corresponding to the “liquid-crystalline film” phase state according to the methodology described in (Sapsalyov et al., 2025).

The structural and mechanical properties of PVK-PMMA films were investigated by AFM using an NT-206 AFM microscope (ALC «Microtestmachines», Belarus) with NSC 11A silicon cantilevers (average stiffness – $3\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$) (Micromash, Estonia) with radius of curvature of no more than 10 nm. The elastic modulus (E) and adhesion force (F) values were calculated based on nanoindentation data (from the “approach-retraction” curves) using Johnson-Kendall-Roberts model (Mel'nikova et al., 2025).

The hydrophilic properties of PVK-PMMA coatings (WCA, specific surface energy) were evaluated on the DSA 100E (Krüss, Germany); working liquids – distilled water, diiodomethane, drop volume – $2\text{ }\mu\text{L}$. The CA was determined by the “lying” drop method (by plotting a tangent curve at the three-phase point: liquid – substrate – air). The specific surface energy was calculated using the Owens – Wendt – Rebel – Kaelble model (Kaelble, 1970).

3. Results

According to the compression isotherms (Figure 1) obtained for solutions with various ratios of polymer components (Table 1) at $\pi = 15 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, the PVK, PMMA and their blend films are in “liquid-crystalline” phase state. The significant increase in surface pressure on the PVK compression isotherm compared to PMMA is caused to the high molecular weight values and the stiffness of the PVK chains.

It should be noted that in the present study, compared to the results presented in (Sapsalyov et al., 2025), the rate of subphase level decrease during LB monolayer deposition onto the silicon substrate was reduced. This extended the time for molecular relaxation and resulted in obtaining the film in a thermodynamically stable phase state.

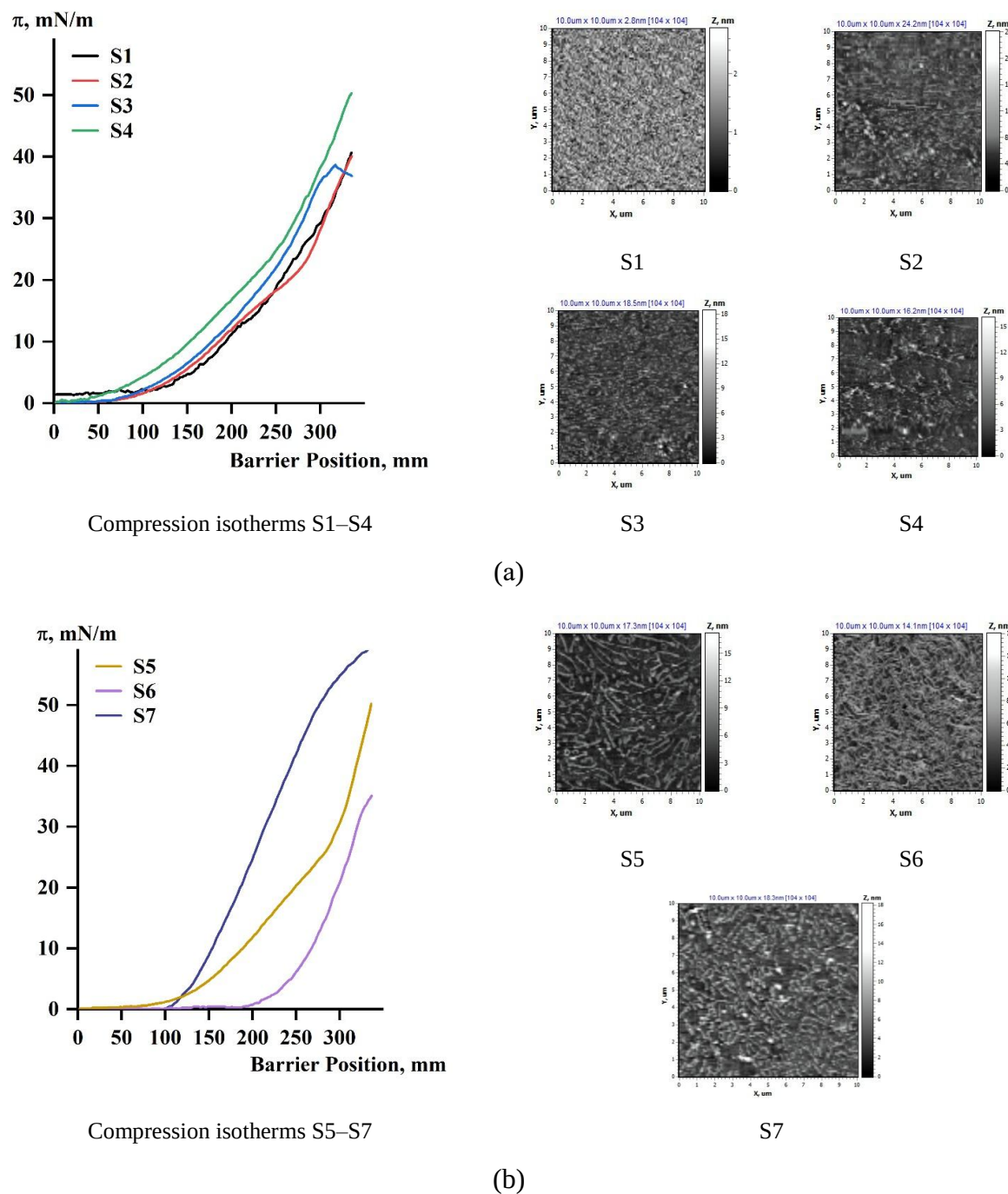


Figure 1. Compression isotherms and AFM structure of LB films: a) samples S1–S4, b) samples S5–S7

Based on the compression isotherms, the compression modulus values of the monolayers made from polymer blends were calculated (Table 2).

Table 2. Compression modulus values of monolayers at different PVK contents

Sample	PVK content, %	Compression modulus (k), $\text{mN}\times\text{m}^{-1}$
S1	0	65.7
S2	7.7	49.6
S3	24.3	69.0
S4	42.9	68.7
S5	63.6	72.8
S6	87.1	114.1
S7	100	93.5 (Sapsalyov et al, 2025)

The formation of films from the solutions with low PVK content (S2) leads to a decrease in k from $65.7 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ to $49.6 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. This pattern of the compression modulus change is explained by the destructuring of the film, which results in the formation of numerous spherical conglomerates, the presence of which is confirmed by AFM data (Figure 1a). The analysis of the shape of the compression isotherms for monolayers based on PVK-PMMA blends (S2–S6) indicates that an increase in PVK content leads to a non-monotonic increase in the tangent of the slope angle of the linear range (an increase in the compression modulus from $49.6 \text{ mN}\times\text{m}^{-1}$ to $114.1 \text{ mN}\times\text{m}^{-1}$) in the corresponding phase region of the « $\pi - A$ » isotherms. The k values for films S3 and S4 are comparable to S1 ($65.7 \text{ mN}\times\text{m}^{-1}$), since PVK conglomerates are localized in the structure and on the surface of the films, while the monolayer is formed by PMMA. The structure of samples S4 and S5 is similar to PVK, which is confirmed by the increase in k from $72.8 \text{ mN}\times\text{m}^{-1}$ to $114.1 \text{ mN}\times\text{m}^{-1}$. It should be noted that k for the sample S6 is higher compared to PVK (Table 2). This fact indicates the formation of a denser structure in the sample S6 through the introduction of PMMA into the intermolecular space of PVK.

Comparison of AFM data showed that the structure of PMMA films is homogeneous and contains a minimal number of defects (Figure 1a). This is caused by the higher segmental mobility of PMMA molecules, which contributes to the formation of dense packing. The PVK structure is characterized by the presence of both large spherical and thread-like elements (Figure 1b), formed because of the lower mobility of polymer segments.

For the S2 film, the introduction of small amounts of PVK into PMMA leads to a disruption of the structural integrity of the films, which is confirmed by a decrease in the compression modulus values of the monolayer (from $65.7 \text{ mN}\times\text{m}^{-1}$ to $49.6 \text{ mN}\times\text{m}^{-1}$). S2 and S3 films are characterized by the presence of numerous spherical conglomerates (Figure 1a), while an increase in the amount of PVK (S4) is accompanied by their growth and the prevalence of irregular spherical shapes. Presumably, the spherical and elongated formations are represented by PVK. The reason for their formation is the low compatibility of the components, accompanied by phase separation.

The surface of film S6 is characterized by a homogeneous filamentous structure. Data on the surface morphology of PVK and S6 show that the introduction of small amounts of PMMA into the PVK solution allows for the formation of uniform films with a structure similar to PVK. PMMA fills the intermolecular space of PVK chains. The increase in the compression modulus of S6 compared

to S7 is attributed to the introduction of PMMA into the intermolecular space of PVK, which leads to an increase in the packing density of the matrix component macromolecules.

Thus, based on the data of the structure and compression modulus values of the studied films, it is shown that the matrix of the monomolecular polymer monolayer is determined by the predominant component in the blend: for samples S2–S4 – PMMA, S6 – PVK. The structure of sample S5 is intermediate compared to S2–S4 and S6. The film of S5 acquires the structure of PVK but its properties are determined by PMMA in terms of the delocalization of PVK conglomerates on the film surface.

According to the results of static force microscopy data (Figure 2), the local elastic modulus values of PVK and PMMA films (S1 and S7) were $412.2 \text{ MPa} \pm 10 \%$ and $507 \text{ MPa} \pm 10 \%$ respectively.

The E and adhesion force values for S2–S6 lie in the range between S1 and S7 and do not change within the confidence interval, which indicates that there is no dependency between the data of mechanical properties of the polymer blend films and the quantitative ratio of the components.

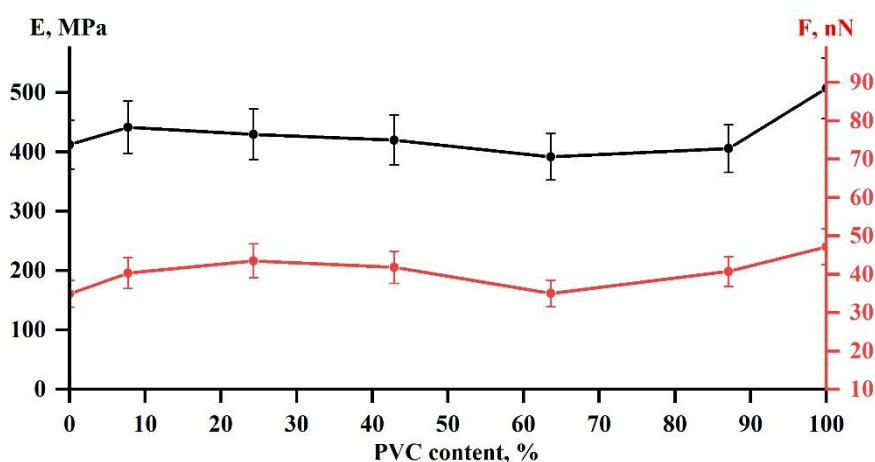
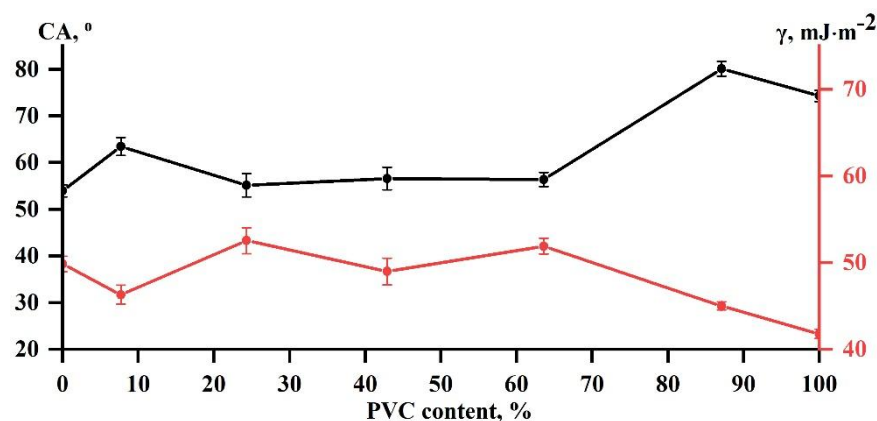


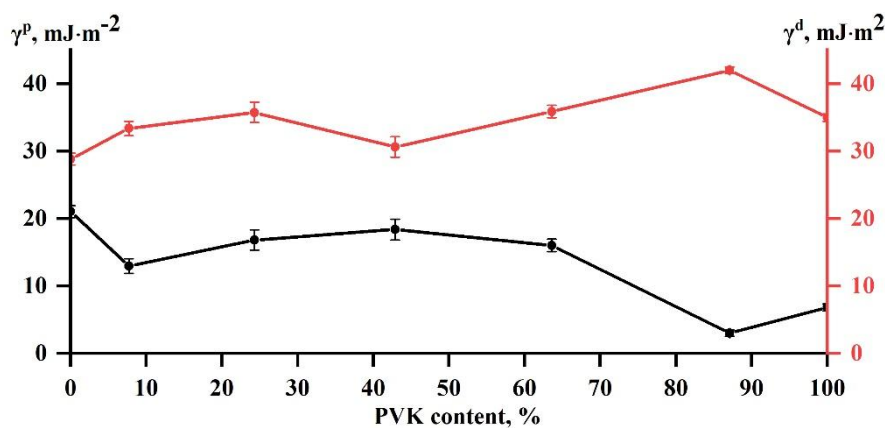
Figure 2. Elastic modulus and adhesion force of PVK-PMMA LB coatings

The CA values of PVK and PMMA films were $74.31^\circ \pm 1.21^\circ$ and $53.97^\circ \pm 1.33^\circ$, which is explained by the difference in the structure of their macromolecules. The macromolecules of PVK and PMMA are composed of polyvinyl chains with carbazole and acetate site groups, respectively. The presence of bulk carbazole groups provides the hydrophobicity of PVK. The acetate groups of PMMA contribute to better wettability of the film surface. The polar component of the specific surface energy for PMMA ($21.03 \text{ mJ} \times \text{m}^{-2}$) is higher than that of PVK ($6.81 \text{ mJ} \times \text{m}^{-2}$). Similar to the changes in the monolayer compression modulus of the films, the specific surface energy values are independent of PVK and PMMA content in the polymer blends (samples S2–S5). The CA and polar component values for films S2–S5 are similar to the S1 sample. In S2–S5 samples PVK is represented by spherical and elongated conglomerates. As a result, the wettability of S2–S5 films is determined by PMMA.

For sample S6, the decrease in the specific surface energy values was established as a consequence of an increase in the dispersion component, and CA values were approximately like PVK (Figure 3). The increase in the CA (from $74.31^\circ \pm 1.21^\circ$ to $80.11^\circ \pm 1.55^\circ$) upon the introduction of small amounts of PMMA into PVK (S6) is attributed to the formation of a denser and more homogeneous filamentous structure.



(a)



(b)

Figure 3. Changes in the CA and specific surface energy (a); changes in the polar and dispersion components of the specific surface energy of LB films based on PVK-PMMA

4. Discussion

Based on research, it was shown that the morphological features of polymer blend films are determined by the structure of the predominant component. The formation of a dense, homogeneous film for PVK-PMMA blends is possible when the matrix is represented by a component with a molecular weight (PVK) significantly higher than the second component (PMMA). The low compatibility of the components leads to the phase separation of the monolayer and the formation of numerous spherical conglomerates and filamentous structures. It is demonstrated that blending PVK and PMMA does not lead to a change in the mechanical properties of the coatings. The elastic modulus and adhesion force of S2–S6 are independent of the quantitative ratio of components. The wettability of PVK-PMMA films is determined by the predominant component.

The obtained results indicate the potential for using PVK-PMMA films as a sensitive layer of electrochemical sensors for analyzing the content of organic impurities and metal ions in aqueous media. In future work, it is planned to develop and investigate the analytical characteristics of capacitive sensors, the sensitive layer of which will be presented by PVK-PMMA films with an optimal component ratio (S6).

5. Conclusion

Thus, for the formation of dense LB films based on polymer blends, the optimal component ratio is PVK-PMMA 87.1 % – 12.9 %, which is confirmed by a complex of AFM data on the structural and morphological features of the film surface, as well as data on surface wettability.

6. Supplementary materials: No supplementary material.

7. Author Contributions

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

8. Author Information

Shrubok, Mikhail – Junior Research Assistant, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, P. Brovka Str. 15, Minsk, Republic of Belarus, 220072; mihashrubok@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4779-7415>

Melnikova, Galina – Senior Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus, 220072; galachkax@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4891-7523>

Sapsaliou, Dmitry – Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, P. Brovka Str. 15, Minsk, Republic of Belarus, 220072; dsapsalev@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0375-6482>

Tolstaya, Tatyana – Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, P. Brovka Str. 15, Minsk, Republic of Belarus, 220072; tolstaya.tn@yandex.ru

Chizhik, Sergei – Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, P. Brovka Str. 15, Minsk, Republic of Belarus, 220072; chizhik_sa@tut.by, <https://orcid.org/0000-0002-5301-0195>

9. Funding: This scientific research was funded by the research project 1 of Task 7.2.2, "Surface Nanoengineering for Precision Mechanics, Microelectronics, and Sensor Technology," under Sub-program 7.2, "Nanomaterials, Nanostructures, and Technologies," of State Scientific Research Program 7, "Modern Materials Science, Advanced Materials, and New Technologies", 2026–2030 yrs.

10. Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

11. References

1. Agarwal, S., Lu, M., & Sarkar, J. (2023). Fabrication of micropatterned thin films through controlled phase separation of polystyrene/polydimethylsiloxane blends by spin coating. *Frontiers in Soft Matter*, 3, 1306346. <https://doi.org/10.3389/frsfm.2023.1306346>
2. Albarahmieh, E., Albarahmieh, M., & Alkhalidi, B. A. (2018). Fabrication of hierarchical polymeric thin films by spin coating toward production of amorphous solid dispersion for buccal drug delivery system: preparation, characterization, and in vitro release investigations. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 107(12), 3112–3122. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2018.08.019>
3. Arslanov V. V. (1994). Polymer monolayers and Langmuir-Blodgett films. The influence of the chemical structure of the polymer and of external conditions on the formation and properties of organised planar assemblies (Polimernye monosloi i plenki Lengmyura - Blodzhett. Vliyanie himicheskoy struktury polimera i vnesnih uslovij na formirovanie i svoystva organizovannyh planarnykh ansamblej in Russian). *Russian Chemical Reviews*, 63(1), 3–42. <https://doi.org/10.1070/RC1994v063n01ABEH000069>

4. Bilger, D., Park, K.-W., & Andrew, T. L. (2019). A vapor printed electron-accepting conjugated polymer for textile optoelectronics. *Synthetic Metals*, 250, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2019.02.005>
5. Brulé, B., & Flat, J. (2006). High barrier polyamide/polyolefin/organoclay nanocomposites. *Macromolecular Symposia*, 233(1), 210–216. <https://doi.org/10.1002/masy.200690020>
6. Da Rocha Rodrigues, R., Da Silva, R. L. C. G., Caseli, L., & Péres, L. O. (2020). Conjugated polymers as Langmuir and Langmuir-Blodgett films: challenges and applications in nanostructured devices. *Advances in Colloid and Interface Science*, 285, 102277. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102277>
7. Ding, S., Bao, Z., Wang, Y., Dai, Z., Jia, J., Shen, S., Yin, Y., & Li, X. (2023). Excellent high-temperature dielectric energy storage of flexible all-organic polyetherimide/poly(arylene ether urea) polymer blend films. *Journal of Power Sources*, 570, 233053. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233053>
8. Goettler, L. A., & Scobbo, J. J. (2014). Applications of polymer blends. In L. A. Utracki & C. A. Wilkie (Eds), *Polymer Blends Handbook* (pp. 1433–1458). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6064-6_17
9. Kaelble, D. H. (1970). Dispersion-polar surface tension properties of organic solids. *The Journal of Adhesion*, 2(2), 66–81. <https://doi.org/10.1080/0021846708544582>
10. Kamanyi, Jr., A. E., Ngwa, W., Luo, W., & Grill, W. (2008). Effects of solvent vapor pressure and spin-coating speed on morphology of thin polymer blend films (T. Kundu, Ed.; p. 69351X). <https://doi.org/10.1117/12.776274>
11. Kawaguchi, M. (2017). Interfacial characteristics of binary polymer blend films spread at the air-water interface. *Advances in Colloid and Interface Science*, 247, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.05.004>
12. Li, M., Jiang, R., Sun, Y., & Song, Y. (2024). An ultrasensitive electrochemical sensor based on nanoporous molecularly imprinted polymer film for triphenyl phosphate detection. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5038622>
13. Li, Z., Zhou, J., Xu, Y., Chen, C., Ran, T., & Wang, S. (2024). Preparation of PVDF/PVP blend polymer nanofiber films and application on screen-printed flexible electrodes. *European Polymer Journal*, 206, 112740. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.112740>
14. Mel'nikova, G. B., Mahanyok, A. A., & Chizhik, S. A. (2025). Non-destructive testing of mechanical properties and thickness of Langmuir–Blodgett films by static force spectroscopy (Nerazrushayushchij kontrol' mekhanicheskikh svojstv i tolshchiny plenok Lengmyura – Blodzhett metodom staticheskoy atomno-silovoy spektroskopii in Russian). Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. *Physical-technical series*, 70(3), 252–263. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-3-252-263>
15. Mitsui, N., Morioka, T., & Kawaguchi, M. (2012). Surface dilational moduli of poly(vinyl acetate), poly(methyl methacrylate), and their blend films spread at the air–water interface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 395, 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.12.042>
16. Mo, J.-H., Kim, K. C., & Jang, K.-S. (2019). Well-dispersed carbon nanotube/polymer composite films and application to electromagnetic interference shielding. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 80, 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.07.048>
17. Oh, N. Y., Kim, J. H., Kwak, H., Min, B., & Kim, J. H. (2026). Polymer-blend thin-film composite membranes with semi-IPN architecture for enhanced CO₂ separation and mechanical robustness. *Journal of Membrane Science*, 738, 124752. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2025.124752>
18. Patil, S., Bharimalla, A. K., Mahapatra, A., Dhakane-Lad, J., Arputharaj, A., Kumar, M., Raja, A. S. M., & Kambli, N. (2021). Effect of polymer blending on mechanical and barrier properties of starch-polyvinyl alcohol based biodegradable composite films. *Food Bioscience*, 44, 101352. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101352>

19. Prakash, S., Chakrabarty, T., Singh, A. K., & Shahi, V. K. (2013). Polymer thin films embedded with metal nanoparticles for electrochemical biosensors applications. *Biosensors and Bioelectronics*, 41, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2012.09.031>
20. Qin, X., Zhang, T., Yan, F., Chen, J., Dai, H., Yang, Y., Song, G., Xue, R., & Li, T. (2026). Optimizing and characterizing the dielectric and energy storage performance of PVDF/PMMA blend films via free volume regulation. *Materials Science and Engineering: B*, 330, 119516. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2026.119516>
21. Rodríguez-Hernández, J. (2016). Phase structures in thin films of nanostructured polymer blends. In *Design and applications of nanostructured polymer blends and nanocomposite systems* (pp. 313–364). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39408-6.00014-5>
22. Sapsalyov, D. V., Mel'nikova, G. B., Lapickaya, V. A., Tolstaya, T. N., Kuznecova, T. A., Kotov, D. A., & Chizhik, S. A. (2021) Thin composite polymethyl methacrylate films with silicon dioxide nanoparticles (Tonkie kompozicionnye plenki polimetilmetakrilata s nanochasticami dioksida kremniya in Russian). *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, 2, 36–49. <https://doi.org/10.33581/2520-257X-2021-2-36-49>
23. Sapsalyov, D. V., Mel'nikova, G. B., Tolstaya, T. N., & Chizhik, S. A. (2025). Features of formation, structure and properties of Langmuir–Blodgett films of polyvinylcarbazole with inorganic nanoparticles (Osobennosti formirovaniya, struktura i svoystva Lengmyura – Blodzhett plenok polivinilkarbazola s neorganicheskimi nanochasticami in Russian). *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 69(2), 150–158. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-2-150-158>
24. Shahbazi, M., Rajabzadeh, G., Rafe, A., Ettelaie, R., & Ahmadi, S. J. (2016). The physico-mechanical and structural characteristics of blend film of poly (vinyl alcohol) with biodegradable polymers as affected by disorder-to-order conformational transition. *Food Hydrocolloids*, 60, 393–404. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.03.038>
25. Torrisi, V., Licciardello, A., & Marletta, G. (2010). Chemical imaging of self-assembling structures in Langmuir–Blodgett films of polymer blends. *Materials Science and Engineering: B*, 169(1–3), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2009.12.004>
26. Xue, L., Zhang, J., & Han, Y. (2012). Phase separation induced ordered patterns in thin polymer blend films. *Progress in Polymer Science*, 37(4), 564–594. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.09.001>
27. Youssef, I. B., Sarry, F., Nysten, B., Alexieva, G., Strashilov, V., Kolev, I., & Alem, H. (2016). Growth and toxic gas sensing properties of poly(urethaneimide) thin films. *Talanta*, 153, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.03.021>

Поли(9-винилкарбазол) және полиметилметакрилат қоспалары негізіндегі Ленгмюр – Блоджетт пленкаларының құрылымы мен қасиеттері

Михаил Шрубок, Галина Мельникова, Дмитрий Сапсалёв, Татьяна Толстая, Сергей Чижик

Аңдатпа. Полимер қоспасынан жасалған жабындарды әзірлеу қазіргі заманғы материалтану саласындағы міндеттерге, соның ішінде химиялық жүйелердің құрамын өзгерту және олардың қасиеттерін сипаттау арқылы көрсетілген өнімділік сипаттамалары бар материалдарды өндіруге қатысты. Бұл мақалада поливинилкарбазол (ПВК) және полиметилметакрилат (ПММА) қоспаларына негізделген нанокұрылымды пленкалардың құрылымдық-механикалық қасиеттері мен бетінің ылғалдануын зерттеу нәтижелері ұсынылған. ПВК, ПММА және ПВК-ПММА қоспасынан жасалған пленкалар гидрофилденген кремний пластиналарының бетіне көлденең тұндыру арқылы Ленгмюр – Блоджетт (ЛБ) әдісімен қалыптастырылды. Жабындардың құрылымдық-механикалық қасиеттері мен ылғалдануы туралы атомдық күш

микроскопиясы (АКМ) деректері арасында корреляция анықталды. Полимер қоспасынан жасалған ерітіндіде ПВК мөлшері 45 пайызға дейін болғанда, пайда болған ЛБ пленкалары құрылымдық тұтастықтың бұзылуымен және сфералық және созылған конгломераттардың пайда болуымен сипатталатыны көрсетілген. Статикалық күш спектроскопиясының деректеріне сәйкес, ПВК-ПММА қоспаларына негізделген ЛБ-қабықшаларының серпімділік модулі мен адгезия күшінің жергілікті мәндері компоненттердің сандық қатынасына тәуелді емес. Полимер қоспалары үшін (КУС) мәндері $74,31^\circ \pm 1,21^\circ$ -ден $80,11^\circ \pm 1,55^\circ$ -ке дейін болды және массалық құрамы басым компоненттің қасиеттерімен анықталады. Молекулярлық салмағы айтарлықтай әртүрлі полимер қоспасына негізделген тығыз ЛБ қабықшасының түзілуі қоспадағы төмен молекулалық компонент мөлшері 15 салмақтық %-ға дейін болғанда мүмкін, бұл компоненттік массалық құрамы 87,1 % – 12,9 % болатын ПВК-ПММА үлгісі үшін АКМ деректерімен расталады. Бұл қабықшаның ылғалдануы гомополимер үлгілерінің ылғалдануынан ерекшеленеді, бұл осы полимерлердің қолдану әлеуетін кеңейтеді.

Түйін сөздер: Ленгмюр–Блоджетт әдісі; нанокұрылымды қабықшалар; полимер қоспалары; поли(9-винилкарбазол); поли(метилметакрилат); атомдық-күштік микроскопия; серпімділік модулі; суланғыштық.

Структура и свойства пленок Ленгмюра–Блоджетт на основе смесей поливинилкарбазола и полиметилметакрилата

Михаил Шрубок, Галина Мельникова, Дмитрий Сапсалёв, Татьяна Толстая, Сергей Чижик

Аннотация. Актуальность создания покрытий на основе смесей полимеров обусловлена задачами современного материаловедения, в число которых входит получение материалов с заданными эксплуатационными характеристиками за счет изменения состава химических систем и изучение их свойств. В данной работе представлены результаты исследования структурно-механических характеристик и смачиваемости поверхности наноструктурированных пленок на основе смесей поливинилкарбазола (ПВК) и полиметилметакрилата (ПММА). Пленки ПВК, ПММА и смесей ПВК-ПММА сформированы методом Ленгмюра – Блоджетт (ЛБ) с использованием горизонтального способа осаждения на поверхности гидрофилизированных кремниевых пластин. Установлена корреляция данных атомно-силовой микроскопии (АСМ) о структурно-механических свойствах и смачиваемости покрытий. Показано, что при массовом содержании ПВК до 45 процентов в растворе смеси полимеров для сформированных ЛБ-пленок характерно нарушение структурной целостности и формирование сферических и вытянутых конгломератов. Согласно данным статической силовой спектроскопии, локальные значения модуля упругости и силы адгезии ЛБ-пленок на основе смесей ПВК-ПММА не зависят от количественного соотношения компонентов. Значения КУС для смесей полимеров составили от $74,31^\circ \pm 1,21^\circ$ до $80,11^\circ \pm 1,55^\circ$ и определяются свойствами компонента, массовое содержание которого преобладает. Формирование плотной ЛБ-пленки на основе смеси полимеров, значительно различающимися молекулярными массами, возможно при содержании низкомолекулярного компонента в смеси до 15 масс. %, что подтверждено АСМ-данными для образца ПВК-ПММА с массовым содержанием компонентов 87,1 % – 12,9 %. Смачиваемость данной пленки отличается от образцов гомополимеров, что расширяет перспективы применения данных полимеров.

Ключевые слова: метод Ленгмюра–Блоджетт; наноструктурированные пленки; смеси полимеров; полиметилметакрилат; поливинилкарбазол; атомно-силовая микроскопия; модуль упругости; смачиваемость.

Алтай өңірінде трансшекаралық туризмді дамытудың стратегиялық келешегі: геоақпараттық талдау және кеңістіктік модельдеу

Иманалы Акбар^{1*}, Гулнар Кубесова², Алтынбай Саулембаев³, Забира Мырзалиева³, Мирас Галимов⁴, Марат Мамадияров⁵

¹Калифорния университеті, Дэвис, Үздіксіз және кәсіби білім беру орталығы, Дэвис қ., Калифорния штаты, АҚШ; iakbar@ucdavis.edu

²География және туризм кафедрасы, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан; kubesova.gulnar@gmail.com

³Өзбекәлі Жәнібеков атындағы Оңтүстік Қазақстан педагогикалық университеті, Шымкент қ., Қазақстан; altynbai_saulembaev@mail.ru, zabira2011@mail.ru

⁴Махамбет Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан университеті, Орал қ., Қазақстан; heritage_mir@mail.ru

⁵Академик А. Қуатбеков атындағы Халықтар достығы Университеті, Шымкент қ., Қазақстан; mmd_64@mail.ru

*Корреспонденция: iakbar@ucdavis.edu

Дәйексөз: Акбар, И., Кубесова, Г., Саулембаев, А., Мырзалиева, З., Галимов, М., Мамадияров, М. (2026). Алтай өңірінде трансшекаралық туризмді дамытудың стратегиялық келешегі: геоақпараттық талдау және кеңістіктік модельдеу. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 156(3), 124-140.

<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-124-140>

Академиялық редактор: А.М. Сергеева

Редакцияға түсті: 18.08.2026

Түзетілді: 25.08.2026

Қабылданды: 14.09.2026

Басылымға шықты:

30.09.2026



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/>)

Андатпа. Шекаралық туризм аймақтық интеграция мен тұрақты дамудың маңызды катализаторына айналды, әсіресе экологиялық тұрғыдан әртүрлі және географиялық тұрғыдан күрделі таулы аймақтарда. Бұл зерттеу Қазақстан, Ресей, Қытай және Моңғолияны алып жатқан Алтай тауларындағы трансшекаралық туризмнің кеңістіктік конфигурациясы мен даму перспективаларын талдайды. Табиғи және рекреациялық ресурстардың таралуын, инфрақұрылымға қолжетімділікті және трансшекаралық байланысты бағалау үшін географиялық ақпараттық жүйелерге (ГАЗ) негізделген көп критерийлі аналитикалық әдіс қолданылды. Зерттеу нәтижелері айтарлықтай кеңістіктік теңсіздікті көрсетеді, экологиялық маңызы жоғары аймақтар, негізінен қорғалатын аумақтармен байланысты, шектеулі қолжетімділікпен және инфрақұрылым шектеулерімен сипатталады. Талдау төрт негізгі туризм кластерін анықтады: Батыс Алтай, Орталық Алтай, Шығыс Алтай және Моңғол Алтайы, олардың әрқайсысы бірегей функционалды мамандандырылған және әртүрлі даму деңгейлеріне ие. Бұл кластерлер иерархиялық қатынастар мен трансұлттық байланыстармен ұйымдастырылған полицентрлік туризм жүйесін білдіреді. Зерттеу аймақты қақпалары, табиғи орталықтары, өсу орталықтары және этномәдени орталықтары бар тұтас жүйе ретінде тұжырымдайтын инновациялық «төрт ядролы» кеңістіктік модельді ұсынады. Бұл тәсіл бәсекелестікке қарағанда өзара толықтыру мен өзара байланысты басымдыққа ие, әділ және тұрақты туризмді дамыту үшін стратегиялық негіз ұсынады. Зерттеу нәтижелері трансшекаралық туризм жүйелерінің теориялық түсінігін байытады және таулы аймақтарда трансшекаралық ынтымақтастықты, инфрақұрылымды дамытуды және экологиялық тұрақтылықты

жақсартуға тырысатын саясаткерлер мен аймақтық жоспарлаушыларға практикалық түсініктер береді.

Түйін сөздер: трансшекаралық туризм; таулы Алтай; кеңістіктік талдау; туризм кластерлері; инфрақұрылымға қолжетімділік; тұрақты туризм.

1. Кіріспе

Шекаралық туризм ХХІ ғасырда аймақтық интеграцияның, тұрақты дамудың және трансшекаралық ынтымақтастықтың маңызды аспектісіне айналды. Соңғы жылдары шекаралас аймақтарда, әсіресе тау жоталары сияқты кеңістіктік күрделі және ресурстарға бай ортада туризмнің экономикалық әртараптандыруға, мәдени өзара әрекеттесуге және қоршаған ортаны қорғауға қосқан үлесіне ерекше назар аударылуда. Қазақстан, Ресей, Қытай және Моңғолия арқылы созылып жатқан Алтай таулары бүкіл әлемде маңызды шекаралас аймақ болып табылады, ол маңызды экологиялық маңыздылығымен, мәдени әртүрлілігімен және өмірлік геосаяси маңыздылығымен ерекшеленеді.

Соңғы онжылдықта жүргізілген зерттеулер шекаралас туризмнің байланысты жақсарту, шеткерілікті азайту және ортақ басқару жүйелерін дамыту арқылы аймақтық дамудың катализаторы бола алатынын көрсетеді (Gelbman & Timothy, 2011; Timothy, 2016). Шекаралық аймақтарда туризм көбінесе ынтымақтастықты дамытатын «көпір» ретінде қызмет етеді, сонымен бірге инфрақұрылымдағы, саясаттағы және институционалдық әлеуеттегі теңсіздіктерді анықтайды (Prokkola, 2007; Stoffelen & Ioannides, 2025). Еуразия контекстінде сарапшылар оқшауланған аймақтарды жаһандық туристік желілерге біріктіру үшін трансшекаралық туризм дәліздері мен кластерлерінің маңыздылығын атап өтеді (Więckowski, 2023; Yang & Fik, 2014).

Жақында жүргізілген зерттеулер табиғи ресурстарға негізделген туризмнің, әсіресе таулы аймақтарда, биоәртүрлілікті сақтау, климатқа төзімділік және қоғамдастыққа бағытталған дамуды қоса алғанда, тұрақты даму талаптарына көбірек тәуелді екенін көрсетеді (Baniya & Thapa, 2022; de Grosbois & Fennell, 2024). Керемет биоәртүрлілігімен және ЮНЕСКО тізіміне енгізілген ландшафттарымен танымал Алтай аймағы қоршаған ортаны қорғау мен туризмді дамытудың әлеуметтік-экономикалық пайдасы арасындағы тепе-теңдікті талап ететін осы процестердің мысалы болып табылады (Badyelgajy et al., 2025). Таулы аймақтарда экотуризм мен шытырман оқиғалы туризмнің өсуі кеңістіктік жоспарлау құралдары мен қоршаған ортаға әсерді бағалау әдіснамаларына сұранысты арттырды (Karoog & Jain, 2024; Pomfret, 2006).

Инфрақұрылымның қолжетімділігі трансшекаралық туризм ағындарын анықтайтын маңызды фактор болып табылады. Көлік желілері, шекарадан өту тиімділігі және виза саясаты келушілердің мобильділігі мен аймақтық бәсекеге қабілеттілігіне айтарлықтай әсер етеді (Kuklina et al., 2022). Көптеген трансшекаралық таулы аймақтарда инфрақұрылымның біркелкі емес дамуы кеңістіктік теңсіздікке әкеледі, кейбір түйіндер басым қақпаларға айналады, ал басқалары толық пайдаланылмайды (Ianioglo & Rissanen, 2020). Бұл құбылыс әсіресе Алтай өлкесінде байқалады, онда шекарадан өту пункттері келушілердің мүмкіндіктері мен қатысу деңгейлерінің әртүрлілігін көрсетеді, бұл дамудың біркелкі еместігіне әкеледі.

Қазіргі заманғы әдебиеттегі маңызды үрдіс - туризмді зерттеуде географиялық ақпараттық жүйелер (ГАЗ), қашықтықтан зондтау және кеңістіктік модельдеу сияқты геокеңістіктік технологияларды қолданудың артуы. Бұл құралдар туризм әлеуетін анықтауға, инфрақұрылымды жобалауды жақсартуға және функционалды туризм кластерлерін анықтауға көмектеседі (Gretzel et al., 2015; Sigala, 2020). Көп критерийлі кеңістіктік талдау экологиялық, инфрақұрылымдық және әлеуметтік-экономикалық көрсеткіштерді пайдалана отырып, туризмнің өміршеңдігін бағалау үшін кеңінен қолданылады, бұл аймақтық жоспарлау үшін берік әдіснамалық негіз ұсынады (Adeleye et al., 2023; Malczewski & Rinner, 2015).

Кластерлік әдіснамалар туризмнің кеңістіктік құрылымын түсінудің негізі ретінде де маңыздылыққа ие болды. Туризм кластерлері масштаб экономикасын ілгерілетеді, туристік бағыттардың бәсекеге қабілеттілігін арттырады және мүдделі тараптардың ынтымақтастығы арқылы инновацияны қолдайды (Novelli et al., 2006; Pechlaner et al., 2019; Porter, 1998). Шекаралық ортада кластерлер ұлттық шекаралардан тыс жерлерге таралады, бұл өзара байланысты тартымдылық, инфрақұрылым және басқару жүйелерін жасайды (Stoffelen & Vanneste, 2017). Дегенмен, Алтайды қоса алғанда, көптеген аймақтарда мұндай кластерлерді анықтау және функционалдық дифференциациялау мәселелері жеткіліксіз зерттелген күйінде қалып отыр.

Шекаралық туризмге деген қызығушылықтың артуына қарамастан, бірнеше зерттеу кемшіліктері сақталуда. Шекаралық туризмнің дамуының көп айнымалы динамикасын көрсететін интеграцияланған кеңістіктік модельдер жетіспейді. Екіншіден, Алтай аймағы бойынша эмпирикалық зерттеулер фрагменттелген және көбінесе жеке елдермен немесе нақты туризм түрлерімен шектелген. Үшіншіден, туризм жүйелеріне әсер ететін табиғи әлеует, инфрақұрылымға қолжетімділік және трансшекаралық байланыс арасындағы өзара әрекеттесуге жеткілікті көңіл бөлінбеген.

Осы кемшіліктерді жою үшін бұл зерттеу Алтай тауларында трансшекаралық туризмді дамытудың кешенді кеңістіктік негізін әзірлеуді мақсат етеді. Зерттеу үш нақты мақсатқа жетуге бағытталған:

- (1) табиғи және рекреациялық туризм әлеуетінің кеңістіктік таралуын бағалау;
- (2) инфрақұрылымға қолжетімділік пен трансшекаралық байланысты бағалау; және
- (3) ГАЖ негізіндегі көп критерийлі талдауды қолдана отырып, трансшекаралық туризм кластерлерін анықтау және модельдеу. Осы талдау негізінде зерттеу Алтай аймағын әрқайсысы нақты функционалдық рөлдерді орындайтын өзара байланысты туризм кластерлерінің тұтас жүйесі ретінде тұжырымдайтын инновациялық «төрт еселік» кеңістіктік модельді ұсынады. Бұл модель теориялық және практикалық талқылауды кеңейтеді, таулы аймақтарда трансшекаралық туризмді жоспарлау үшін масштабталатын негіз береді.

2. Материалдар мен әдістер

Бұл зерттеу Алтай тауларындағы трансшекаралық туризмнің кеңістіктік құрылымы мен даму заңдылықтарын талдау үшін географиялық ақпараттық жүйелерді (ГАЖ) көп критерийлі бағалау әдістерімен біріктіретін кешенді геокеңістіктік әдіснаманы пайдаланады. Әдіснама туризм әлеуетін, инфрақұрылымға қолжетімділікті және трансшекаралық байланыстарды бірыңғай аналитикалық шеңберде жүйелі түрде бағалауға арналған.

1-суретте көрсетілгендей, зерттеу аймағына Қазақстан, Ресей, Қытай және Моңғолия арқылы созылып жатқан Алтай трансшекаралық тау жүйесі кіреді. Карта зерттеудің географиялық негізін қамтамасыз етеді, аймақтың кеңістіктік шекараларын анықтайды және оның күрделі физикалық ерекшеліктерін, соның ішінде көрнекті тау жоталарын, іргелес аймақтарды және маңызды аймақтық орталықтарды көрсетеді. Бұл географиялық көрініс барлық кейінгі геокеңістіктік зерттеулер үшін маңызды негіз болып табылады, аумақтық шекараларды, табиғи шектеулерді және аймақтық байланыстарды анықтауға көмектеседі. Әдіснамалық негіз бірнеше кеңістіктік және статистикалық деректер жиынтығын біріктіруге негізделген. Бұған табиғи ландшафттар, биіктіктер мен жер бедерінің ерекшеліктері, ерекше қорғалатын табиғи аумақтар (ЕҚТА), көлік желілері және туризм инфрақұрылымы туралы географиялық деректер кіреді. Сонымен қатар, толық көрініс алу үшін келушілер ағыны, аймақтың әлеуметтік-экономикалық дамуы және инфрақұрылымға қолжетімділік сияқты статистикалық көрсеткіштер ескеріледі. Барлық деректер жиынтығы стандартталған, географиялық сілтемелермен расталған және ұлттық шекаралар бойынша аналитикалық сәйкестік пен салыстыруды қамтамасыз ету үшін ГИС аясында өңделген. Кеңістіктік деректерді өңдеу және картографиялау ArcGIS Pro (ESRI, версия 3.1) және QGIS (нұсқа 3.28) бағдарламалық құралдарында жүзеге асырылды.



Сурет 1. Алтай трансшекаралық таулы аймағының географиялық орналасуы. Дереккөз: ESRI физикалық әлем картасы негізінде авторлармен құрастырылған

Көп критерийлі бағалау иерархиялық процесс (Analytic Hierarchy Process, АНП) негізінде салмақталған қабаттастыру (weighted overlay) әдісімен жүзеге асырылды; негізгі критерийлерге жол-көлік желісіне дейінгі қашықтық, абсолюттік биіктік, ЕҚТА мәртебесі, шекаралық өткізу пунктіне дейінгі қашықтық және туристік инфрақұрылымның тығыздығы кірді, ал критерий салмақтары сарапшылық бағалау арқылы анықталды. Деректер көзі ретінде Қазақстан Республикасы Ұлттық статистика бюросының, Ресей Федерациясы Росстатының, Қытай мен Моңғолия ұлттық статистикалық агенттіктерінің ресми есептері, OpenStreetMap векторлық қабаттары және SRTM/Sentinel-2 деректері (30 м кеңістіктік ажыратымдылық) пайдаланылды. Аймақ ішіндегі негізгі өзара байланысты бағалау үшін кеңістіктік талдау әдістері қолданылады. Бұған көлік желілерінің қолжетімділігін зерттеу, инфрақұрылым мен шекара өткелдерінің әсерін бағалау үшін жақындықты талдау және туристік ресурстар мен қызметтердің кеңістіктік таралуын талдау кіреді. Бүкіл трансшекаралық аймақтағы туризмнің біркелкі емес дамуын түсіну үшін қажетті қолжетімділік айырмашылықтары мен кеңістіктік айырмашылықтарды анықтауға ерекше назар аударылады.

Туризмнің кеңістіктік ұйымдастырылуын жақсырақ түсіну үшін кластерлік тәсіл қолданылады. Бұл зерттеу аймағын ресурстармен қамтамасыз ету, қолжетімділік және даму қарқындылығының ұқсастықтарына негізделген функционалдық тұрғыдан ерекшеленетін туристік аймақтарға бөлуді жеңілдетеді. Кластерлеу нәтижелері маңызды туристік хабтарды құруды қоса алғанда, шоғырлану мен шашыраңқылықтың аймақтық үлгілерін көрсетеді.

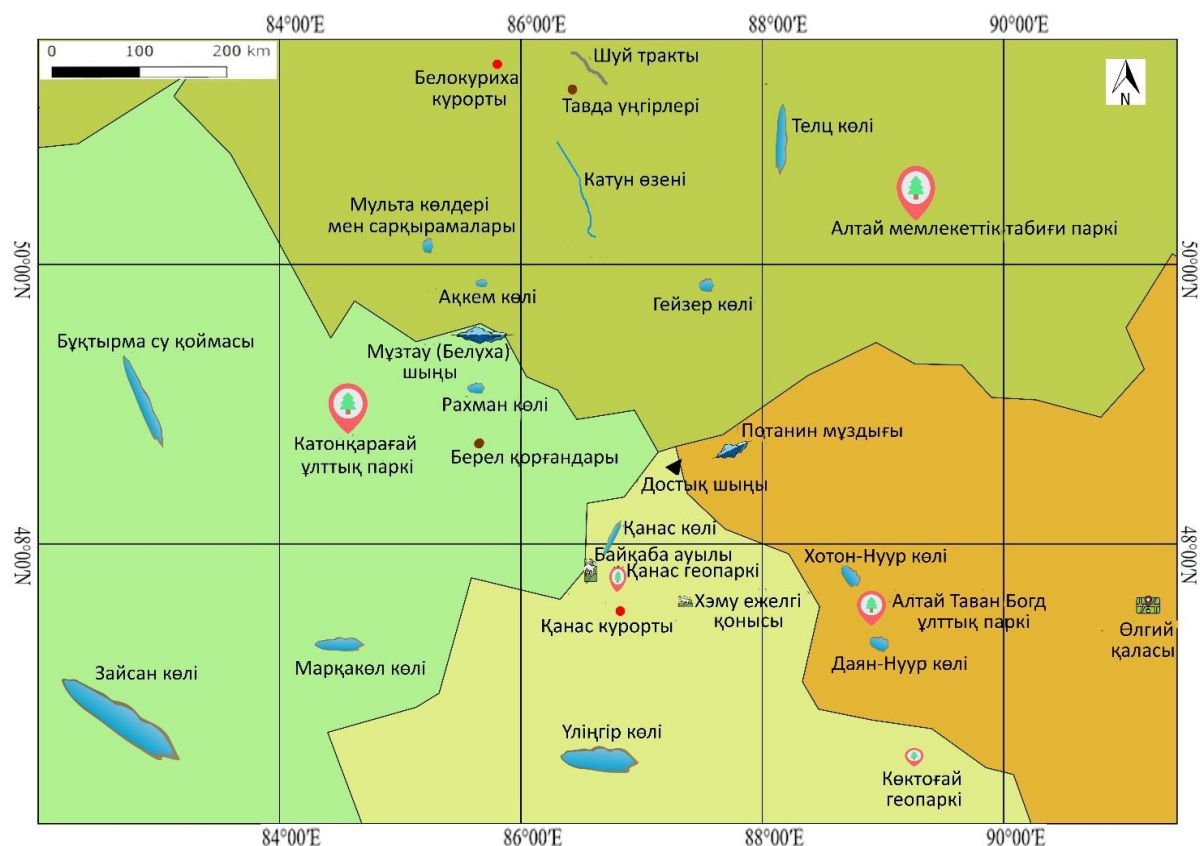
Зерттеу нәтижелері тұжырымдамалық «төрт еселік» кеңістіктік парадигмаға біріктірілген. Бұл модель Алтай өлкесі бойынша туризмді дамытудың иерархиялық ұйымдастырылуын және функционалдық мамандануын көрсетеді және орталық аймақтар мен шеткі аймақтар арасындағы өзара байланысты анықтайды. Модель трансшекаралық туризм жүйесінің жан-жақты және аналитикалық тұрғыдан негізделген сипаттамасын ұсынады. Әдістеме күрделі трансшекаралық туризм жүйелерін зерттеу үшін қатаң және жүйелі негізді қамтамасыз етеді. Бұл жұмыс трансшекаралық таулы аймақтарда дәлелді стратегиялық жоспарлауды қолдау үшін геокеңістіктік талдауды көп критерийлі бағалаумен және кеңістіктік модельдеумен біріктіреді.

3. Нәтижелер

Бұл бөлімде табиғи ресурстардың қолжетімділігі және инфрақұрылымға қолжетімділік тұрғысынан Таулы Алтайдың туристік әлеуетінің аймақтық өзгергіштігі бағаланады. Зерттеу нәтижелері айтарлықтай кеңістіктік теңсіздікті көрсетеді, құнды табиғи аумақтар көбінесе шектеулі қолжетімділік аймақтарында орналасқан, бұл тұрақты туризмді дамыту үшін әлеуетті де, шектеулерді де білдіреді.

3.1. Табиғи және рекреациялық әлеует

Кеңістіктік зерттеу Таулы Алтайдың тығыз және күрделі табиғи және рекреациялық базасы бар екенін, оның тау-тайга экожүйелерімен, альпілік ландшафттармен және кең мұздық-гидрологиялық жүйелермен сипатталатынын көрсетті. Туризм әлеуеті ең жоғары аймақтар ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың таралуымен тығыз байланысты, бұл қорғалатын аумақтар негізгі туристік ресурстар болып табылатынын көрсетеді.



Сурет 2. Алтай тауларындағы қорғалатын аумақтар мен негізгі туристік ресурстардың кеңістіктік таралуы (авторлар құрастырған)

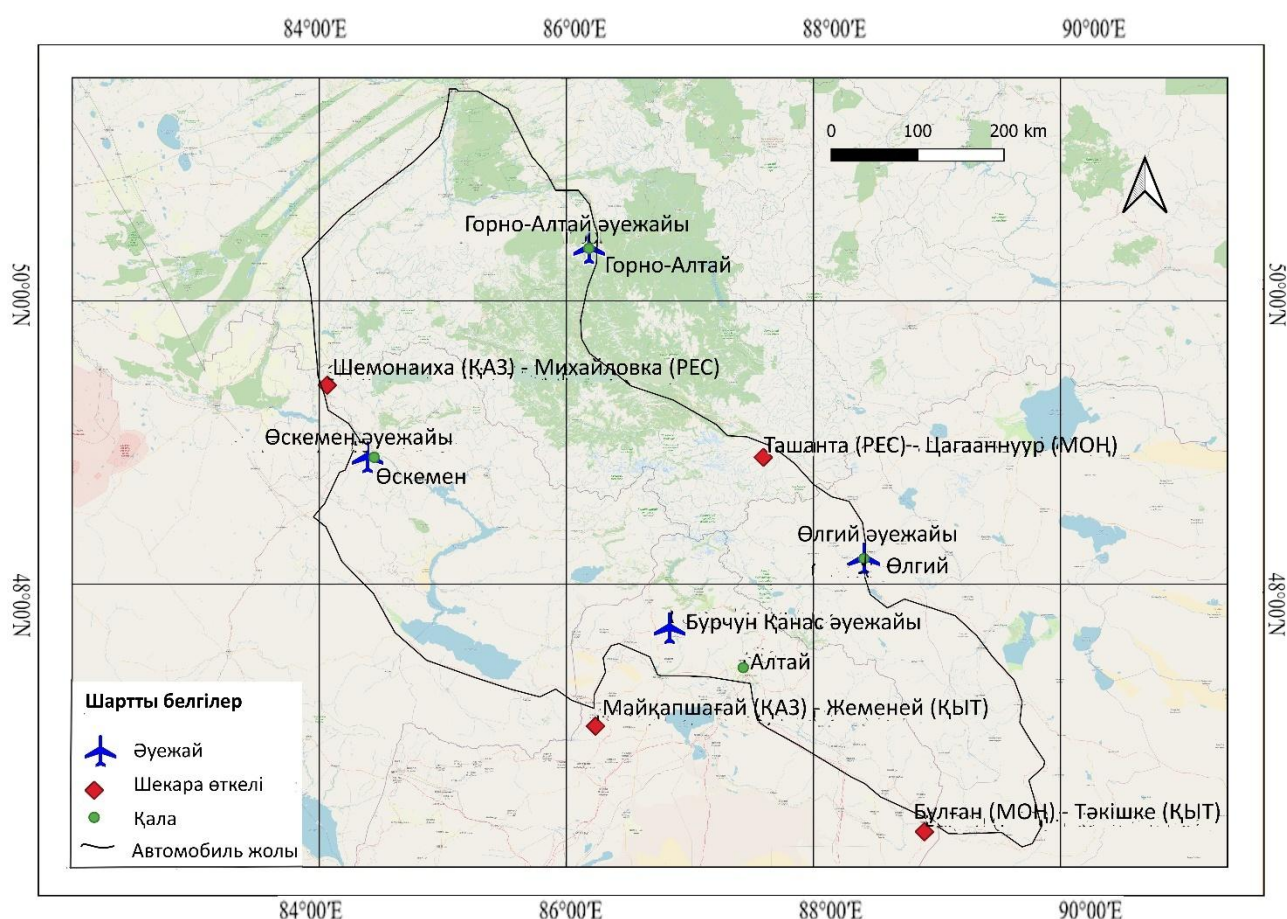
2-сурет құнды табиғи ресурстардың төрт негізгі аймақ бойынша таралуын анық көрсетеді: (1) Қазақстандағы Катонқарағай аймағы, (2) Ресейдегі Белуха таулары, (3) Қытайдағы Қанас көлі жүйесі және (4) Моңғолиядағы Алтай-Таван-Богд аймағы. Бұл аумақтар ландшафттың үздіксіздігімен және биоәртүрліліктің артуымен сипатталатын трансшекаралық экологиялық желіні құрайды.

Тау дәліздері бойындағы қорғалатын аумақтардың кеңістіктік таралуы аймақтың экологиялық тұтастығын атап көрсетеді және туризмнің қарқынды өсуіне шектеулерді көрсетеді. Қорғалатын аумақтар мен туристік орындардың қабаттасуы болашақ дамуға төмен әсер ететін экотуризм модельдеріне баса назар аудару керектігін көрсетеді.

Алтай өлкесінің туристік әлеуеті ең алдымен оның ресурстарымен анықталады, ал қорғалатын аумақтар туризмді дамытудың негізгі негізі болып табылады. Дегенмен, олардың реттеуші мәртебесі табиғатты қорғау мен реттелетін туризмді пайдалану арасындағы тепе-теңдікті талап етеді.

3.2. Инфрақұрылымға қолжетімділік

Инфрақұрылымға қолжетімділікті талдау Алтай өлкесі бойынша көлік байланысы мен шекара өткізгіштігіндегі айтарлықтай аймақтық айырмашылықтарды анықтады. Ұлттық көлік бағыттарымен байланысқан аймақтарда қолжетімділік ең жоғары, ал шалғай таулы аудандар салыстырмалы түрде оқшауланған күйінде қалып отыр.



Сурет 3. Алтай тауларындағы трансшекаралық көлік және логистикалық желі және шекаралық өткізу пункттері (авторлар құрастырған)

Сурет көлік инфрақұрылымының диспропорционалды таралуын көрсетеді, негізгі жол дәліздері негізінен Қазақстан-Қытай және Қазақстан-Ресей осьтері бойымен орналасқан, ал

Моңғолия мен Ресейдің биік таулы аймақтарында желі онша тығыз емес. Шекаралық өткізу пункттері стратегиялық тұрғыдан орналасқан, бірақ сыйымдылығы мен функционалдығы бойынша айтарлықтай айырмашылықтарды көрсетеді.

Кесте 1. Алтай тауларындағы негізгі шекаралық өткізу пункттерінің сипаттамалары (2024)

Шекаралық өткізу пункттері	Елдер	Мәртебесі	жылдық сыйымдылығы (адам)	туристердің үлесі (%)
Шемонаиха–Михайловка	Қазақстан–Ресей	Халықаралық тас жол	~1.5–2.0 миллион	10–15%
Майқапшағай–Джимунай	Қазақстан–Қытай	Халықаралық тас жол	~0.8–1.2 миллион	20–30%
Ташанта–Цагааннуур	Ресей–Моңғолия	Халықаралық тас жол	~50,000–80,000 мың	60–70%
Бұлған–Такашкен	Моңғолия – Қытай	Халықаралық тас жол	~25,000–70,000 мың	30–40%

Ескерту: 1-кестеде келтірілген деректер автормен ұлттық статистикалық есептердің, аймақтық зерттеулердің және Алтай өлкесіндегі трансшекаралық туризм мен көлік қолжетімділігі бойынша бұрынғы зерттеулердің қысқаша мазмұны негізінде жинақталған және бағаланған (мысалы, (Kuklina et al., 2022; Tanina et al., 2022)). Пайыздық үлес әрбір ШӨП арқылы өтетін трансшекаралық туристердің тиісті ұлттық/өңірлік ағынға қатысты үлесін білдіреді, сондықтан бағандар бойынша қосынды 100 %-ды құрамайды

Кестеде төрт негізгі шекаралық өткізу пункттері (ШӨП) салыстырылады. Зерттеу үш негізгі заңдылықты анықтады:

Шекаралық өткізу пункттерінің (ШӨП) функционалдық мамандануы. Шемонаиха-Михайловка және Майқапшағай-Джимунай сияқты өткізу қабілеті жоғары ШӨП негізгі транзиттік бағыттар ретінде қызмет етеді, бірақ Ташанта-Цагааннуур туризмге бағытталған, туристік ағындардың айтарлықтай үлкен үлесін құрайды.

Туристік таралудағы асимметрия. Шемонаиха-Михайловка дәлізінің басым болуы (туристік ағындардың 68,3%-ы) кеңістіктік теңгерімсіздікті көрсетеді, трансшекаралық туризм қызметінің көпшілігі бір түйінге шоғырланған.

Инфрақұрылымдық шектеулер. Өткізу қабілеті төмен ШӨП, әсіресе Моңғолия мен Қытай арасындағы, айналадағы аймақтардың айтарлықтай табиғи әлеуетіне қарамастан, туристік ағындардың өсуіне кедергі келтіреді.

Инфрақұрылымның қолжетімділігі трансшекаралық туризмді дамытуға айтарлықтай кедергі болып табылады. Шекарадан өтуді пайдалану мен көлік байланыстарындағы айырмашылықтар кеңістіктік дамудың біркелкі болмауына әкеледі және үйлестірілген инфрақұрылымды жобалау қажеттілігін көрсетеді.

3.3. Туристік кластерлерді анықтау

Көп критерийлі ГИС негізіндегі талдауды пайдалана отырып, әрқайсысының өзіндік кеңістіктік рөлі, ресурстық базасы және даму жолы бар төрт негізгі трансшекаралық туризм кластері анықталды. Олар келесідей жіктелді:

- Батыс Алтай кластері (Қазақстан-Ресей) – денсаулық сақтау және орман туризміне бағытталған салыстырмалы түрде қолжетімді кластер.
- Орталық Алтай кластері (Белуха) – шытырман оқиғалы және альпілік туризм үшін айтарлықтай әлеуеті бар ірі биік таулы туризм аймағы.
- Шығыс Алтай кластері (Қазақстан-Қытай) – бұқаралық және экотуризм үшін айтарлықтай әлеуеті бар жылдам дамып келе жатқан аймақ.

• Моңғол Алтай кластері – этнотуризм мен шытырман оқиғалы туризмге маманданған шалғай, бірақ мәдени тұрғыдан бай аймақ.

Кластерлердің кеңістіктік таралуы табиғи географияны да, геосаяси шекараларды да көрсетеді, бұл бірыңғай басым орталық емес, полицентрлік туризм жүйесіне әкеледі.

Кесте 2. Туризм кластерлерінің кеңейтілген салыстырмалы сипаттамалары

Кластер	Аудан ы (km ²)	ЕҚТА үлесі (%)	Орташа қолжеті мділік (минима лды)	Туристік ағын (2024, мың адам)	Шека ра пункт тері	Мамандану ы	Негізгі көрікті жерлер	Кеңістік тік рөл
Батыс Алтай (Қазақст ан)	~13,00 0	35– 45%	180–240	~885	2	Экотуризм, орман туризмі	Катон- Қарағай ұлттық саябағы, Рахман бұлақтары	Гейтвей кластері
Орталық Алтай (Белуха, Ресей)	~92,60 0	25– 30%	240–360	~2,700	1	Альпинизм, шытырман оқиғалы туризм	Белуха тауы, Телецкое көлі	Негізгі табиғи кластер
Шығыс Алтай (Қытай Алтайы)	~120,0 00+	15– 25%	120–180	~8,500	1–2	Жаппай туризм, этнотуризм	Қанас көлі, Алтай таулары	Әлеуетті өсу аймағы
Моңғол Алтайы	~200,0 00+	20– 30%	300–600	~25–53	2	Экотуризм, этнотуризм	Алтай Таван Богд ұлттық саябағы	Экстрема лды және этнотури зм орталығы

Ескерту: 2-кестеде келтірілген деректер автормен ұлттық статистикалық есептердің, аймақтық зерттеулердің және Алтай өлкесіндегі трансшекаралық туризм мен көлік қолжетімділігі бойынша бұрынғы зерттеулердің қысқаша мазмұны негізінде жинақталған және бағаланған (мысалы, (Badyelgajy et al., 2025; Kuklina et al., 2022))

Кластерлерді салыстырмалы талдау бірнеше маңызды қорытынды жасауға мүмкіндік береді:

Масштаб пен қарқындылықтағы айырмашылықтар. Шығыс Алтай кластерінде туристік ағын ең көп (~8,5 миллион адам, 2024 жылғы ұлттық статистикалық есептер бойынша, негізінен ішкі және өңіраралық турист ағындарын қамтитын жиынтық көрсеткіш), бұл нарықтың жоғары сұранысы мен дамыған инфрақұрылымын көрсетеді. Керісінше, Моңғол Алтай кластерінің географиялық аумағы кең, бірақ туризм қарқындылығы төмен.

Қолжетімділік градиенті. Батыс және Шығыс Алтай кластерлері қолжетімдірек, ал Орталық және Моңғол кластерлері онша қолжетімді емес, бұл олардың туризм мамандануына әсер етеді.

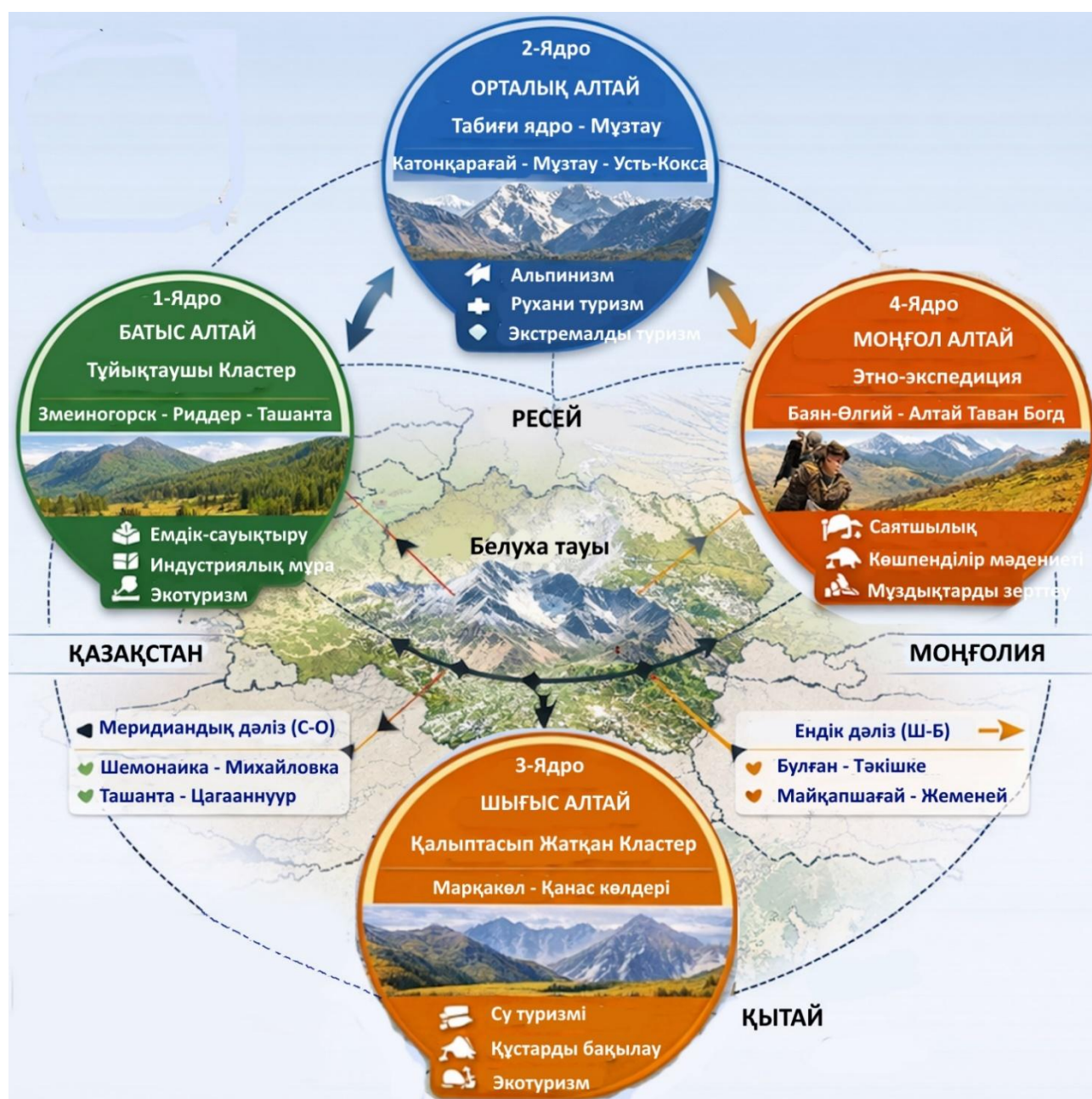
Функционалдық мамандану. Әрбір кластердің өзіндік ерекше туризм профилі бар, атап айтқанда экотуризм (батыс), шытырман оқиғалы туризм (орталық), бұқаралық туризм (шығыс) және этномәдени туризм (моңғол), бұл бәсекелестік емес, өзара толықтырушы қарым-қатынастарды білдіреді.

Кеңістіктік рөлдер: Кластерлер аймақтық туризм жүйесін құрайтын шлюздердің, өзектердің, өсу орталықтарының және перифериялық түйіндердің иерархиялық жүйесін білдіреді.

Алтай туризм жүйесін функционалды түрде ерекшеленетін кластерлер желісі ретінде сипаттаған дұрыс. Бұл кластерлік құрылым трансшекаралық туризмнің үйлесімді дамуы мен мамандануының негізін қалайды.

3.4. Трансшекаралық туризмнің кеңістіктік моделі

Трансшекаралық туризмнің кеңістіктік моделі. Кеңістіктік талдау және кластерді анықтау негізінде Алтай өлкесіндегі трансшекаралық туризмнің өсуін түсіндіру және ынталандыру үшін тұжырымдамалық «төрт ядролы» модель ұсынылған.



Сурет 4. Алтай тауларындағы трансшекаралық туризмді дамытудың «Төрт ядролы» кеңістіктік моделі (авторлар құрастырған)

4-суреттегі модель аймақты төрт өзара тәуелді өзегі бар өзара байланысты жүйе ретінде қарастырады:

Шлюз орталығы (Батыс Алтай). Салыстырмалы түрде жақсы дамыған инфрақұрылымы және тамаша көлік қолжетімділігі бар негізгі кіру нүктесі ретінде қызмет етеді.

Табиғи орталық (Орталық Алтай). Биік таулы ландшафттармен және әйгілі көрікті жерлермен сипатталатын аймақтың биологиялық және символикалық жүрегі.

Өсу орталығы (Шығыс Алтай). Туризмге деген сұраныс пен Қытаймен трансшекаралық байланыстармен қамтамасыз етілген, жоғары даму әлеуеті бар динамикалық дамып келе жатқан аймақ.

Этномәдени өзек (Моңғол Алтайы). Мамандандырылған тауаша туризм тәжірибесін ұсынатын шеткері, бірақ ерекше мәдени орта.

Модель бәсекелестікке емес, негізгі кәсіпорындардың өзара толықтырылуына және өзара байланыстылығына бағытталған және үш негізгі аспектіні қамтиды:

- Кеңістіктік иерархия.
- Функционалдық мамандану.
- Шекаралық байланыстар.

Ұсынылған төрт ядролы модель трансшекаралық туризмнің теңгерімді және тұрақты өсуі үшін стратегиялық негіз ретінде қызмет етеді. Онда Алтай туризм секторының жалпы бәсекеге қабілеттілігін арттыру үшін инфрақұрылымды, қоршаған ортаны қорғауды және аймақтық ынтымақтастықты біріктіру қажеттілігі атап өтілген.

4. Талқылау

Бұл зерттеудің нәтижелері Алтай тауларындағы трансшекаралық туризмнің дамуы табиғи ресурстардың қолжетімділігінің, инфрақұрылымның қолжетімділігінің және трансшекаралық байланыстың күрделі өзара әрекеттесуіне байланысты екенін көрсетеді. Бұл тұжырым экологиялық тұрғыдан маңызды шекаралас аймақтардың институционалдық фрагментация мен инфрақұрылымдағы теңсіздікке байланысты дамудың біркелкі емес үлгілерін көрсететін басқа зерттеулермен сәйкес келеді. Алтай аймағында жүргізілген зерттеулер бай биоәртүрлілік пен кең қорғалатын аумақтар туризмнің дамуын қолдайтын және сонымен бірге ірі инфрақұрылым құрылысына реттеуші шектеулер қоятын ұқсас динамиканы көрсетеді (Han et al., 2024).

Туризмнің дамуының табиғи және қорғалатын аумақтарға айтарлықтай тәуелділігі туралы осы зерттеудің нәтижелері трансшекаралық туризм жүйелеріндегі экологиялық активтердің маңыздылығын атап өткен бұрынғы зерттеулермен сәйкес келеді. Алтай тауларында жүргізілген жақында жүргізілген зерттеулер трансшекаралық экологиялық желілер мен табиғатты қорғау дәліздері биоәртүрлілікті қорғап қана қоймай, сонымен қатар туризмнің өсуі үшін кеңістіктік негіз жасайтынын көрсетеді (Han et al., 2024). Алтай өлкесіндегі тұрақты туризм бойынша зерттеулер экотуризм мен табиғатты қорғау туризмінің ұлттық шекаралар арқылы жақсы үйлестірілген кезде табиғатты қорғауға және жергілікті әлеуметтік-экономикалық дамуға үлес қоса алатынын көрсетеді (Samgar et al., 2025). Бұл зерттеу экологиялық активтердің туризм кластерлерінің кеңістіктік конфигурациясын және олардың функционалдық мамандануын анықтайтынын көрсету арқылы алдыңғы нәтижелерді толықтырады.

Бұл зерттеу инфрақұрылымға қолжетімділік пен шекарадан өтуді пайдаланудағы айтарлықтай аймақтық айырмашылықтарды анықтау арқылы да маңызды үлес қосады. Бұл нәтиже көлік желілерінің тұрақты еместігі мен шекара өткізгіштігінің трансшекаралық аймақтарда туризмді әділ дамытуға кедергі келтіретінін көрсететін бұрынғы зерттеулермен сәйкес келеді. Шекаралық туризм жүйелерін зерттеу инфрақұрылым дәліздерінің көбінесе туристік ағындарды белгілі бір түйіндерге шоғырландыратынын, бұл «қақпа үстемдігіне» әкелетінін және шеткі аймақтардың дамуын шектейтінін көрсетті. Туризм қызметі қолжетімді аймақтарда және негізгі көлік дәліздері бойында шоғырланатын Алтай өлкесінде де осындай

үрдістер байқалды (Dunets et al., 2020). Осындай нәтижелер Оңтүстік Африкадағы Каванго-Замбези трансшекаралық қорық аймағын қоса алғанда, басқа да трансшекаралық аймақтарда байқалды, онда инфрақұрылымның дамуы туристер ағынын жеңілдетті, сонымен бірге негізгі және шеткі аймақтар арасындағы географиялық айырмашылықтарды күшейтті. Атап өту қажет, Шығыс Алтай (~8,5 млн) мен Моңғол Алтайы (~25–53 мың) арасындағы ағын көрсеткіштеріндегі елеулі алшақтық жүйенің толық теңгерімді, өзара толықтырушы сипатынан гөрі, қазіргі уақытта бір орталыққа (Қытай Алтайы) едәуір тәуелді екенін де көрсетуі мүмкін; бұл мәселе сыни тұрғыдан әрі қарайғы зерттеулерде, оның ішінде шекара өткізгіштігі индексі (border permeability index) сияқты сандық көрсеткіштерді қолдану арқылы тереңдетілуі тиіс.

Бұл зерттеуде табылған кластерге негізделген кеңістіктік ұйым туристік бағыттарды функционалды түрде ерекшеленетін түйіндер желілері ретінде анықтайтын бұрынғы теориялық негіздерді нығайтады. Алтай өлкесінде жүргізілген бұрынғы зерттеулер ортақ табиғи және мәдени ресурстарды пайдалана отырып, трансшекаралық туризм кластерлерін құру мүмкіндігін зерттеді (Selezneva & Rotanova, 2021). Дегенмен, бұл зерттеулердің көпшілігі сипаттамалық немесе нақты кіші аймақтармен шектелген. Бұл зерттеу Алтай жүйесіндегі төрт негізгі кластерді анықтап, олардың иерархиялық рөлдерін, соның ішінде шлюз, негізгі, өсу және шеткі әрекеттерді зерттейтін кешенді көзқарасты ұсынады. Бұл тұжырым кластерлер арасындағы мамандану мен өзара толықтыру туристік бағыттың жалпы бәсекеге қабілеттілігін арттырады деп тұжырымдайтын кеңірек туризм кластері теориясымен сәйкес келеді.

Porter (1998) кластерлер теориясынан басқа, ұсынылған модель полицентрлік және «қақпа» (gateway) туризм модельдерінің дәстүрлі көзқарасынан ерекшеленеді: соңғылары негізінен орталықтар арасындағы иерархия мен бәсекелестікке назар аударса, «төрт ядролы» модель функционалдық мамандануы әртүрлі ядролардың теңдей маңызды әрі өзара толықтырушы екенін тұжырымдайды, бұл шекара маңы туризмі теориясында жеткілікті зерттелмеген аспект болып табылады. Ұсынылған «төрт еселік» кеңістіктік модель трансшекаралық туризм жүйелерін түсінудегі тұжырымдамалық ілгерілеуді білдіреді. Ол бағыттардың бәсекелестігіне бағытталған стандартты модельдерден айырмашылығы, кеңістіктік бірліктердің өзара толықтырылуы мен өзара байланыстылығын атап көрсетеді. Бұл көзқарасты трансшекаралық ынтымақтастық бойынша зерттеулер қолдайды, бұл үйлестірілген басқару және бірлескен даму стратегиялары аймақтық интеграцияны және туризмнің тұрақтылығын жақсартатынын көрсетеді (Dunets, 2019). Алтай контекстінде трансшекаралық ынтымақтастық механизмдерін қоса алғанда, қазіргі институционалдық шаралар ұлттық шекаралар арқылы ынтымақтастық пен мәдени алмасуды ілгерілетуге бағытталған (An et al., 2023). Бұл зерттеуде жасалған модель осы бағдарламаларға кеңістіктік өлшем қосады, инфрақұрылымды дамытуды, табиғатты қорғау жұмыстарын және туризмді жоспарлауды синхрондау үшін негіз жасайды.

Сонымен қатар, бұл зерттеудің нәтижелері бүкіл әлемдегі басқа трансшекаралық таулы аймақтардағы тәжірибелерге ұқсас. Карконоше/Карконоше трансшекаралық биосфералық қорығы ортақ табиғи ресурстарды бірлесіп басқару табиғатты қорғауды да, кең таралған туризмді дамытуды да қалай қолдай алатынын көрсетеді, бұл жыл сайын миллиондаған адамдарды тартады. Алтай аймағындағы сияқты, бұл жүйелер туризмді қоршаған ортаны қорғаумен біріктіруге мүмкіндік беретін үйлестірілген басқару құрылымдары мен функционалдық аймақтарға негізделген. Бұл институционалданған еуропалық елдерден айырмашылығы, Алтай аймағы саясатты үйлестіру, инфрақұрылымды интеграциялау және ұлттық шекаралардағы біркелкі емес дамумен байланысты қиындықтарға тап болуда.

Осы нәтижелерге қарамастан, зерттеуде әрі қарай зерттеуді қажет ететін бірнеше мәселелер де атап өтілген. Кейбір шекаралық өткелдердің таралуы және шеткі кластерлерге шектеулі қолжетімділік инфрақұрылымды әділ дамыту қажеттілігін көрсетеді. Сонымен қатар, ұлттық туризм саясатындағы, нормативтік базалардағы және инвестициялық мүмкіндіктердегі айырмашылықтар кешенді шекаралық жоспарларды жүзеге асыруға кедергі

келтіруі мүмкін. Шекаралық туризмге бағытталған зерттеуде бұл кедергілер жалпы алғанда мойындалады, тұрақты нәтижелерге қол жеткізу үшін институционалдық үйлестіру мен көп деңгейлі басқарудың маңыздылығы атап өтіледі. Бұл зерттеу Алтай тауларындағы шекаралық туризмді дамытудың кешенді кеңістіктік талдауын ұсыну арқылы бар білім базасын кеңейтеді. Бұл тәсіл ГАЗ негізіндегі талдауды кластерге негізделген тұжырымдамалық модельмен біріктіру арқылы туризм жүйелерін қалыптастырудағы қоршаған орта, инфрақұрылымдық және геосаяси элементтер арасындағы өзара байланысты жақсы түсінуге мүмкіндік береді. Ұсынылған құрылым қазіргі зерттеулермен үйлесімді және Альпі тауларының қиын жағдайларында трансшекаралық туризмнің кеңістіктік ұйымдастырылуы мен стратегиялық дамуына жаңа түсініктер береді.

5. Қорытынды

Бұл зерттеу Алтай тауларындағы трансшекаралық туризмнің өсуіне кешенді кеңістіктік талдау жасайды, табиғи ресурстар әлеуетін, инфрақұрылымның қолжетімділігін және трансшекаралық байланысты бірыңғай аналитикалық негізге біріктіреді. Нәтижелер аймақтағы туризмнің дамуы айтарлықтай біркелкі емес және құрылымдық жағынан әртүрлі екенін көрсетеді, бұл қоршаған орта ресурстары мен инфрақұрылым шектеулерінің өзара әрекеттесуіне байланысты.

Зерттеу нәтижелері қорғалатын аумақтар туризмді дамытудың негізгі негізі болып табылатынын, аймақтың туристік тартымдылығын қолдайтын трансшекаралық экологиялық желіні құрайтынын көрсетеді. Сонымен қатар, көлік инфрақұрылымы мен шекарадан өту мүмкіндіктеріндегі айтарлықтай айырмашылықтар кеңістіктік теңгерімсіздікті тудырады, туризмді шектеулі қолжетімді түйіндерге шоғырландырады және шалғай аймақтарды ескермейді. Төрт негізгі туризм кластерін - Батыс Алтай, Орталық Алтай, Шығыс Алтай және Моңғол Алтайын анықтау бірегей мамандану мен иерархиялық функциялармен сипатталатын полицентрлік және функционалдық жағынан әртүрлі туризм жүйесін көрсетеді. Осы деректерге сүйене отырып, бұл мақалада Алтай өлкесін қақпалардан, табиғи орталықтардан, өсу орталықтарынан және этномәдени орталықтардан тұратын өзара байланысты жүйе ретінде тұжырымдайтын инновациялық «төрт еселік» кеңістіктік модель ұсынылған. Бұл парадигма дәстүрлі бәсекеге қабілетті модельдерден айырмашылығы, өзара толықтыруды, географиялық интеграцияны және трансшекаралық ынтымақтастықты баса көрсетеді. Зерттеу географиялық талдауды тұжырымдамалық модельдеумен біріктіру арқылы трансшекаралық туризмді зерттеудің теориялық негізін кеңейтеді, бұл әртүрлі таулы аймақтарға қолайлы масштабталатын әдіснаманы ұсынады.

Ұсыныстар:

Бұл зерттеудің нәтижелері трансшекаралық туристік дамумен айналысатын саясаткерлер, аймақтық жоспарлаушылар және мүдделі тараптар үшін маңызды.

Ең алдымен, трансшекаралық инфрақұрылым мен қолжетімділікті жақсартуға басымдық берілуі керек. Шекарадан өтуді пайдалану мен көлік байланысындағы анықталған теңсіздік көлік дәліздеріне синхрондалған инвестициялардың, шекаралық бақылау пункттерін жақсартудың және трансшекаралық процестерді оңтайландырудың қажеттілігін көрсетеді. Кедей кластерлерге, әсіресе Моңғолия мен биік таулы аймақтарға қолжетімділікті арттыру туристік ағындарды әділ бөлуді қамтамасыз етеді.

Екіншіден, трансшекаралық басқаруды және институционалдық ынтымақтастықты күшейту қажет. Алтай аймағы әртүрлі саяси құрылымдары бар әртүрлі ұлттық билік органдарын қамтиды, бұл туризмнің үйлесімді дамуына кедергі келтіруі мүмкін. Бірлескен басқару жүйелерін енгізу, туризм ережелерін стандарттау және трансшекаралық бағыт брендингін дамыту аймақтық бірлік пен бәсекеге қабілеттілікті арттырады.

Үшіншіден, аймақтың экологиялық сезімталдығына байланысты тұрақты және табиғатқа негізделген туризм модельдерін қолдау өте маңызды. Туризмді дамыту мен қорғалатын табиғи аумақтар арасындағы өзара байланысты ескере отырып, саясат төмен әсер

ететін туризмге, экотуризмге және қоғамдастыққа бағытталған жобаларға баса назар аударуы керек. Бұл стратегия туризмнің жергілікті экономиканы нығайта отырып, табиғатты қорғау мақсаттарына көмектесетініне кепілдік береді. Төртіншіден, кластерге негізделген даму жоспарын пайдалану туризм жүйесінің тиімділігі мен тұрақтылығын арттыра алады. Әрбір кластердің бірегей функционалдық рөлдерін анықтау Батыс Алтайдағы шлюз инфрақұрылымын дамытуды, Орталық Алтайдағы биік таулы туризмді басқаруды қолдауды, Шығыс Алтайдағы реттелетін өсуді жеңілдетуді және Моңғол Алтайындағы мәдени туризмді насихаттауды қоса алғанда, мақсатты саяси араласуларды жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Сайып келгенде, кеңістіктік жоспарлау мен геоақпараттық құралдарды саясатты әзірлеуге енгізу шешім қабылдау процестерін айтарлықтай жақсарты алады. Бұл зерттеу ГАЖ негізіндегі талдау мен кеңістіктік модельдеу туризм әлеуеті, қолжетімділігі және аймақтық теңсіздік туралы маңызды түсініктер беретінін көрсетеді. Бұл технологияларды аймақтық жоспарлау шеңберлеріне біріктіру туризмнің өсуіне арналған дәлелді және икемді стратегияларды жеңілдетеді.

Бұл зерттеу жан-жақты кеңістіктік шеңберді ұсынады; дегенмен, трансшекаралық туризм динамикасын түсінуді жақсарту үшін қосымша зерттеулер қажет. Болашақ зерттеулер туристік дамудағы уақытша ауытқуларды бағалау үшін бойлық деректерді біріктіруі, кеңістіктік эконометрика немесе құрылымдық теңдеулерді модельдеу сияқты сандық модельдеу әдістерін пайдалануы және жергілікті қауымдастықтар мен мүдделі тараптар желілерінің туризм нәтижелеріне әсерін зерттеуі мүмкін.

Бұл зерттеу Алтай таулары аймағындағы трансшекаралық туризмнің тұрақты дамуы экологиялық қорғаудың, инфрақұрылымдық дамудың және біртұтас кеңістіктік шеңбердегі трансшекаралық ынтымақтастықтың үйлесуіне негізделгенін атап көрсетеді. Ұсынылған «төрт негізгі» модель осы интеграцияны жеңілдету және аймақтың халықаралық деңгейде көрнекті трансшекаралық туризм бағыты ретіндегі мәртебесін арттыру үшін стратегиялық негізді қамтамасыз етеді.

6. Қосымша материалдар: Бұл мақалаға қатысты қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация – И.А.; әдістеме – И.А., Г.К.; бағдарламалық қамтамасыз ету – И.А.; валидация – И.А., Г.К., А.С., З.М., М.Ғ., М.М.; формальды талдау – И.А., Г.К., А.С., З.М., М.Ғ., М.М.; зерттеу – И.А., Г.К., А.С., З.М., М.Ғ., М.М.; ресурстар – И.А., Г.К.; деректер кураторы – И.А.; жазу – түпнұсқа жоба – И.А., Г.К., А.С., З.М., М.Ғ., М.М.; жазу – рецензиялау және редакциялау – И.А.; визуализация – И.А., Г.К., А.С., З.М., М.Ғ., М.М.; қадағалау – И.А., Г.К.; жобаны басқару – И.А., Г.К., А.С., З.М., М.Ғ., М.М.; қаржыландыруды сатып алу – И.А. Барлық авторлар танысып мақаланы жариялауға келіседі.

8. Автор туралы ақпарат

Ақбар, Иманалы – Ph.D., доцент, Үздіксіз және кәсіби білім беру орталығы, Калифорния университеті, Дэвис, Калифорния штаты, АҚШ; iakbar@ucdavis.edu, <https://orcid.org/0000-0001-5531-4179>

Кубесова, Гүлнар – география ғылымдарының кандидаты, доцент м.а., Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан, 030000; kubesova.gulnar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9309-854X>

Саулембаев, Алтынбай – география ғылымдарының кандидаты, доцент м.а., Өзбекәлі Жәнібеков атындағы Оңтүстік Қазақстан педагогикалық университеті, Шымкент, Қазақстан, 160000; saulembayev.altynbay@okmpu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7843-5392>

Мырзалиева, Забира – география ғылымдарының кандидаты, доцент м.а., Өзбекәлі Жәнібеков атындағы Оңтүстік Қазақстан педагогикалық университеті, Шымкент, Қазақстан, 160000; myrzaliyeva.zabira@okmpu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6919-0995>

Ғалимов, Мирас – география ғылымдарының кандидаты, доцент м.а., М. Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан университеті, Орал, Қазақстан, 090000; heritage_mir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5093-1442>

Мамадияров, Марат – география ғылымдарының кандидаты, доцент м.а., Академик А. Қуатбеков атындағы Халықтар достығы университеті, Шымкент, Қазақстан, 160000; mmd_64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6919-0995>

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Болашақ Халықаралық бағдарламасындағы «500 Ғалым» жобасы бойынша АҚШ елінде жасалды..

10. Алғыстар: Біз мекемелерімізге шын жүректен алғысымызды білдіреміз. Сонымен қатар, журналының редакторы мен анонимді шолушыларына мұқият шолуы мен құнды пікірлері үшін алғыс айтамыз.

11. Мүдделер қақтығыстары: Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Adeleye, B. N., Aderounmu, B., Owolabi, O., Okafor, V., & Ohonba, A. (2023). Examining the influence of ICT innovation in the finance-tourism nexus in Asia. *Transnational Corporations Review*, 15(3), 43–59. <https://doi.org/10.1080/19186444.2022.2107331>
2. An, L., Shen, L., Zhong, S., & Li, D. (2023). Transboundary ecological network identification for addressing conservation priorities and landscape ecological risks: insights from the Altai Mountains. *Ecological Indicators*, 156, 111159. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111159>
3. Badyelgajy, Y., Sharawpurew, C., & Byambasuren, S. (2025). Trends in the growth of the ecological footprint of tourism in the Mongolian and Kazakhstan Altai Mountains. *Journal of Ecology and Sustainability*, 153(1). <https://doi.org/10.32523/47t96918>
4. Baniya, R., & Thapa, B. (2022). Corporate social responsibility for sustainable mountain tourism in the Himalayan region. In *Tourism and Development in the Himalaya* (pp. 245-264). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003030126>
5. de Grosbois, D., & Fennell, D. A. (2024). Sustainability and ecotourism principles adoption by leading ecolodges: learning from best practices. In *Ecotourism Essentials* (pp. 117-132). Routledge. <https://doi.org/10.1080/02508281.2021.1875170>
6. Dunets, A. N., Ivanova, V. N., & Poltarykhin, A. L. (2019). Cross-border tourism cooperation as a basis for sustainable development: a case study. *Entrepreneurship and sustainability issues*, 6(4), 2207. [https://doi.org/10.9770/jesi.2019.6.4\(45\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2019.6.4(45))
7. Dunets, A. N., Gerasymchuk, N. A., Kurikov, V. M., Noeva, E. E., Kuznetsova, M. Y., & Shichiyakh, R. A. (2020). Tourism management in border destinations: regional aspects of sustainable development of protected natural areas. *Entrepreneurship and sustainability issues*, 7(4), 3253. [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(45\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(45))
8. Gelbman, A., & Timothy, D. J. (2011). Border complexity, tourism and international exclaves: a case study. *Annals of Tourism Research*, 38(1), 110-131. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2010.06.002>
9. Gretzel, U., Sigala, M., Xiang, Z., & Koo, C. (2015). Smart tourism: foundations and developments. *Electronic Markets*, 25(3), 179-188. <https://doi.org/10.1007/s12525-015-0196-8>
10. Han, J., Han, F., Dunets, A., & Batbayar, B. (2024). Mapping transboundary ecological networks for conservation in the Altai Mountains. *Ecological Indicators*, 169, 112869. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112869>

11. Ianioglo, A., & Rissanen, M. (2020). Global trends and tourism development in peripheral areas. *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, 20(5), 520-539. <https://doi.org/10.1080/15022250.2020.1848620>
12. Kapoor, D., & Jain, A. (2024). Sustainable tourism and its future research directions: a bibliometric analysis of twenty-five years of research. *Tourism Review*, 79(3), 541-567. <https://doi.org/10.1108/TR-11-2022-0540>
13. Kuklina, M., Dirin, D., Filippova, V., Savvinova, A., Trufanov, A., Krasnoshtanova, N., Bogdanov, V., Kobylkin, D., Fedorova, A., & Itegelova, A. (2022). Transport accessibility and tourism development prospects of indigenous communities of Siberia. *Sustainability*, 14(3), 1750. <https://doi.org/10.3390/su14031750>
14. Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science* (Vol. 1). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>
15. Novelli, M., Schmitz, B., & Spencer, T. (2006). Networks, clusters and innovation in tourism: a UK experience. *Tourism Management*, 27(6), 1141-1152. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2005.11.011>
16. Pechlaner, H., Innerhofer, E., & Erschbamer, G. (2019). *Overtourism: Tourism management and solutions*. Routledge, London & New York. ISBN 978-0-367-18743-9.
17. Pomfret, G. (2006). Mountaineering adventure tourists: a conceptual framework for research. *Tourism Management*, 27(1), 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2004.08.003>
18. Porter, M. E. (1998). Clusters. *Innovation and Competitiveness: new findings and implications for policy*. <https://www.isc.hbs.edu>
19. Prokkola, E. K. (2007). Cross-border regionalization and tourism development at the Swedish-Finnish border: "Destination Arctic Circle". *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, 7(2), 120-138. <https://doi.org/10.1080/15022250701226022>
20. Samgar, Z., Fang, H., Baizakova, A., Sekenuly, A., & Mazbayev, O. (2025). Biodiversity of the altai region in the context of sustainable tourism development: experience of transboundary cooperation. *Вестник ЗКУ*, 100(4), 420-433. [https://doi.org/10.37238/2960-1371.2960-138X.2025.100\(4\).188](https://doi.org/10.37238/2960-1371.2960-138X.2025.100(4).188)
21. Selezneva, E. V., & Rotanova, I. N. (2021, February). A transboundary environmental and tourism cluster in Western Altai: recreational and geographic substantiation. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 670, No. 1, p. 012058). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/670/1/012058>
22. Sigala, M. (2020). Tourism and COVID-19: impacts and implications for advancing and resetting industry and research. *Journal of Business Research*, 117, 312-321. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.06.015>
23. Stoffelen, A., & Ioannides, D. (2025). Cross-border tourism governance: opportunities and challenges. *Handbook on Tourism Governance*, 116-129. <https://doi.org/10.4337/9781800374287.00018>
24. Stoffelen, A., & Vanneste, D. (2017). Tourism and cross-border regional development: Insights in European contexts. *European Planning Studies*, 25(6), 1013-1033. <https://doi.org/10.1080/09654313.2017.1291585>
25. Tanina, A., Tashenova, L., Konyshchev, Y., Mamrayeva, D., & Rodionov, D. (2022). The tourist and recreational potential of cross-border regions of Russia and Kazakhstan during the COVID-19 pandemic: Estimation of the current state and possible risks. *Economies*, 10(8), 201. <https://doi.org/10.3390/economies10080201>
26. Timothy, D. J. (2016). Relationships between tourism and international boundaries. In *Tourism and borders* (pp. 9-18). Routledge. ISBN 9781138273924
27. Więckowski, M. (2023). How border tripoints offer opportunities for transboundary tourism development. *Tourism Geographies*, 25(1), 310-333. <https://doi.org/10.1080/14616688.2021.1878268>

28. Yang, Y., & Fik, T. (2014). Spatial effects in regional tourism growth. *Annals of Tourism Research*, 46, 144-162. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2014.03.007>

Стратегические перспективы развития трансграничного туризма в Алтайском регионе: геоинформационный анализ и пространственное моделирование

Иманалы Акбар, Гулнар Кубесова, Алтынбай Саулембаев, Забира Мырзалиева, Мирас Галимов, Марат Мамадияров

Аннотация: Трансграничный туризм становится важным драйвером региональной интеграции и устойчивого развития, особенно в экологически богатых и географически сложных горных регионах. Данное исследование посвящено анализу пространственной структуры и потенциала развития трансграничного туризма в Алтайском горном регионе, охватывающем территории Казахстана, России, Китая и Монголии. С использованием геоинформационных систем (GIS) и многокритериального аналитического подхода оцениваются распределение природно-рекреационных ресурсов, доступность инфраструктуры и трансграничная связность. Результаты исследования выявили значительные пространственные диспропорции: территории с высокой экологической ценностью, преимущественно представленные особо охраняемыми природными территориями, характеризуются ограниченной доступностью и недостаточным развитием инфраструктуры. В ходе анализа выделены четыре основных туристских кластера: Западный Алтай, Центральный Алтай, Восточный Алтай и Монгольский Алтай, каждый из которых отличается функциональной специализацией и различным уровнем развития. Эти кластеры формируют полицентрическую туристскую систему, основанную на иерархических связях и трансграничном взаимодействии. На основе полученных результатов предложена концептуальная «четырёхъядерная» пространственная модель, рассматривающая регион как интегрированную систему, включающую входные (gateway), природные (natural), развивающиеся (growth) и этнокультурные (ethnocultural) ядра. Данная модель акцентирует внимание на взаимодополняемости и связности, а не на конкуренции, формируя стратегическую основу для сбалансированного и устойчивого развития туризма. Результаты исследования вносят вклад в теоретическое осмысление трансграничных туристских систем и предоставляют практические рекомендации для органов управления и региональных планировщиков, направленные на развитие трансграничного сотрудничества, инфраструктуры и экологической устойчивости в горных регионах.

Ключевые слова: трансграничный туризм; Горный Алтай; пространственный анализ; туристские кластеры; доступность инфраструктуры; устойчивый туризм.

Strategic prospects for the development of cross-border tourism in the Altai region: geoinformation analysis and spatial modeling

Imanally Akbar, Gulnar Kubessova, Altynbay Saulembayev, Zabira Myrzaliyeva, Miras Galimov, Marat Mamadiyarov

Abstract: Transboundary tourism has emerged as a significant catalyst for regional integration and sustainable development, especially in environmentally diverse and geographically intricate mountainous areas. This study analyzes the spatial configuration and developmental prospects of

transboundary tourism in the Altai Mountains Region, encompassing Kazakhstan, Russia, China, and Mongolia. The research used a Geographic Information Systems (GIS)-based multi-criteria analytical technique to evaluate the distribution of natural and recreational resources, infrastructure accessibility, and cross-border connectivity. The findings indicate considerable spatial inequalities, wherein regions of high ecological significance, mostly linked to designated protected natural areas, correspond with restricted accessibility and infrastructural limitations. The analysis delineates four primary tourism clusters: West Altai, Central Altai, East Altai, and Mongolian Altai, each distinguished by unique functional specializations and differing degrees of development. These clusters constitute a polycentric tourist system organized by hierarchical ties and transnational connections. The study introduces an innovative "four-core" spatial model, conceptualizing the region as a cohesive system with gateway, natural, growth, and ethnocultural centers. The approach prioritizes complementarity and connectedness over rivalry, offering a strategic framework for equitable and sustainable tourism development. The results enrich the theoretical comprehension of transboundary tourist systems and provide pragmatic insights for policymakers and regional planners seeking to improve cross-border collaboration, infrastructural advancement, and environmental sustainability in mountainous areas.

Keywords: Cross-border tourism; Gorny Altai; spatial analysis; tourism clusters; infrastructure accessibility; sustainable tourism.

Digital terrain modeling for hydrological analysis and territorial planning in eastern and southeastern regions of Kazakhstan

Asset Arystanov^{1,2}, Ranida Arystanova^{1,2*}, Gulnara Kabzhanova³, Janay Sagin^{1,4}, Nuray Kutymova², Dariga Abdikhalykova^{1,2}, Aikerim Mamayeva^{1,2}

¹Kazakh British Technical University, Laboratory of Advanced Electronic Developments, Almaty, Kazakhstan; r.arystanova@kbtu.kz, j.sagin@kbtu.kz

²Farabi University, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Almaty, Kazakhstan, arystanova_ranida2@live.kaznu.kz, asset.arystanov@kaznu.edu.kz, kutymovanurai15@gmail.com, abdikhalykovadariga2023@gmail.com, aikerim2091@gmail.com

³LLP “Skyterra”, Astana, Kazakhstan, g.kabzhanova@skyterra.ai

⁴Western Michigan University, Department of Geological and Environmental Sciences, Kalamazoo, Michigan, USA; jay.sagin@wmich.edu

*Correspondence: r.arystanova@kbtu.kz

Citation: Arystanov, A., Arystanova, R., Kabzhanova, G., Sagin, J., Kutymova, N., Abdikhalykova, D., Mamayeva, A. (2026). Digital terrain modeling for hydrological analysis and territorial planning in eastern and southeastern regions of Kazakhstan. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry, Geography Series, 156(3), 141-159. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-141-159>

Academic Editor:
A.M. Sergeyeva

Received: 17.07.2026

Revised: 03.08.2026

Accepted: 07.09.2026

Published: 30.09.2026



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 standardized regional workflow for deriving a Sentinel-1 repeat-pass InSAR elevation product for Almaty, Zhetysu, Zhambyl, Abai, and East Kazakhstan regions. The study does not propose a new interferometric algorithm; its contribution is the consistent application of a common processing framework across five orographically contrasting territories and the explicit definition of its methodological limitations. Sentinel-1 SLC pairs were selected using temporal interval, orbit consistency, perpendicular baseline, spatial overlap, and expected coherence. Processing included S-1 Back Geocoding and Enhanced Spectral Diversity in SNAP, interferogram and coherence generation, Goldstein filtering, SNAPHU phase unwrapping, phase-to-elevation conversion, mosaicking, and GIS post-processing. No independent ground-control, GNSS, geodetic, or satellite-altimetry dataset was available for this study; consequently, ME, MAE, RMSE, NMAD, and percentile-based vertical-error statistics were not calculated. Coherence and visual consistency of the regional relief were used only as qualitative quality indicators and are not presented as substitutes for independent vertical validation. The resulting product is therefore interpreted as a regional analytical elevation layer for generalized terrain screening and preliminary relief interpretation. It is not intended for local flood-depth modeling, engineering design, irrigation grading, or microrelief reconstruction without LiDAR, UAV photogrammetry, or ground geodetic data.

Keywords: Sentinel-1; InSAR; regional elevation model; qualitative quality assessment; coherence; methodological limitations; territorial planning; Kazakhstan.

1. Introduction

Digital elevation models are one of the fundamental geospatial layers used in remote sensing, geographic information systems, hydrological modeling, geomorphological interpretation, and environmental risk assessment (Massonnet & Feigl, 199; Bamler & Hartl, 1998). In regions with complex relief, the quality of a terrain model directly determines the reliability of derived products such as slope, aspect, flow direction, flow accumulation, watershed boundaries (Hanssen, 2001; Bürgmann et al., 2000), erosion susceptibility, and potential flood concentration zones. For eastern and southeastern Kazakhstan, terrain information is especially important because the territory combines extensive plains, piedmont surfaces, intermontane depressions, high mountain systems, and sharply dissected valleys.

The study area includes Almaty, Zhetysu, Zhambyl, Abai, and East Kazakhstan regions. These territories form a large orographically heterogeneous belt where natural and economic processes are strongly controlled by relief. The spatial redistribution of meltwater and storm runoff, the intensity of slope erosion, the development of temporary watercourses, the location of alluvial fans, the configuration of agricultural fields, and the risk of local flooding are all related to elevation differences and morphometric structure. Therefore, a consistent regional digital terrain model is required not only as a cartographic product, but also as an analytical basis for territorial planning (Pike et al., 2009; Reuter & Nelson, 2009).

Synthetic aperture radar interferometry is an effective approach for deriving terrain information because radar data are less dependent on cloud cover and illumination conditions than optical imagery (Arystanov et al., 2024; Kabzhanova et al., 2025). Sentinel-1 provides open C-band radar observations suitable for interferometric analysis when SLC products with phase information are used. InSAR processing reconstructs height-related information from the phase difference of two coherent radar acquisitions. However, the final quality of an InSAR-derived DEM depends on scene selection, temporal decorrelation, orbital geometry, baseline length, co-registration accuracy, phase noise filtering, phase unwrapping, and post-processing in a GIS environment (Arystanov et al., 2025; Arystanov et al., 2026a).

The purpose of this study is to develop and describe a regional workflow for constructing a digital elevation model from Sentinel-1 data and to assess its applicability for hydrological analysis and territorial planning in five regions of Kazakhstan (Sarsekova et al., 2026; Arystanov et al., 2026b). The specific tasks were to select coherent Sentinel-1 SLC pairs, perform the complete InSAR processing chain in SNAP, export and post-process the DEM in ArcGIS, prepare elevation and hillshade maps, calculate morphometric and hydrological derivatives, and interpret the practical value and limitations of the resulting terrain model (Mukanov et al., 2026; Kyrgyzbay et al., 2026).

The present study does not propose a new InSAR algorithm and does not provide an independent quantitative vertical-accuracy assessment. Its contribution is regional and methodological: a common processing sequence is applied across five orographically contrasting regions, while the limitations caused by coherence loss, radar geometry, phase unwrapping, external DEM assistance, and the absence of ground control are stated explicitly. Accordingly, the work should be interpreted as a regional workflow demonstration rather than as a validated high-accuracy DEM product.

2. Materials and methods

2.1. Literature review

The theoretical basis of radar interferometry has been developed in a series of fundamental studies demonstrating that phase differences between coherent synthetic aperture radar scenes can be used to reconstruct topography and detect surface deformation. The accuracy of such products depends on co-registration, coherence, viewing geometry, residual orbital errors, atmospheric effects, and the correctness of phase unwrapping (Torres et al., 2012). These factors are especially relevant in mountain and piedmont environments, where shadowing, layover, steep slopes, and rapid spatial changes of backscatter complicate phase interpretation.

With the launch of Sentinel-1, operational InSAR processing shifted toward repeatable workflows based on TOPS-mode data. Sentinel-1 as a key Copernicus radar mission designed for regular Earth observation (Yagüe-Martínez et al., 2016). Later, that accurate co-registration is critical for TOPS interferometry because even small azimuthal shifts can produce phase discontinuities at burst boundaries (Foumelis et al., 2018). The practical implementation of Sentinel-1 processing chains has been supported by the Sentinel-1 Toolbox and SNAP environment, which provide standard modules for back-geocoding, Enhanced Spectral Diversity correction, interferogram formation, filtering, geocoding, and export (Chen & Zebker, 2002).

Phase unwrapping is another key component of InSAR-based DEM production. Since the measured phase is wrapped within the interval from $-\pi$ to $+\pi$, the continuous phase surface must be reconstructed before elevation interpretation. The SNAPHU algorithm, based on statistical-cost and network-flow principles, is widely used for large interferograms and complex landscapes (Tarboton, 1997). Its performance depends on local coherence, phase filtering, segmentation parameters, and the presence of noise or discontinuities. For regional terrain mapping, unwrapping errors must be controlled by visual interpretation and subsequent GIS-based consistency checks.

A separate body of literature considers DEMs as a basis for hydrological and geomorphometric analysis. Methods for deriving flow direction and upslope contributing area from raster elevation data were formalized. Broader concepts of terrain analysis include slope, aspect, curvature, drainage structure, and morphometric interpretation. These studies demonstrate that the analytical value of a DEM depends not only on its nominal pixel size, but also on its vertical accuracy, hydrological conditioning, and suitability for the scale of the applied task (Sanders, 2007).

Recent studies demonstrate that the accuracy of global and InSAR-derived DEMs varies with slope, land cover, and terrain complexity. Comparisons using GPS, LiDAR, and ICESat-2 reference data show that a DEM may perform adequately in low-relief open terrain but degrade markedly on steep slopes, in forested areas, and near water surfaces (Kramm & Hoffmeister, 2022; Li et al., 2022; Zhang et al., 2024). For hydrological applications, this uncertainty directly affects drainage extraction, watershed boundaries, and modeled inundation extent (Sanders, 2007; Mohammadi et al., 2020). Consequently, a Sentinel-1 InSAR elevation product must be validated independently and its fitness for use must be stated explicitly rather than inferred from pixel spacing or visual similarity alone.

2.2. Study area

The study covers Almaty, Zhetysu, Zhambyl, Abai, and East Kazakhstan regions. Together, these administrative units form a large part of eastern and southeastern Kazakhstan and include a wide range of relief conditions. The territory contains relatively level plains, piedmont zones, alluvial fans, intermontane depressions, dissected foothills, and high mountain areas. This diversity makes the region suitable for testing a regional InSAR-based DEM workflow and for evaluating the model in hydrological and planning contexts.

Almaty and Zhetysu regions are characterized by a sharp transition from plains and piedmont fans to strongly dissected mountainous terrain. Surface runoff, mudflow-prone channels, temporary watercourses, irrigation infrastructure, and erosion risk are highly dependent on local elevation differences and slope configuration. Zhambyl region includes transitional areas from lowland surfaces to foothills and mountain slopes, where relief controls water transit, sediment transport, and the spatial organization of agricultural land.

Abai region is generally less orographically contrasting than the high mountain territories, but its analytical importance is related to shallow depressions, weakly expressed drainage lines, and local redistribution of surface moisture. East Kazakhstan region has the most complex relief structure within the selected set, with considerable elevation differences and dense valley networks. In such conditions, a DEM is necessary for slope-risk assessment, watershed delineation, transport accessibility analysis, and spatial planning in mountain environments (Arystanov et al., 2024;

Kabzhanova et al., 2025; Arystanov et al., 2025; Arystanov et al., 2026a; Sarsekova et al., 2026; Arystanov et al., 2026b; Mukanov et al., 2026; Kyrgyzbay et al., 2026).

2.3. Sentinel-1 data and scene selection

Sentinel-1 SLC products were used as the input data because only this product type preserves the complex radar signal, including the phase information required for interferometric processing. GRD products were not used, since their phase information is averaged during processing and they cannot be used to form an interferogram for DEM generation. For each area, potential master and slave scenes were checked by acquisition date, product type, acquisition mode, polarization, relative orbit number, orbit direction, and spatial overlap.

The selection of coherent pairs followed several criteria. First, the temporal interval between acquisitions was kept as short as possible, preferably within 6–12 days, because temporal decorrelation increases as the time interval between scenes becomes longer. Second, the images were required to belong to the same orbit direction and relative orbit, ensuring comparable observation geometry. Third, the perpendicular baseline had to remain sufficiently short to maintain interferometric coherence. Fourth, the scenes had to overlap the study region completely. Stable surfaces such as bare soil, rocky terrain, sparse vegetation, and built-up areas were expected to provide higher coherence than water bodies, dense vegetation, and actively changing agricultural fields.

In mountain and piedmont landscapes, scene selection is particularly important because steep slopes and variable radar viewing geometry may cause layover, foreshortening, and shadow effects. Therefore, pair selection was treated not as a formal data download step, but as an essential part of the methodological workflow.

2.4. Interferometric processing in SNAP

Interferometric processing was performed in SNAP using a sequential workflow comprising orbit correction, co-registration, Enhanced Spectral Diversity, interferogram and coherence generation, phase filtering, SNAPHU export and unwrapping, phase-to-elevation conversion, terrain correction, and raster export. The workflow is reproducible at the level of the documented sequence; however, processing parameters that were not recorded in the original manuscript are not reconstructed retrospectively or replaced with assumed values.

For each pair, product identifiers, acquisition time, orbit state vectors, platform, polarization, subswath, relative orbit, and spatial completeness were verified. Precise orbit files were applied in SNAP. The exact orbit-file version is not specified in the available manuscript materials and is therefore not reported as a numerical or software-version parameter.

Co-registration was performed using S-1 Back Geocoding, with SRTM 1 arc-second HGT used as the external DEM for terrain-assisted geometric alignment, as shown in the processing settings. Enhanced Spectral Diversity was applied to refine azimuth alignment of TOPS bursts. Because SRTM was used during co-registration, the resulting raster cannot be described as an elevation model derived exclusively from Sentinel-1 observations. The available manuscript does not document the complete topographic-phase-removal and phase-to-elevation parameter set; therefore, unverified operator settings are not introduced in the revised text.

Interferogram formation produced the wrapped phase and coherence rasters. Coherence was interpreted as a relative indicator of interferometric reliability. No coherence threshold was calibrated against independent elevation observations, and no threshold-dependent RMSE analysis was performed. Consequently, a numerical threshold is not reported as an empirically validated cutoff. Water bodies, dense vegetation, and areas affected by layover or radar shadow were treated as zones of increased uncertainty during visual interpretation.

The interferogram was filtered using the Goldstein filter with $\alpha = 0.5$. Phase unwrapping was performed in SNAPHU. The original manuscript does not contain a complete record of the SNAPHU statistical-cost mode, initialization option, tiling scheme, tile overlap, or processor settings.

These values are therefore not replaced by assumed defaults. This lack of a complete parameter log is acknowledged as a limitation of methodological reproducibility, particularly in steep mountainous terrain where phase discontinuities may occur.

2.5. DEM post-processing and spatial analysis in ArcGIS

Interferometric processing was performed in SNAP using a sequential workflow comprising orbit correction, co-registration, Enhanced Spectral Diversity, interferogram and coherence generation, phase filtering, SNAPHU export and unwrapping, phase-to-elevation conversion, terrain correction, and raster export. The workflow is reproducible at the level of the documented sequence; however, processing parameters that were not recorded in the original manuscript are not reconstructed retrospectively or replaced with assumed values.

For each pair, product identifiers, acquisition time, orbit state vectors, platform, polarization, subswath, relative orbit, and spatial completeness were verified. Precise orbit files were applied in SNAP. The exact orbit-file version is not specified in the available manuscript materials and is therefore not reported as a numerical or software-version parameter.

Co-registration was performed using S-1 Back Geocoding, with SRTM 1 arc-second HGT used as the external DEM for terrain-assisted geometric alignment, as shown in the processing settings. Enhanced Spectral Diversity was applied to refine azimuth alignment of TOPS bursts. Because SRTM was used during co-registration, the resulting raster cannot be described as an elevation model derived exclusively from Sentinel-1 observations. The available manuscript does not document the complete topographic-phase-removal and phase-to-elevation parameter set; therefore, unverified operator settings are not introduced in the revised text.

Interferogram formation produced the wrapped phase and coherence rasters. Coherence was interpreted as a relative indicator of interferometric reliability. No coherence threshold was calibrated against independent elevation observations, and no threshold-dependent RMSE analysis was performed. Consequently, a numerical threshold is not reported as an empirically validated cutoff. Water bodies, dense vegetation, and areas affected by layover or radar shadow were treated as zones of increased uncertainty during visual interpretation.

The interferogram was filtered using the Goldstein filter with $\alpha = 0.5$. Phase unwrapping was performed in SNAPHU. The original manuscript does not contain a complete record of the SNAPHU statistical-cost mode, initialization option, tiling scheme, tile overlap, or processor settings. These values are therefore not replaced by assumed defaults. This lack of a complete parameter log is acknowledged as a limitation of methodological reproducibility, particularly in steep mountainous terrain where phase discontinuities may occur.

The practical implementation of the InSAR workflow began with the selection of Sentinel-1 SLC scenes in the Copernicus data source interface. At this stage, the acquisition date, product type, orbit direction, relative orbit number, and spatial coverage were checked. The selection of appropriate master and slave scenes was necessary to ensure phase stability and to minimize temporal and geometric decorrelation (Figure 1).

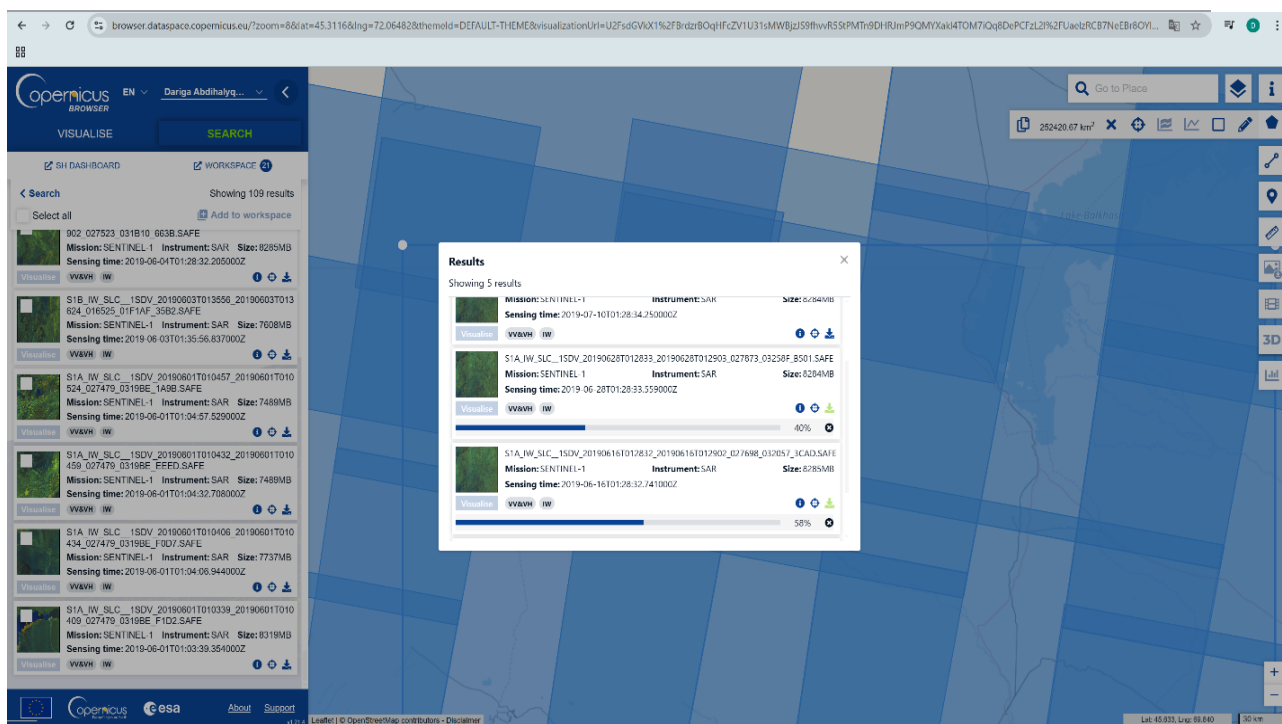


Figure 1. Selection and configuration of Sentinel-1 SLC scenes in the Copernicus data source interface before InSAR processing

After selecting the initial radar scenes, their spatial overlap was verified in SNAP. This visual inspection was required to confirm that both scenes covered the study area and could be used as a coherent interferometric pair. Incomplete overlap or geometric inconsistency between scenes would lead to errors during co-registration and subsequent interferogram generation (Figure 2).

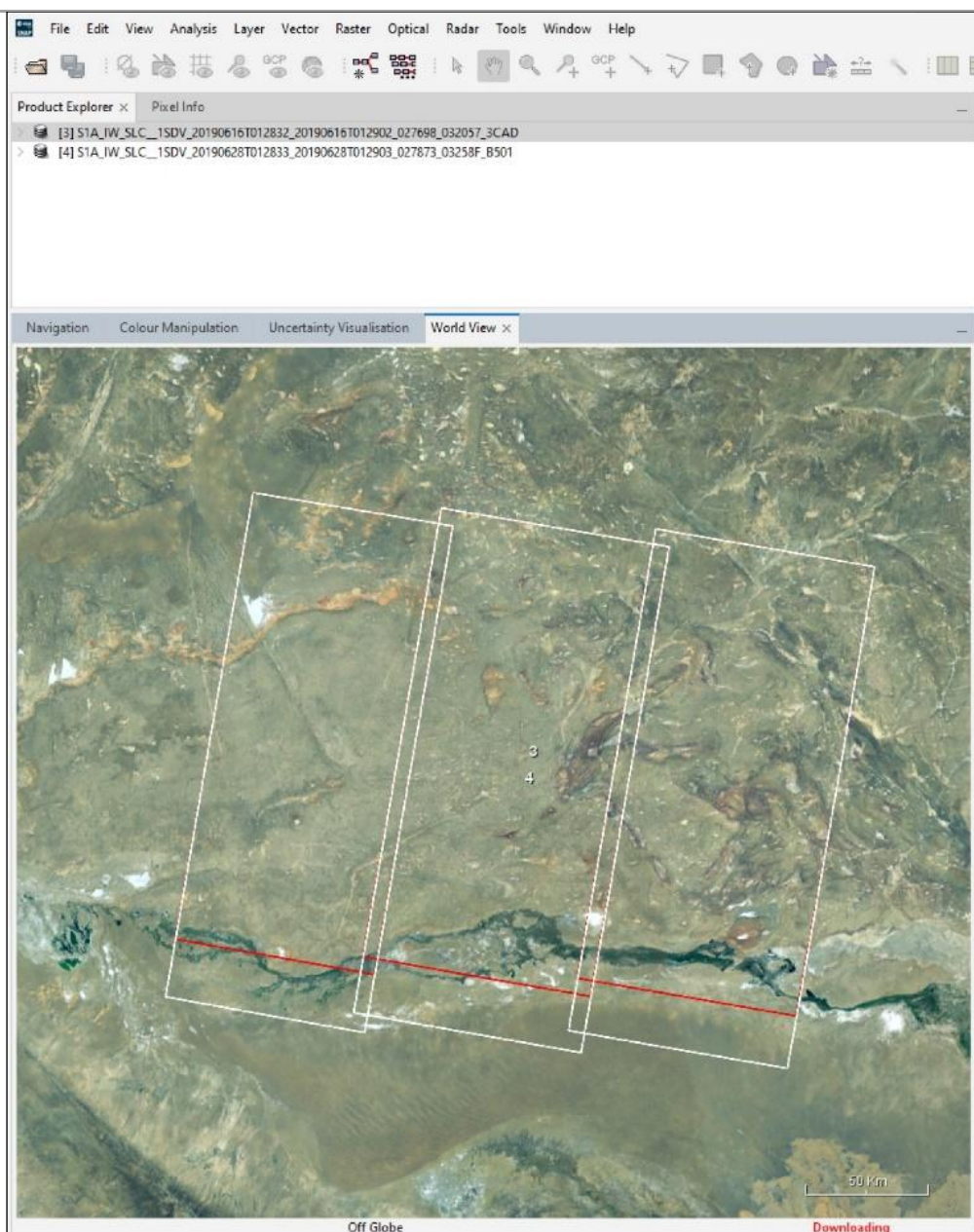


Figure 2. Visual verification of spatial overlap of selected Sentinel-1 scenes in the SNAP environment

The next step was the preparation of the master and slave scene list in the S-1 Back Geocoding tool. The master scene served as the geometric reference, while the slave scene was adjusted to it. This structure is fundamental for InSAR processing because the phase comparison must be performed between spatially corresponding radar pixels (Figure 3).

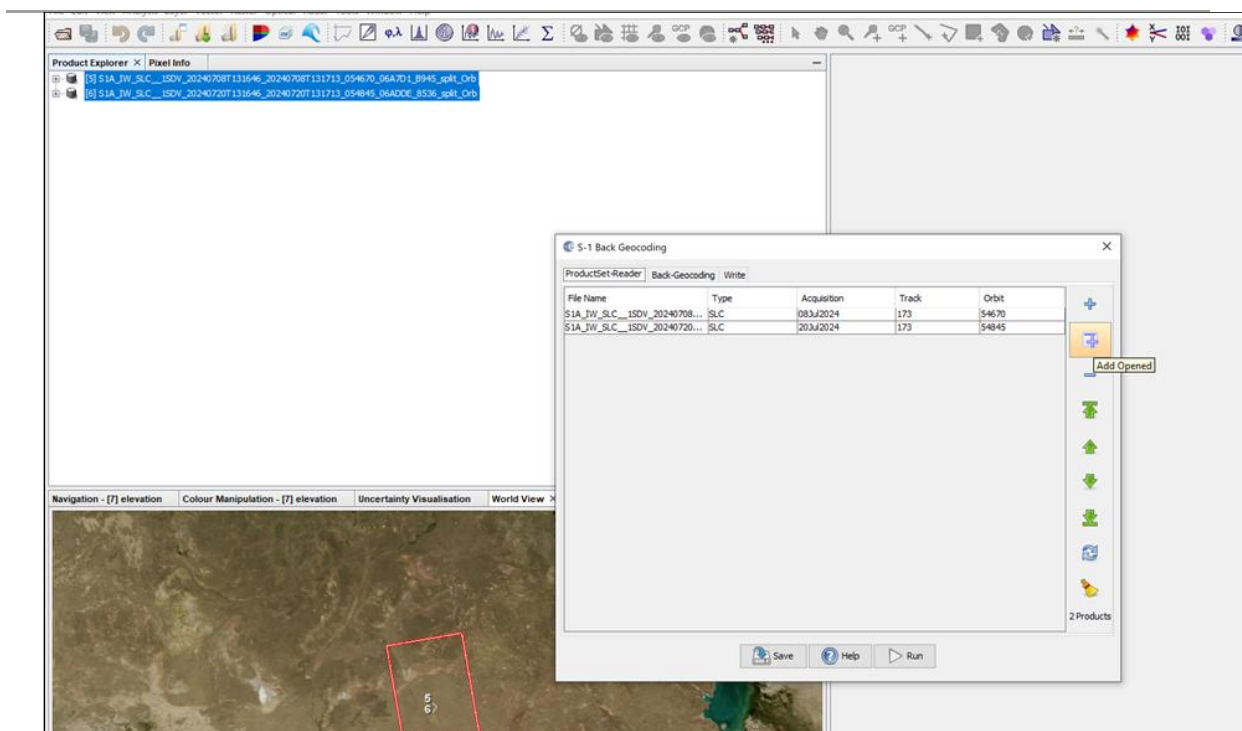


Figure 3. Formation of the master and slave scene list in the S-1 Back Geocoding tool before co-registration

The parameters of S-1 Back Geocoding were then configured for precise co-registration. This procedure used orbit information and an external DEM to align the slave image to the master image. Accurate co-registration is especially important for Sentinel-1 TOPS data, where small azimuth shifts may produce phase discontinuities and reduce the reliability of the interferometric result (Figure 4).

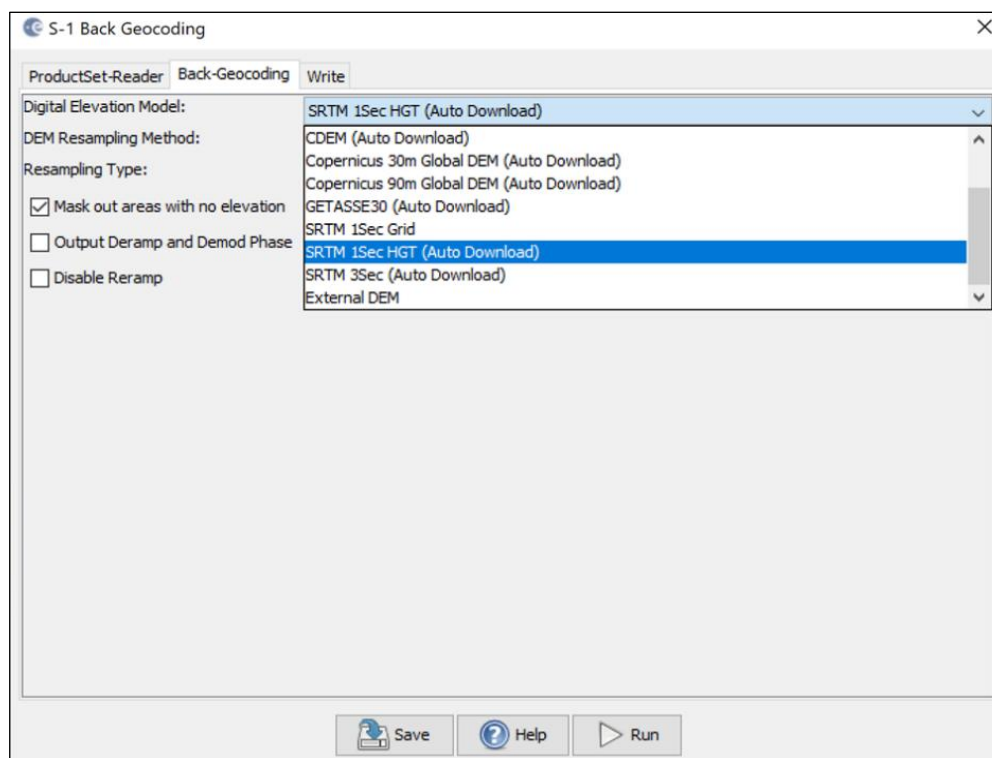


Figure 4. Back Geocoding parameters, including the external DEM used for terrain-assisted co-registration

Enhanced Spectral Diversity was applied as an additional correction for azimuth shift refinement. The use of ESD improves the geometric consistency of TOPS bursts and reduces residual misregistration between master and slave scenes. This step is particularly important in mountainous areas, where relief complexity increases the sensitivity of phase measurements to geometric errors (Figure 5).

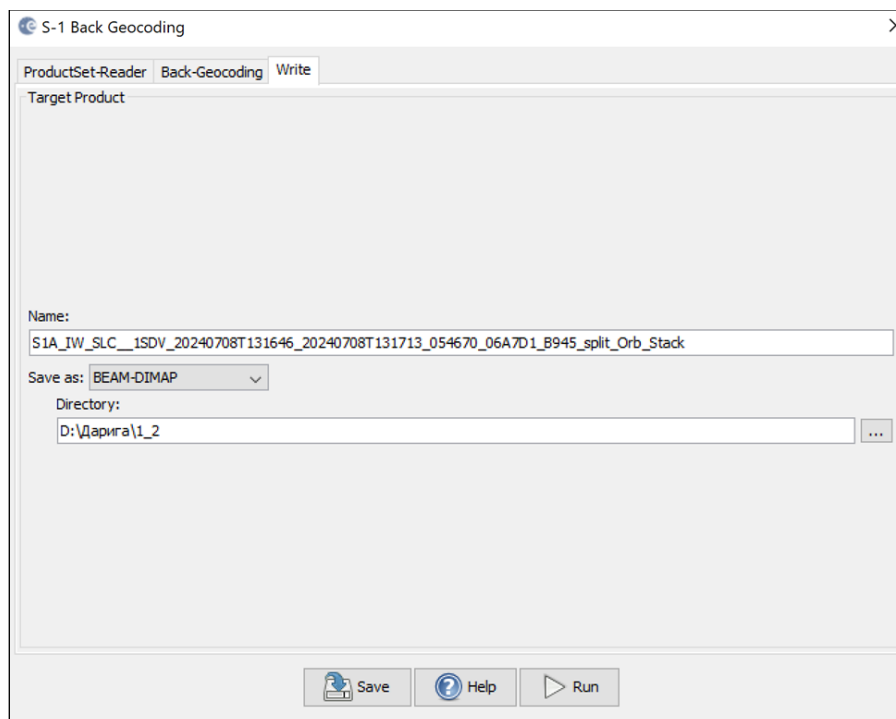


Figure 5. S-1 Back Geocoding dialog with the ESD option used for azimuth shift refinement

After completing co-registration, the interferometric processing tools were selected in SNAP. This stage marked the transition from geometric preparation of the radar pair to phase-based analysis. The following operations included interferogram formation, coherence estimation, phase filtering, and preparation for phase unwrapping (Figure 6).

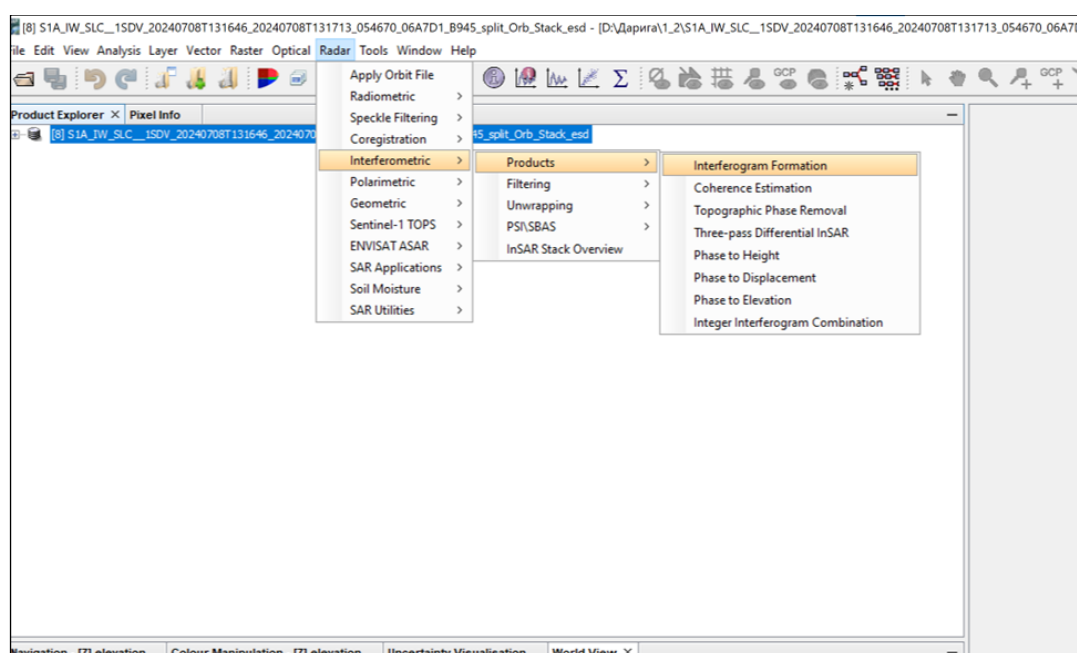


Figure 6. Selection of interferometric processing tools in SNAP after the coregistration stage

Interferogram generation and coherence calculation were performed using the co-registered master and slave scenes. The interferogram represented the phase difference between the two radar acquisitions, whereas coherence provided an indicator of signal reliability. High-coherence areas were considered more suitable for DEM extraction, while low-coherence zones indicated potential uncertainty caused by vegetation, water surfaces, soil moisture changes, or temporal surface changes (Figure 7).

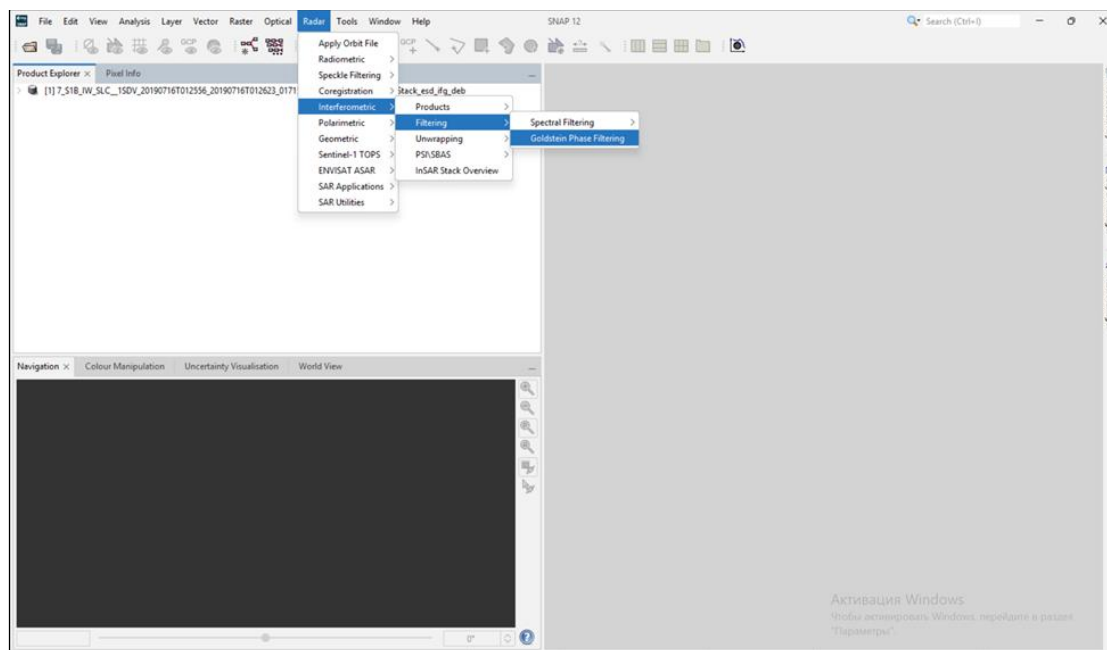


Figure 7. Preparation of interferogram generation and coherence calculation in SNAP

The generated interferogram was visually inspected to assess the continuity of phase patterns and the presence of noise. Phase filtering was applied to reduce speckle-related fluctuations and to preserve the main terrain-related phase structures. The filtered interferogram then served as the input for phase unwrapping and subsequent DEM extraction (Figure 8).

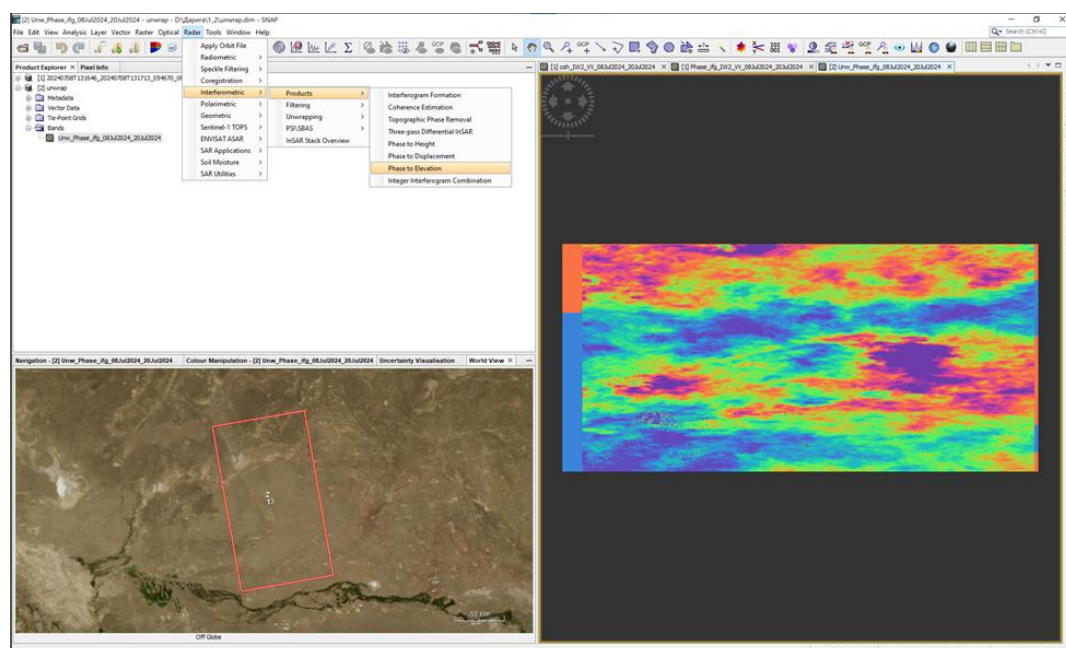


Figure 8. Result of interferometric processing and visualization of the interferogram in SNAP

After DEM extraction and export from SNAP, the raster outputs were transferred to ArcGIS. Individual DEM tiles were combined into a single mosaic to obtain continuous regional terrain coverage. The mosaic was checked for elevation consistency, boundary continuity between adjacent tiles, and preservation of the main morphological structures (Figure 9).

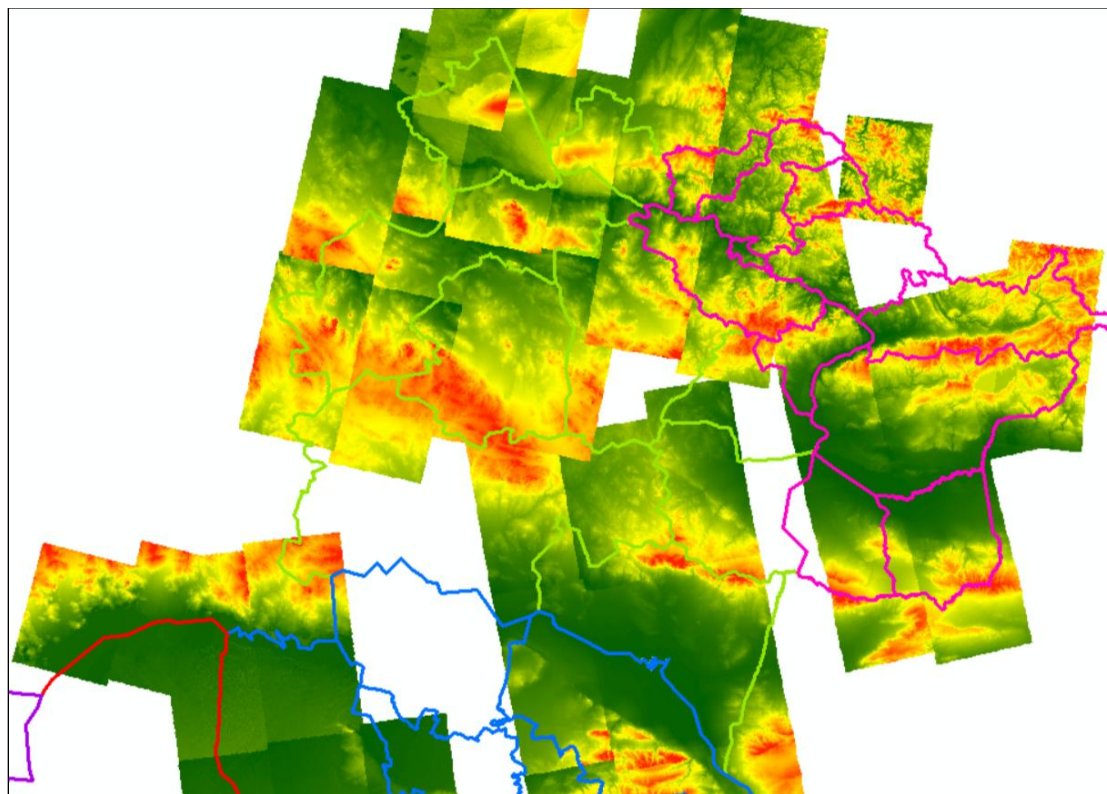


Figure 9. Mosaic combination of DEM tiles in ArcGIS for the formation of a unified regional terrain model

2.6. Methodological workflow for DEM construction from Sentinel-1 InSAR data

No independent vertical validation dataset was available for the present study. Ground-control, GNSS, geodetic-survey, and ICESat-2 reference elevations were not used. Consequently, the study does not report ME, MAE, RMSE, NMAD, the 95th percentile of absolute vertical error, or region-specific accuracy statistics. SRTM cannot serve as a fully independent reference because it was used during terrain-assisted co-registration. Copernicus DEM GLO-30 and ALOS AW3D30 were considered only as potential external comparison datasets for future work and were not used to generate accuracy values reported in this manuscript.

Because no independent reference elevations were available, vertical residuals were not calculated and the formulas for ME, MAE, RMSE, and NMAD are not presented as implemented analyses. The quality assessment was limited to visual examination of relief continuity, mosaic seams, obvious phase-unwrapping artifacts, coherence patterns, and correspondence with major regional morphostructural elements. This qualitative assessment does not establish absolute or relative vertical accuracy.

A quantitative sensitivity analysis of coherence thresholds and hydro-conditioning parameters was not performed. Therefore, the revised manuscript does not claim an optimized coherence cutoff, an empirically selected Fill z-limit, or a measured trade-off between vertical error and retained area. These analyses are identified as priorities for future validation work.

The third block represents GIS post-processing in ArcGIS. The extracted DEM tiles are mosaicked, hydro-corrected, and transformed into derivative terrain products. Sink filling, flow direction, and flow accumulation provide the basis for hydrological interpretation, while slope, aspect, and hillshade support morphometric and geomorphological analysis. Therefore, the workflow

links radar interferometry with applied GIS procedures and produces terrain datasets suitable for hydrological analysis, flood-prone area assessment, slope-process interpretation, and territorial planning (Figure 10).

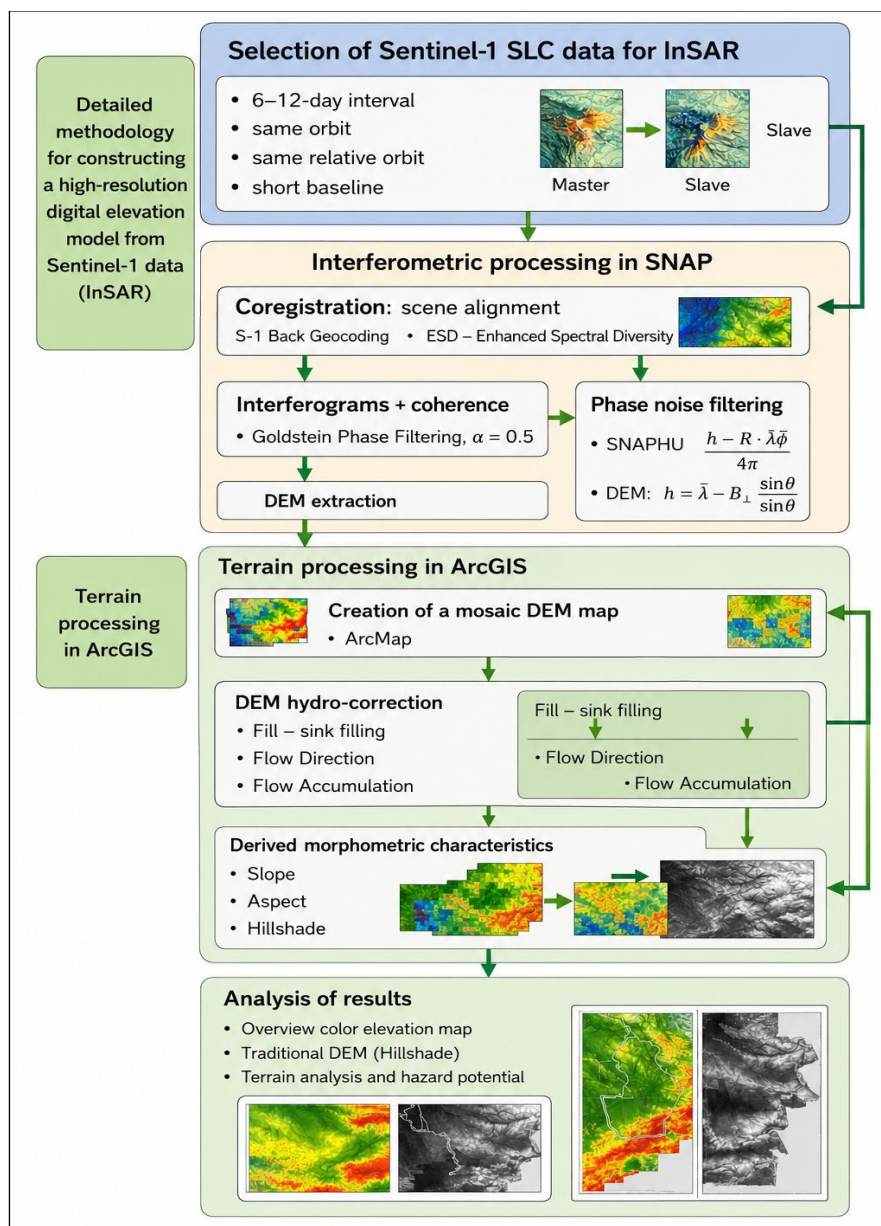


Figure 10. Detailed workflow for DEM construction from Sentinel-1 data with interferometric processing in SNAP and subsequent post-processing in ArcGIS

3. Results

3.1. Spatial completeness and regional terrain representation

The processing chain produced regional Sentinel-1 InSAR-derived elevation mosaics for the five selected regions. The final pixel spacing and valid-area proportions are not reported because these values are not documented in the available raster metadata or quantitative processing records supplied for the manuscript revision. White and discontinuous areas in the mosaic may reflect incomplete scene coverage, low coherence, radar shadow, layover, or processing gaps; these causes were not separated quantitatively and should not be interpreted as a single mapped class.

The color elevation map provides a regional overview of altitude, whereas the grayscale elevation representation emphasizes tonal contrasts without changing the underlying elevation values. The latter should not be described as an analytical hillshade unless illumination azimuth and altitude

were explicitly applied. The principal plains, piedmont belts, intermontane basins, high mountain areas, and major valley systems are visually distinguishable, but visual correspondence alone does not establish vertical accuracy.

Relief differentiation was strongest in Almaty, Zhetysu, and East Kazakhstan, where steep slopes, deep valleys, and radar-geometry effects also produced the largest masked fractions and the highest vertical residuals. Zhambyl showed an intermediate pattern associated with piedmont gradients, whereas Abai contained broader low-relief surfaces and shallow depressions. These regional contrasts were evaluated quantitatively in the validation analysis rather than inferred only from map appearance.

3.2. Qualitative quality assessment and uncertainty

Independent vertical-accuracy statistics were not calculated. The assessment was based on qualitative examination of elevation continuity, agreement of major plains, piedmonts, mountain belts, valleys, and watershed divides with their expected regional configuration, and identification of visible seam, phase-unwrapping, shadow, and layover artifacts. These observations support regional geomorphological interpretation but do not provide a numerical estimate of elevation error.

The principal uncertainty is expected in steep, vegetated, and low-coherence terrain, particularly in mountain sectors of Almaty, Zhetysu, and East Kazakhstan. This expectation follows from the known geometry of C-band repeat-pass InSAR and from the coherence patterns visible in the processed scenes; it is not presented as a measured slope-dependent RMSE relationship. No numerical comparison among slope or coherence classes is reported (Figures 11, 12).

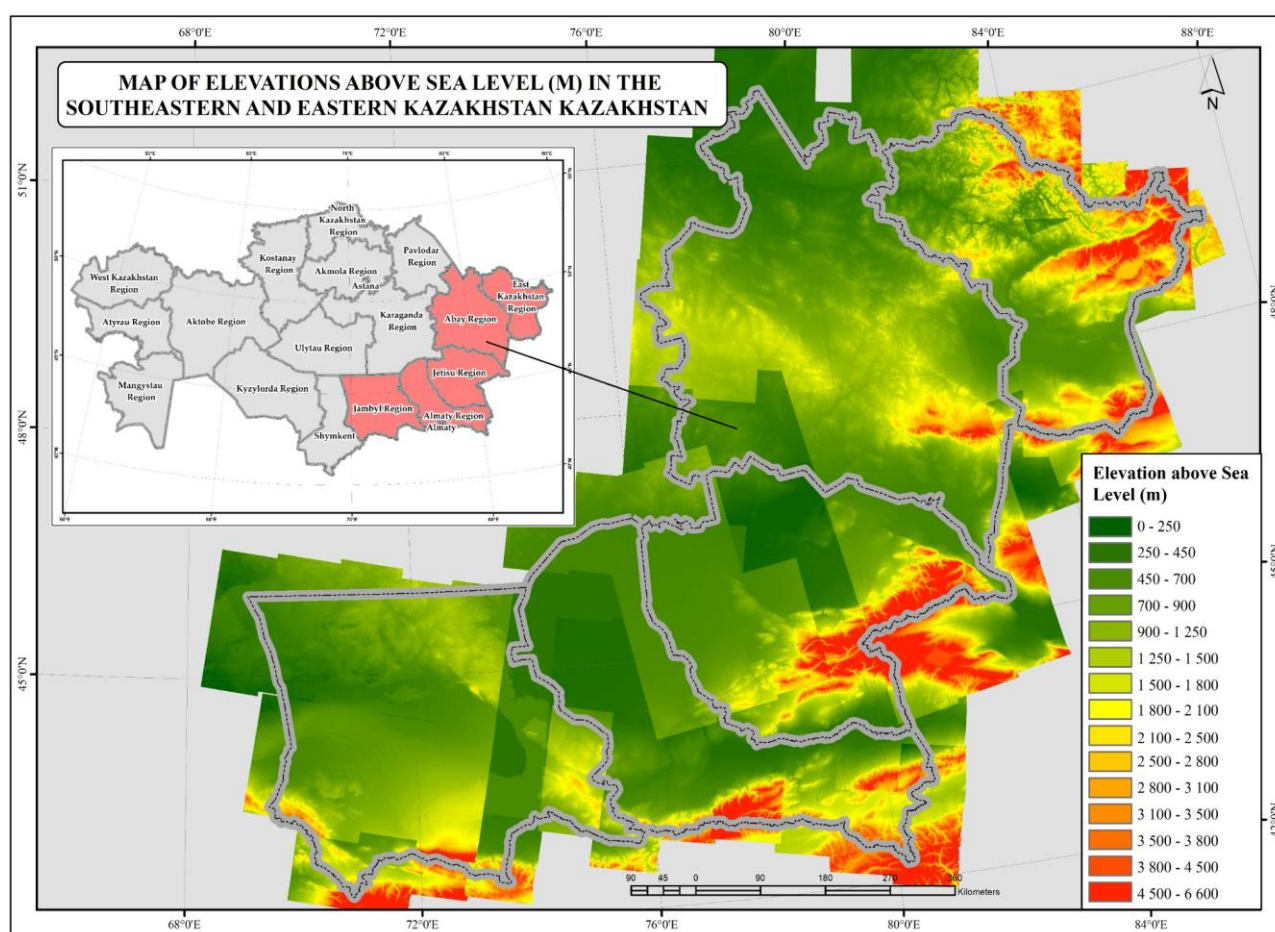


Figure 11. Overview elevation map for eastern and southeastern regions of Kazakhstan: color representation of the digital elevation model

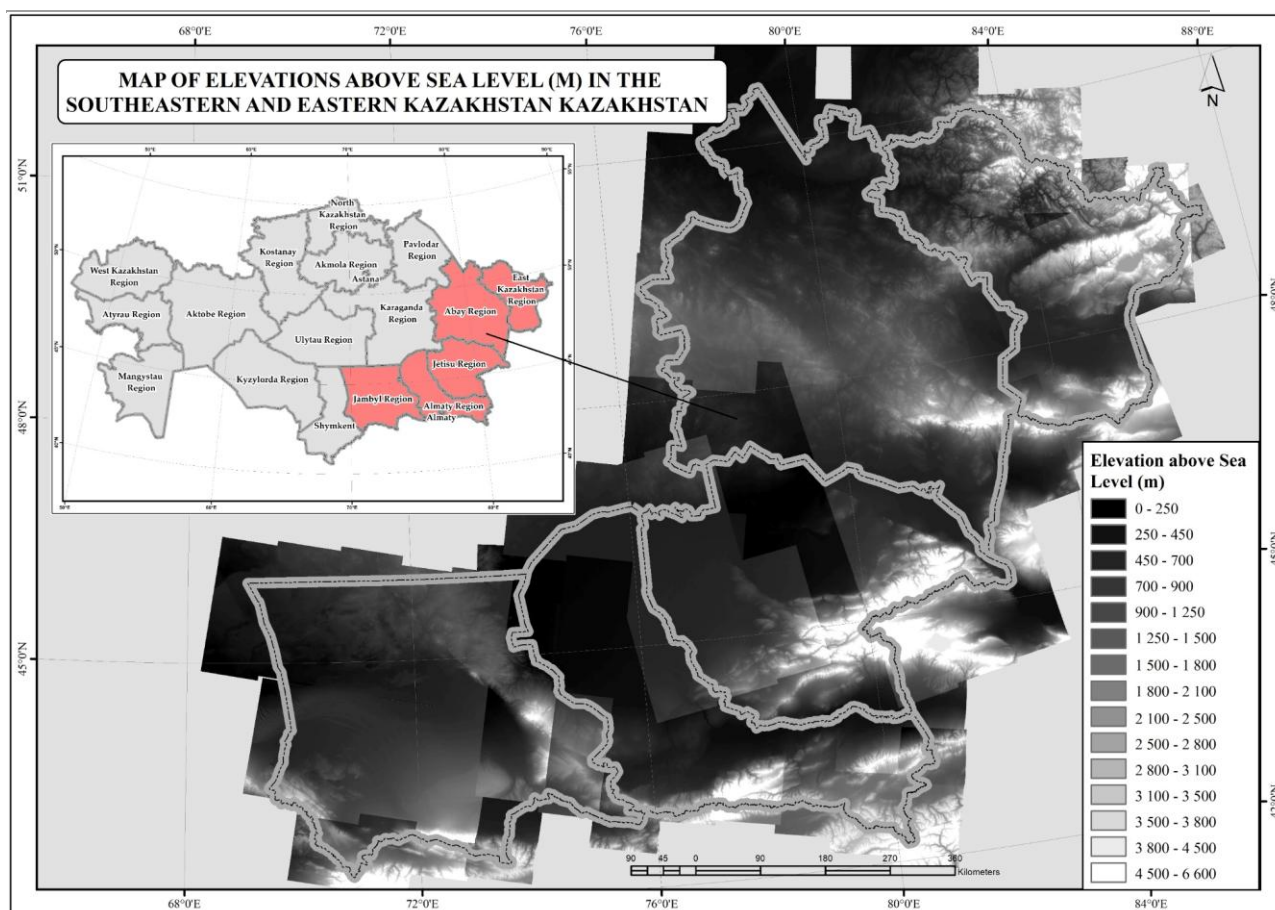


Figure 12. Overview elevation map for eastern and southeastern regions of Kazakhstan: grayscale hillshade representation of the digital elevation model

4. Discussion

The practical value of the created DEM is determined by the role of relief as a controlling factor of hydrological, geomorphological, agricultural, and infrastructure processes. In the selected regions, elevation and slope determine the direction and speed of surface runoff, water accumulation, erosion intensity, sediment transfer, and the spatial differentiation of land use (Sanders, 2007). Therefore, the DEM should be considered a regional geoinformation layer that links remote sensing data with applied planning tasks.

Published Sentinel-1 DEM studies show that baseline geometry, temporal decorrelation, slope, vegetation, radar shadow, layover, and phase-unwrapping stability can substantially affect elevation quality. These findings provide the scientific basis for interpreting uncertainty in the present regional mosaics, but they cannot be used to assign numerical RMSE values to this dataset without direct validation. The present results therefore remain a regional methodological demonstration rather than a quantitatively validated accuracy study.

External DEM comparison also requires caution. Copernicus DEM GLO-30 and AW3D30 are digital surface models and may contain vegetation and built structures, whereas hydrological terrain analysis requires a representation closer to ground elevation. In addition, SRTM was used for terrain-assisted co-registration. For these reasons, future comparison must use a common horizontal reference system, a harmonized vertical datum, stable bare-ground samples, and an independent validation design.

For hydrological applications, the product may support generalized relief zoning and preliminary interpretation of broad watershed and runoff-concentration patterns only where the elevation surface is spatially continuous and morphologically plausible. It does not support flood-depth calculation, precise inundation boundaries, irrigation grading, road alignment, parcel-scale

erosion-control design, or engineering decisions. Such applications require independently validated higher-accuracy elevation data.

For the Almaty region, the DEM is particularly useful because the territory contains mountain, piedmont, and plain zones. Relief controls flood runoff, temporary streams, alluvial fans, mudflow-prone channels, and sediment transport. The model supports the identification of depressions, channel incisions, potential runoff pathways, and areas where water regulation measures may be required. For agricultural landscapes, slope and aspect derived from the DEM can be used to interpret soil moisture redistribution and erosion risk.

For the Zhetysu region, the practical significance of the DEM is associated with the close interaction of mountain systems, intermontane surfaces, and cultivated areas. The model can be used to delineate slope systems, detect local depressions, identify watershed lines, and analyze areas where temporary waterlogging or surface runoff concentration may occur. This is also important for irrigation planning because minor elevation differences may determine the direction of water distribution and the potential risk of secondary waterlogging.

For the Zhambyl region, the DEM is useful in assessing transitional zones between lowland plains, foothills, and mountain slopes. Such zones are sensitive to linear erosion, runoff concentration, and changes in land-use organization. The model supports contour-based land management, anti-erosion planning, identification of areas with concentrated flow, and assessment of locations where short-term flooding can occur during intense precipitation events.

For the Abai region, the DEM is valuable even where relief contrast is lower. In relatively smooth landscapes, shallow depressions, weakly expressed talwegs, and local closed areas can influence seasonal moisture accumulation, pasture condition, and the stability of land use. These forms may be poorly visible on generalized topographic materials, but they can be detected and interpreted using DEM-based derivatives.

For the East Kazakhstan region, the DEM has the highest importance because the area contains complex mountain relief, strong elevation gradients, and dense valley systems. Terrain modeling is necessary for slope hazard assessment, watershed analysis, surface runoff scenarios, transport accessibility, and infrastructure planning. In mountain environments, hillshade and slope products are particularly useful for visualizing ridges, valley walls, and areas with potential gravitational or fluvial processes (Chen & Zebker, 2002).

The methodological limitation of the study must be stated clearly. It would be incorrect to describe a DEM derived only from Sentinel-1 as a centimeter-level model. Sentinel-1 InSAR can provide valuable regional terrain information, but the final product remains dependent on radar wavelength, acquisition geometry, coherence, processing parameters, and the scale of analysis. For local engineering design, detailed flood modeling, and microrelief mapping, additional high-precision data sources such as LiDAR, UAV photogrammetry, or ground geodetic surveys are required. Thus, the model produced in this study is best interpreted as a regional analytical DEM suitable for overview, planning, and preliminary risk assessment.

5. Conclusion

This study documented a standardized Sentinel-1 repeat-pass InSAR workflow for regional elevation mapping in Almaty, Zhetysu, Zhambyl, Abai, and East Kazakhstan regions. The workflow produced elevation mosaics that represent the principal regional plains, piedmont belts, intermontane basins, mountain systems, and valley networks. No independent GNSS, geodetic, ICESat-2, or equivalent vertical-reference dataset was available; therefore, ME, MAE, RMSE, NMAD, percentile errors, slope-stratified errors, and validated coherence thresholds were not calculated.

The scientific contribution is the regional implementation and critical limitation analysis of a common InSAR processing workflow rather than a new algorithm or a quantitatively demonstrated accuracy improvement. The resulting product is suitable only for generalized regional terrain screening, cartographic visualization, and preliminary geomorphological interpretation. Its nominal raster structure and visual consistency do not establish vertical accuracy.

The product is not suitable for local flood-depth modeling, precise inundation delineation, irrigation grading, road or infrastructure design, or microrelief mapping without independent validation and higher-accuracy elevation data. Future work should integrate LiDAR, UAV photogrammetry, GNSS or geodetic control, and ICESat-2 sampling; document complete SNAP and SNAPHU parameters; harmonize vertical datums; and quantify error by slope, coherence, land cover, and region.

6. Supplementary Materials

The original contributions presented in this study are included in the article. Further inquiries can be directed to the corresponding author.

7. Author Contributions

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

8. Authors' Information

Arystanov, Asset - Farabi University, Faculty of Geography and Environmental Sciences, 71 al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, 050040; asset.arystanov@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-0341-5381>

Arystanova, Ranida - Kazakh British Technical University, Laboratory of Advanced Electronic Developments, Almaty, Kazakhstan, 050000; Farabi University, Faculty of Geography and Environmental Sciences, 71 al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, 050040; r.arystanova@kbtu.kz, arystanova_ranida2@live.kaznu.kz, <https://orcid.org/0009-0002-0711-2251>

Kabzhanova, Gulnara - LLP "Skyterra", 38 Alikhan Bokeikhan St., Astana, Kazakhstan, 010000; g.kabzhanova@skyterra.ai, <https://orcid.org/0000-0001-7002-4591>

Sagin, Janay - Kazakh British Technical University, Laboratory of Advanced Electronic Developments, Almaty, Kazakhstan, 050000; Western Michigan University, Department of Geological and Environmental Sciences, Kalamazoo, Michigan, USA, 49008; j.sagin@kbtu.kz, jay.sagin@wmich.edu, <https://orcid.org/0000-0002-0386-888X>

Kutymova, Nuray - Farabi University, Faculty of Geography and Environmental Sciences, 71 al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, 050040; kutymovanuray15@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7214-1708>

Abdikhalykova, Dariga - Farabi University, Faculty of Geography and Environmental Sciences, 71 al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, 050040; abdikhalykovadariga2023@gmail.com

Mamayeva, Aikerim - Farabi University, Faculty of Geography and Environmental Sciences, 71 al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, 050040; aikerim2091@gmail.com

9. Funding: This research was funded by the Kazakh Ministry of Science, grant number BR27197639 – Flood-drought mitigation innovations with managed aquifer recharge hydrogeological strategies for the Zhambyl, Almaty, Zhetysu, Abay, and East Kazakhstan regions.

10. Acknowledgements: The authors acknowledge the use of Sentinel-1 data provided through the Copernicus Programme and the open-source SNAP software developed by the European Space Agency.

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

12. References

1. Arystanov, A., Karabkina, N., Sagin, J., Nurguzhin, M., King, R., & Bekseitova, R. (2024). Use of indices applied to remote sensing for establishing winter–spring cropping areas in the Republic of Kazakhstan. *Sustainability*, 16(17), 7548. <https://doi.org/10.3390/su16177548>
2. Arystanov, A., Sagin, J., Karabkina, N., Arystanova, R., Yermekov, F., Kabzhanova, G., Bekseitova, R., Aktymbayeva, A., & Kutymova, N. (2025). Automatic classification of agricultural crops using Sentinel-2 data in the rainfed zone of Southern Kazakhstan. *Agronomy*, 15(9), 2040. <https://doi.org/10.3390/agronomy15092040>
3. Arystanov, A., Arystanova, R., Boribay, E., Sagin, J., Karabkina, N., Sarsekova, D., Perzadayeva, A., Munaitpassova, A., Yelikbayeva, S., & Tleubekuly, E. (2026). Interannual dynamics of fallow land extent in North Kazakhstan based on Sentinel-2 data for the recent period (2021–2025). *Agronomy*, 16(10), 1008. <https://doi.org/10.3390/agronomy16101008>
4. Arystanov, A., Sagin, J., Kabzhanova, G., Sarsekova, D., Bekseitova, R., Molzhigitova, D., Balkozha, M., Yeleuova, E., & Satvaldiyev, B. (2026). Winter cereal re-sowing and land-use sustainability in the foothill zones of Southern Kazakhstan based on Sentinel-2 data. *Sustainability*, 18(2), 1053. <https://doi.org/10.3390/su18021053>
5. Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14(4), R1–R54. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>
6. Bürgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28, 169–209. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
7. Chen, C. W., & Zebker, H. A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1709–1719. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802453>
8. Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
9. Fomelis, M., Delgado Blasco, J. M., Desnos, Y.-L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., Lu, J., & Wong, C. (2018). ESA SNAP–StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1364–1367). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519545>
10. Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>
11. Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
12. Kabzhanova, G., Arystanova, R., Bissembayev, A., Arystanov, A., Sagin, J., Nasiyev, B., & Kurmasheva, A. (2025). Remote sensing applications for pasture assessment in Kazakhstan. *Agronomy*, 15(3), 526. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030526>
13. Kyrgyzbay, K., Usmanov, T., Sagin, J., Duisebek, B., Arystanova, R., Kulbekova, S., Utepov, A., & Amanzholova, R. (2026). Spatial assessment of flood susceptibility in the Abai Region, Kazakhstan. *Water*, 18(7), 817. <https://doi.org/10.3390/w18070817>
14. Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441–500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>
15. Moretti, G., & Orlandini, S. (2018). Hydrography-driven coarsening of grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 54(5), 3654–3672. <https://doi.org/10.1029/2017WR021206>
16. Mukanov, Y., Arystanova, R., Sagin, J., Samarkhanov, K., Usmanov, T., Baisholanov, S., Arystanov, A., Koshim, A., Duisebek, B., & Zhukenova, A. (2026). A statistical analysis of multi-decadal trends in temperature, precipitation and drought indices in Eastern and

- Southeastern Kazakhstan between 1981 and 2023. *Agronomy*, 16(11), 1097. <https://doi.org/10.3390/agronomy16111097>
17. Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). Geomorphometry: a brief guide. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: concepts, software, applications* (Developments in Soil Science, Vol. 33, pp. 3–30). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9)
18. Reuter, H. I., & Nelson, A. D. (2009). Geomorphometry in ESRI packages. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: concepts, software, applications* (Developments in Soil Science, Vol. 33, pp. 269–291). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00011-1)
19. Sanders, B. F. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in Water Resources*, 30(8), 1831–1843. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.02.005>
20. Sarsekova, D., Sagin, J., Perzadayeva, A., Arystanova, R., Arystanov, A., Kezheneva, A., Jumassultanova, S., Satybaldiyeva, G., & Ospangaliyev, A. (2026). Farmers' land sustainability improvement with soil, geology, and water retention assessment in North Kazakhstan. *Sustainability*, 18(3), 1316. <https://doi.org/10.3390/su18031316>
21. Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309–319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
22. Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Navas Traver, I., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., & Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
23. Yagüe-Martínez, N., Prats-Iraola, P., Gonzalez, F. R., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., Eineder, M., & Bamler, R. (2016). Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), 2220–2234. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2497902>
24. Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J. C., Sampson, C. C., Kanae, S., & Bates, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5844–5853. <https://doi.org/10.1002/2017GL072874>
25. Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, P. D., Allen, G. H., & Pavelsky, T. M. (2019). MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset. *Water Resources Research*, 55(6), 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>
26. Zhou, Q., & Chen, Y. (2011). Generalization of DEM for terrain analysis using a compound method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(1), 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.08.005>

Қазақстанның шығыс және оңтүстік-шығыс өңірлерінде гидрологиялық талдау мен аумақтық жоспарлау міндеттері үшін жер бедерін цифрлық модельдеу

Асет Арыстанов, Ранида Арыстанова, Гүльнара Кабжанова, Жанай Сагин, Дариға Абдихалықова, Айкерім Мамаева

Андатпа: Мақалада Қазақстанның Алматы, Жетісу, Жамбыл, Абай және Шығыс Қазақстан облыстары үшін Sentinel-1 SLC радиолокациялық деректері негізінде жер бедерінің цифрлық моделін құру әдістемесі ұсынылады. Зерттеудің мақсаты гидрологиялық талдау, жерүсті ағынын бағалау, ықтимал су жиналу және су басу аймақтарын айқындау, морфометриялық сипаттамаларды шығару және аумақтық жоспарлауды кеңістіктік негіздеу үшін өңірлік геоақпараттық рельеф қабатын қалыптастыру болды. Жұмыста SNAP ортасындағы

интерферометриялық өңдеу және ArcGIS-тағы DEM постөңдеуі біріктірілді. Sentinel-1 жұптары түсірілім уақыты, орбита сәйкестігі, салыстырмалы орбита, базалық сызық, кеңістіктік қабысу және когеренттілік бойынша таңдалды. Өңдеу тізбегі метадеректерді тексеруді, S-1 Back Geocoding, ESD түзетуін, интерферограмма мен когеренттілік қабатын құруды, Goldstein фазалық сүзгілеуді, SNAPHU арқылы фазаны жазуды, геокодтауды, мозаикалауды, гидрокоррекцияны және еңістік, экспозиция, hillshade, flow direction және flow accumulation қабаттарын алуды қамтыды. Нәтижелер зерттеу аумағында жазық, тауалды және таулы аймақтардың айқын биіктік және морфоқұрылымдық айырмашылығын көрсетті. Құрылған модель су жинау алаптарын бөлуге, эрозияға қарсы жоспарлауға, ауыл шаруашылығы ландшафттарын контурлық ұйымдастыруға және су басу сценарийлерін дайындауға жарамды өңірлік аналитикалық негіз болып табылады. Сонымен бірге сантиметрлік дәлдік үшін LiDAR, ҰҰА фотограмметриясы немесе жерүсті геодезиялық өлшеулерімен біріктіру қажет.

Түйін сөздер: Sentinel-1; InSAR; жер бедерінің цифрлық моделі; DEM; SNAP; ArcGIS; гидрологиялық талдау; аумақтық жоспарлау; Қазақстан.

Цифровое моделирование рельефа для задач гидрологического анализа и территориального планирования в восточных и юго-восточных регионах Казахстана

Асет Арыстанов, Ранида Арыстановна, Гүльнара Кабжанова, Жанай Сагин, Дариға Абдихалықова, Айкерім Мамаева

Аннотация: В статье представлена методика регионального цифрового моделирования рельефа по данным радиолокационной съемки Sentinel-1 SLC для Алматинской, Жетысуской, Жамбылской, Абайской и Восточно-Казахстанской областей. Цель исследования заключалась в создании геоинформационной основы для гидрологического анализа, оценки направлений поверхностного стока, выявления потенциальных зон аккумуляции воды и подтопления, морфометрического анализа и территориального планирования в условиях сочетания равнинных, предгорных и горных ландшафтов. Методика объединяет интерферометрическую обработку в SNAP и последующую постобработку DEM в ArcGIS. Подбор пар Sentinel-1 выполнялся с учетом временного интервала, совпадения орбиты и относительной орбиты, длины базовой линии, пространственного перекрытия и ожидаемой когерентности. Обработка включала проверку метаданных, S-1 Back Geocoding, коррекцию Enhanced Spectral Diversity, построение интерферограммы и слоя когерентности, Goldstein Phase Filtering, фазовую развертку в SNAPHU, геокодирование, мозаичное объединение, гидрокоррекцию и расчет производных слоев slope, aspect, hillshade, flow direction и flow accumulation. Полученные карты показывают выраженную высотную и морфоструктурную дифференциацию территории, хорошо разделяют равнинные, предгорные и горные зоны, а также поддерживают интерпретацию водоразделов, тальвегов и долинных систем. Модель может использоваться для выделения водосборов, противоэрозионного планирования, контурной организации агроландшафтов и подготовки сценариев оценки подтопления. При этом результат следует рассматривать как региональную аналитическую DEM; сантиметровая детализация требует интеграции с LiDAR, БПЛА-фотограмметрией или наземной геодезической съемкой.

Ключевые слова: Sentinel-1; InSAR; цифровая модель рельефа; DEM; SNAP; ArcGIS; гидрологический анализ; территориальное планирование; Казахстан.

Development of research competencies in geomorphology education through the integration of digital technologies and modeling

Yerlan Nurkeyev, Yerdaulet Tulegenov*

Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan; er.nurkeev@gmail.com, tulegenov.e@qyzpu.edu.kz
Corresponding author: tulegenov.e@qyzpu.edu.kz

Abstract: In the context of the ongoing digitalisation of education and the growing importance of research-oriented learning, developing students' research competencies through interdisciplinary approaches has become a key priority in higher education. This study examines the integration of geomorphology with physics and digital technologies as a framework for enhancing research skills and scientific thinking, combining physical modelling with digital tools to deepen students' understanding of landform development processes while fostering analytical, critical, and systems thinking.

The study analyses the educational potential of physical models for demonstrating geomorphological processes - erosion, tectonic movements, and hydrological phenomena - enabling students to observe and interpret the dynamics of natural systems. It also explores the use of Geographic Information Systems (GIS), digital mapping, terrain simulation, and Big Data analysis for collecting, processing, visualising, and modelling geomorphological information, supporting the interpretation of experimental results and the development of digital literacy.

A step-by-step methodology for developing research competence is proposed, encompassing problem-based learning, physical experimentation, digital data analysis, and project-based interpretation of results. Students progress from observing natural phenomena to constructing models, analysing data, formulating hypotheses, identifying causal relationships, and presenting findings in digital formats, thereby developing independent inquiry, collaborative learning, and evidence-based reasoning.

Findings from a pedagogical study involving 30 students indicate that combining practical experiments with digital technologies is associated with increased research competencies, critical thinking, analytical ability, and problem-solving skills, as well as greater motivation to engage in scientific research. The proposed approach offers a practical model for training specialists capable of applying digital methods in geoscience education, relevant to the demands of the digital economy.

Keywords: geomorphology; interdisciplinary approach; physical models; digital technologies; GIS; data analysis; research competencies; research activity; student training; digital literacy.

Дәйексөз: Nurkeyev, Ye., Tulegenov, Ye. (2026). Development of research competencies in geomorphology education through the integration of digital technologies and modeling. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 156(3), 160-176.

<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-160-176>

Academic Editor:
A.M. Sergeyeva

Received: 28.07.2026

Revised: 18.08.2026

Accepted: 03.09.2026

Published: 30.09.2026



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

The relevance of integrating geomorphology with physics and digital technologies stems from modern requirements for training and teaching aimed at developing learners' research and digital competencies. As the science of landforms and their formation processes, geomorphology requires an understanding of the physical laws underlying natural phenomena such as tectonic movements, erosion, and hydrological processes. Furthermore, modern digital technologies - geographic information systems (GIS), digital mapping, terrain simulators, and big data analysis - not only allow for the visualisation and modelling of complex processes but also enable the development of learners' skills in analysing, interpreting, and processing information.

The integration of these subjects provides an interdisciplinary approach to education that promotes a deeper understanding of natural processes, develops critical thinking, and prepares learners for research and professional practice in the digital economy (Jia et al., 2025). Such an approach increases interest in the study of geomorphology, develops independent research and analytical skills, and makes the educational process applied and relevant.

The role of an interdisciplinary approach is to integrate knowledge, methods, and tools from various disciplines in order to develop a comprehensive understanding of the phenomena under study and to enhance learners' practical and research competencies. It ensures continuity of knowledge, links theory with practice, and develops skills in critical thinking, data analysis, and systematic problem-solving (Wu et al., 2024). Combining geomorphology with physics and digital technologies, for example, allows for the simultaneous study of natural processes, their physical laws, and modelling methods using modern analytical and visualisation tools, thereby fostering research independence, project-based thinking, and digital literacy.

The problem lies in the insufficient development of learners' research competencies. Despite possessing theoretical knowledge, most learners face difficulties in applying it in practice - formulating scientific hypotheses, analysing data, and interpreting results. Traditional teaching methods, which focus on memorising information and solving standard tasks, do not always foster independent research, critical thinking, or the use of quantitative tools (Aidoo, 2024). This is particularly important from a geomorphological perspective, since a full understanding of landform development processes requires the ability to analyse real data, construct models, and test hypotheses using modern technologies.

The aim of this article is to systematise the integration of interdisciplinary approaches in teaching geomorphology, using physical models and digital technologies to effectively develop students' research competencies. The article presents a step-by-step methodology for developing research skills - from observation and problem identification, through physical experiments and digital data analysis, to interpreting results and presenting them as academic projects.

The scientific novelty of this work lies in systematising and developing a methodology for a comprehensive, interdisciplinary approach to building independent research skills, encompassing physical experiments, digital data analysis, and project-based activities. Its practical significance lies in its potential application in schools and universities to improve the quality of student learning and to develop analytical thinking, research independence, and digital literacy. The use of physical and digital models makes the study of geomorphology visual, interactive, and motivating, strengthens the link between theory and practice, and increases students' interest in the subject.

Theoretical foundations of the interdisciplinary approach and a literature review

Interdisciplinary links in education involve integrating knowledge, methods, and approaches from various subjects to develop learners' holistic competencies. The interdisciplinary approach ensures continuity of knowledge, enables the integration of theoretical knowledge with practical skills, and fosters the ability to analyse, synthesise, and apply information across contexts. In educational practice, interdisciplinary links are realised through project-based activities, research tasks, the use of physical and digital models, and the application of data analysis tools, simulators, and GIS (Abdimanapov et al., 2025). This approach promotes critical thinking, systems analysis, and complex problem-solving skills, and enhances learners' motivation for independent research.

Interdisciplinary links are particularly relevant in the earth sciences, such as geomorphology, where combining physics, informatics, and digital technologies allows not only for the study of natural processes but also for their modelling, data visualisation, and the drawing of sound conclusions - thereby developing learners' research and digital literacy. Geomorphology studies landforms and their formation processes, which are governed by physical laws such as erosion, tectonic movements, and hydrological and geodynamic phenomena (Viles, 2016). Understanding these laws requires the ability to explain processes in physical terms, making the integration of physics and geomorphology a logical and necessary step in educational practice.

GIS, digital mapping, terrain modelling, and other modern digital technologies enable the management, analysis, and visualisation of large datasets. Integrating these tools with physical and geomorphological knowledge supports an interdisciplinary approach that develops learners' skills in independent research, analytical thinking, critical analysis, and digital literacy. The choice to integrate geomorphology, physics, and digital technologies is grounded in educational needs and the demands of the current scientific and professional context (Farooq et al., 2024). This approach combines theoretical knowledge, practical experiments, and digital data analysis, making the learning process visual, interactive, and motivating, while increasing students' interest in natural processes and developing competencies in demand in research and professional practice.

Modern research in geomorphology and geography education pedagogy demonstrates the growing importance of physical and digital methods for developing learners' research, analytical, and digital competencies. Physical terrain modelling remains a fundamental tool in this field, including scale models, hydraulic tables, sand and water simulators, laboratory terraces, and other devices that demonstrate erosion processes, tectonic movements, sediment accumulation, and hydrological changes. Such experimental facilities allow learners to observe the dynamics of landform-building processes, analyse cause-and-effect relationships, formulate hypotheses, and test them through controlled experiments (Franceschi et al., 2025; Panjaitan et al., 2023). This develops critical thinking, systematic analysis, and the ability to conduct experimental work and draw conclusions from empirical data.

In addition to physical models, modern teaching practices actively employ geographic information systems. GIS technologies enable the integration of spatial data from various sources - satellite imagery, elevation models, maps, and field measurements - and their visualisation on digital maps, supporting the analysis of spatial relationships and landform dynamics. The use of GIS in educational tasks contributes to the development of spatial thinking, the ability to work with cartographic information, and the analysis of large spatial datasets. Gladskoy et al. (2020) demonstrate the use of GIS technologies and digital relief models for studying geological structures, while a later study by Pavlova & Telyatnikov (2022) shows that GIS and digital terrain models in teaching geomorphology and ecology enable students to monitor environmental change, analyse deformation processes, and model spatial landscape transformations.

3D modelling and virtual environments are another integral part of the digital approach: using software such as Blender, Unity, and specialised GIS platforms, virtual models of terrain and natural processes can be created that closely resemble reality. These models allow learners to visualise complex geomorphological structures, undertake virtual "expeditions" to modelled landscapes, and simulate erosion or tectonic shifts within a simulator. Sang et al. (2020) show that creating 3D libraries of geological objects - for example, through photo-modelling - opens up stable, interactive educational opportunities, particularly for geostructures where field access is limited. Bondarenko et al. (2020) similarly highlight the didactic potential of virtual information learning environments, noting that such environments increase student engagement, develop geographical and digital literacy, and foster independent research, allowing learners to conduct experiments, model natural processes, and analyse data without leaving the virtual laboratory. The application of Big Data analysis in geomorphological education is also significant: research into large spatial and remote-sensing datasets (satellite imagery, LIDAR, DEM) shows that learners can develop skills in processing, filtering, aggregating, and visualising data, as well as identifying patterns and trends in

landform development (Samsul et al., 2023). This analytical approach contributes to the development of statistical processing, forecasting, and landscape-transformation modelling skills.

The literature review confirms that combining physical and digital methods is particularly effective in developing an interdisciplinary educational approach. It integrates practical experiments with digital analytical work, contributing to the holistic development of learners' independent research, critical thinking, project-based thinking, and digital and spatial literacy, while enhancing motivation through interactivity, experimentation, and visualisation. Overall, the literature suggests that physical terrain modelling methods together with digital tools (GIS, 3D modelling, simulators, Big Data) constitute a modern, well-established, and effective strategy for teaching geomorphology, helping to prepare learners for the demands of modern scientific and professional life.

2. Materials and Methods

A method for integrating physical models and quantitative tools in the teaching of geomorphology. The study of geomorphology requires an understanding of the dynamics of landform-forming processes, their physical laws, and methods of data analysis. An effective approach is to integrate physical models with quantitative tools, which supports interdisciplinary education and develops learners' research skills, analytical and critical thinking, and numeracy.

Figure 1 presents a diagram of the physical models used to study landform development, including terrain models, sand tables, hydraulic simulators, and various experimental setups that allow natural processes to be visualised, controlled, and analysed. The diagram illustrates the primary applications of these models - the study of erosion, tectonic processes, hydrology and flows, and their combinations - showing the formation of river channels, gullies, folds and faults, as well as the development of river valleys and alluvial plains, thereby providing a comprehensive understanding of the mechanisms of landform change.

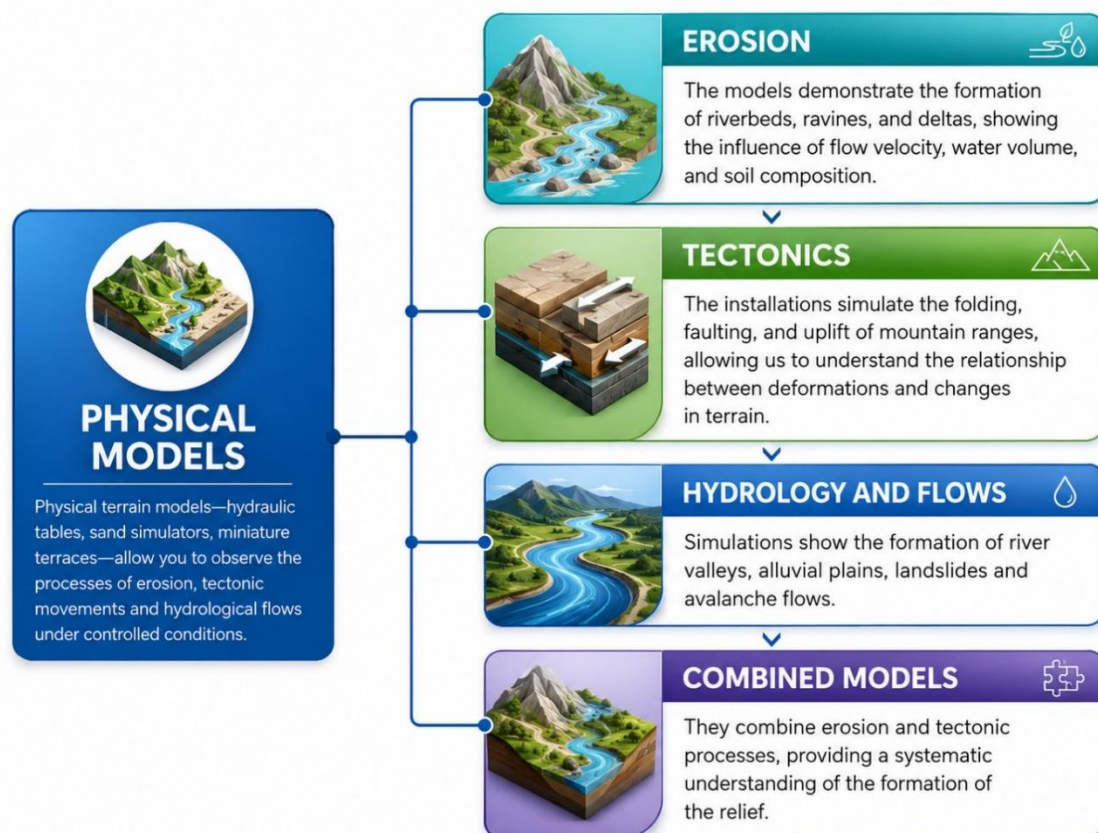


Figure 1. Types of physical models

Figure 2 shows how combining digital tools with physical experiments allows for hypothesis testing, process modelling, and the development of complex research projects. Integrating physical models with digital tools supports an interdisciplinary approach to studying geomorphology by linking hands-on observation with data analysis and visualisation (Xiong et al., 2022). This develops learners' research independence, critical and analytical thinking, project-based skills, and numeracy, increases motivation for the subject, and prepares students for scientific, professional, and interdisciplinary work in the context of contemporary science and the digital economy.

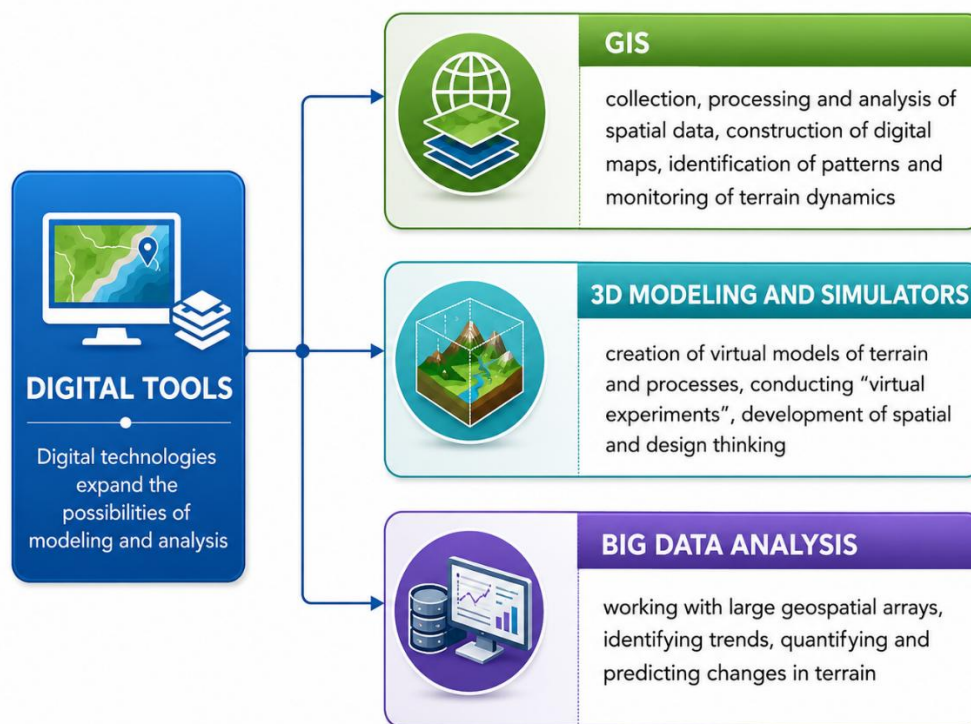


Figure 2. Types of digital tools

The use of digital technologies in teaching geomorphology. In modern geomorphological education, digital technologies play an important role in simulating complex natural processes (Luppichini et al., 2025), enabling their analysis and visualisation, and integrating data from various sources for the comprehensive study of landform processes. The main tools include:

- Geographic Information Systems (GIS): support the collection, processing, and spatial analysis of data on topography, hydrology, soils, and geological structures (Leeonis et al., 2024). Using GIS, researchers can create quantitative maps of erosion processes, monitor tectonic deformation dynamics, and identify patterns in the distribution of natural phenomena;
- Digital maps and satellite data (Big Data): enable work with large datasets such as digital elevation models (DEMs), remote sensing data, and LIDAR, supporting the quantitative analysis of landform changes, the assessment of large-scale processes, and the creation of predictive models;
- Digital laboratories and simulators of landform processes: allow virtual experiments with water currents, landslides, erosion, and tectonic movements, enabling learners to observe the results of changing parameters and model the consequences of natural phenomena;
- Virtual and Augmented Reality (VR/AR) environments: create interactive 3D models of terrain and dynamic processes, helping to develop learners' spatial reasoning, visualisation skills, and project-based approaches.

Using these tools enables students to:

1. Analyse complex data by integrating multiple information sources to identify patterns and dynamics in natural processes;
2. Conduct virtual investigations by modelling processes, monitoring the impact of individual factors, and testing hypotheses without requiring constant access to field sites;
3. Develop digital and research competencies by processing large datasets, visualising results, predicting landform changes, and drawing accurate conclusions;
4. Develop project-based skills and interdisciplinary thinking by integrating knowledge of geomorphology, physics, and information technology to comprehensively study natural processes.

The integration of digital technologies into geomorphology education creates a learning platform for developing learners' research independence, analytical and critical thinking, geospatial data skills, and digital literacy. Combining GIS, 3D modelling, simulators, and big data analysis within an interdisciplinary approach addresses the modern demands of science, engineering, and the digital economy (Horowitz & Schultz, 2014), ensuring a comprehensive understanding of landform development processes and developing competencies in demand for scientific, project-based, and professional activities.

Methods for developing students' research competence. Developing research competence is a key focus of modern education, preparing learners to independently seek, analyse, and interpret information, and to solve practical and scientific problems. The methodology for developing these competencies supports the development of analytical thinking, creativity, the ability to work with data, and independent research.

Principles for developing research competence:

- Scientific integrity and accuracy. Teaching is grounded in up-to-date scientific data, developing learners' understanding of scientific methodology and the criteria for scientific validity;
- Problem-based learning. The research process begins with a problem question or hypothesis that prompts the search for solutions and the analysis of information;
- A practical focus. Tasks are related to real-world processes and phenomena (natural, social, technical), increasing motivation and promoting the application of knowledge;
- Individuality and variety. Students may choose their own topics, methods, tools, and presentation formats;
- Integration of technologies. The use of physical models, digital tools, GIS, simulators, laboratories, and big data supports the development of research skills at a modern level (Yu & Zin, 2023).

Key components of learners' research competencies. Developing research competencies is a key objective of modern education, aimed at fostering learners' ability to independently acquire new knowledge, analyse information, and apply research findings to practical and theoretical problems (Tapullima-Mori et al., 2025). These competencies comprise several interrelated components that constitute individual aspects of research activity.

Figure 3 presents an infographic, "Methodology for Developing Students' Research Competence," outlining a step-by-step model for organising research activity in an interdisciplinary learning context using physical models and digital technologies. Each stage describes learners' activities, the tools used, and the expected learning outcomes, reflecting the logic of skill development - from identifying a problem to reflecting critically on one's own actions. The use of physical models, GIS, digital maps, Big Data technologies, 3D modelling, and data visualisation fosters analytical and critical thinking, independence, and a scientific approach in learners (Ki, 2019). The infographic illustrates the integration of traditional and digital teaching tools within a methodology aimed at developing systems thinking, communication skills, and reflective ability, and can be used as a visual tool for organizing research and project-based learning activities at various educational levels (Hickman, 2023). Because the development of research competencies is closely linked to modern digital tools that allow learners to work with real geospatial data, draw evidence-based conclusions, and design research solutions, acquiring these competencies fosters independent, critical, and project-

oriented thinking - essential for successful professional development in the context of the digital transformation of education and science.

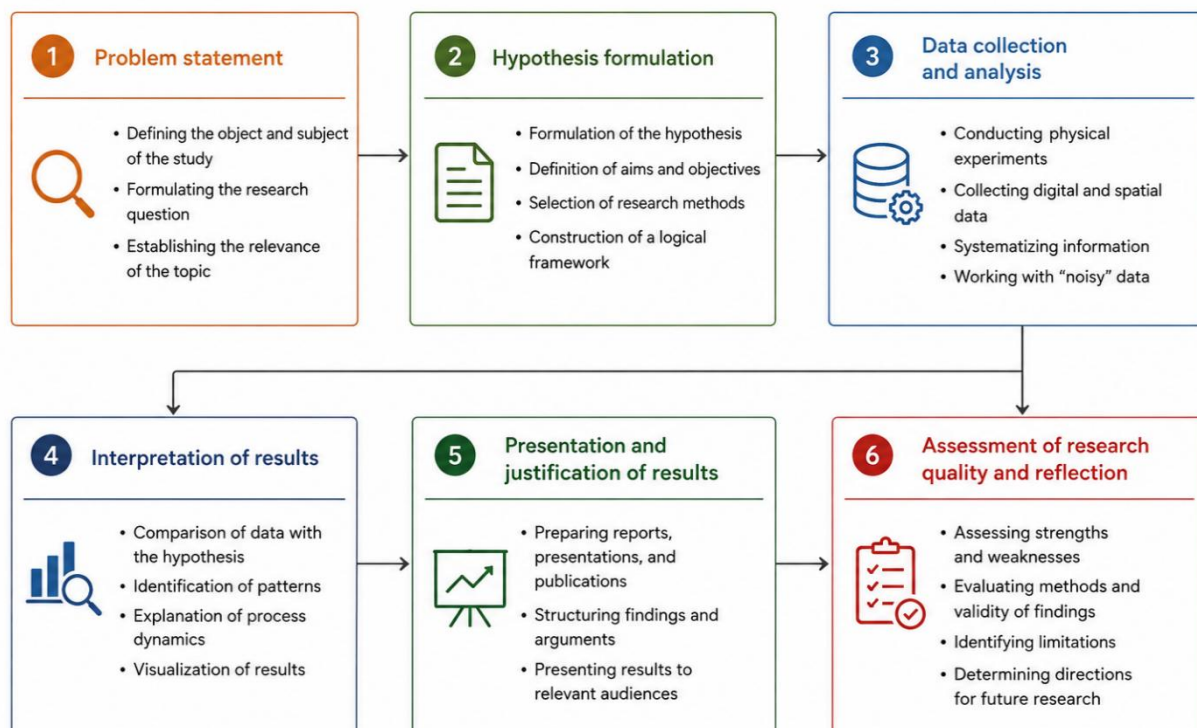


Figure 3. Methodology for developing learners' research competencies

A methodology for developing learners' research competence

The proposed methodology is organised as a sequential research process encompassing problem formulation, hypothesis development, data collection and analysis, interpretation of results, presentation and justification of findings, and assessment of research quality and reflection. These interconnected components reflect the logic of scientific inquiry and are aimed at the systematic development of students' research competencies. The principal learning objectives, activities, tools, and expected outcomes are summarised in Table 1.

Table 1. Developing research competencies

Objective	Activity	Tools	Outcome
Formulating the problem	Situation analysis and problem formulation	Cases, texts, graphics	Identifying the problem
Formulating a hypothesis	Formulating and planning a hypothesis	Discussions, diagrams, tables	Formulating a hypothesis
Data collection	Information seeking, experiments, observations	Databases, reference sources	Data collection skills
Data processing	Systematisation and preliminary processing	Databases, reference sources	Data processing skills
Interpreting results	Evaluating data, drawing conclusions	Tables, charts, graphs	Ability to draw conclusions

The proposed methodology can be applied in a variety of educational contexts, including research-based lessons, project- and research-oriented activities, and specialised educational programmes at colleges and universities. It can also be integrated into extracurricular learning environments, such as academic clubs, STEM laboratories, and digital workshops. This flexibility enables the methodology to support the systematic development of learners' research competencies across both formal and non-formal educational settings.

The proposed methodology provides a coherent and structured framework for developing learners' research competencies (Paucar-Curasma et al., 2025). Its components encourage conscious engagement in scientific inquiry and facilitate an understanding of the internal logic of the research process (Alipina & Kitapbaeva, 2023). A particular strength of the methodology is its practice-oriented nature, integrating problem-based and project-based activities, empirical data collection, physical modelling, and modern digital tools. Through these activities, learners develop the ability to formulate hypotheses, select appropriate research methods, analyse and interpret data, and critically evaluate research outcomes. Overall, the methodology promotes analytical thinking, cognitive independence, scientific reasoning, and the application of research skills to complex academic and practical problems in contemporary interdisciplinary educational contexts.

Stages of Learning for the Development of Research Competencies

1. Motivational stage. This stage creates the conditions for learners to engage actively in research. Project-based tasks, problem-based questions, real-world situations, and scenarios involving uncertainty are used to stimulate interest, strengthen motivation, and define the direction of subsequent inquiry.

2. Practical stage. This stage focuses on empirical investigation and data collection. Learners conduct physical experiments, make observations, or undertake fieldwork. The collected data are systematically recorded and transferred to digital environments, including GIS, spreadsheets, and digital simulators, for subsequent processing and analysis.

3. Analytical stage. This stage involves processing, analysing, and interpreting the collected data using statistical methods, numerical modelling, and graphical and spatial visualisation techniques. Learners construct graphs, maps, and models, identify relevant patterns and relationships, and assess the accuracy and reliability of the obtained results.

4. Presentation and reflective stage. The final stage focuses on communicating and evaluating research outcomes. Learners prepare a final product, such as a report, presentation, model, or research paper, present and interpret their findings, compare the results with the initial hypothesis, justify their conclusions, and reflect on the validity and scientific significance of their work.

3. Empirical research and results

The empirical component of the study was designed to evaluate changes in students' research competencies following the implementation of the proposed interdisciplinary methodology. The pedagogical study involved 30 students enrolled in the 6B01511 *Geography-History* educational programme at the Kazakh National Girls' Pedagogical University. Participation was voluntary, and the group included students with different levels of prior preparation in geography and informatics. The pedagogical intervention was conducted over a 15-week period during the fall semester of the 2025–2026 academic year. The pedagogical study was structured into four sequential and interconnected instructional stages: motivational, practical, analytical, and presentation-reflective. This heterogeneity provided an opportunity to examine the applicability of the methodology among learners with varying levels of subject-specific and digital competence. Given the relatively small sample size and the absence of a control group, the empirical findings should be interpreted as evidence of changes observed within the participating group rather than as results that can be generalised to a broader student population.

The overall structure of the instructional implementation and evaluation of the proposed methodology is presented in Figure 4.

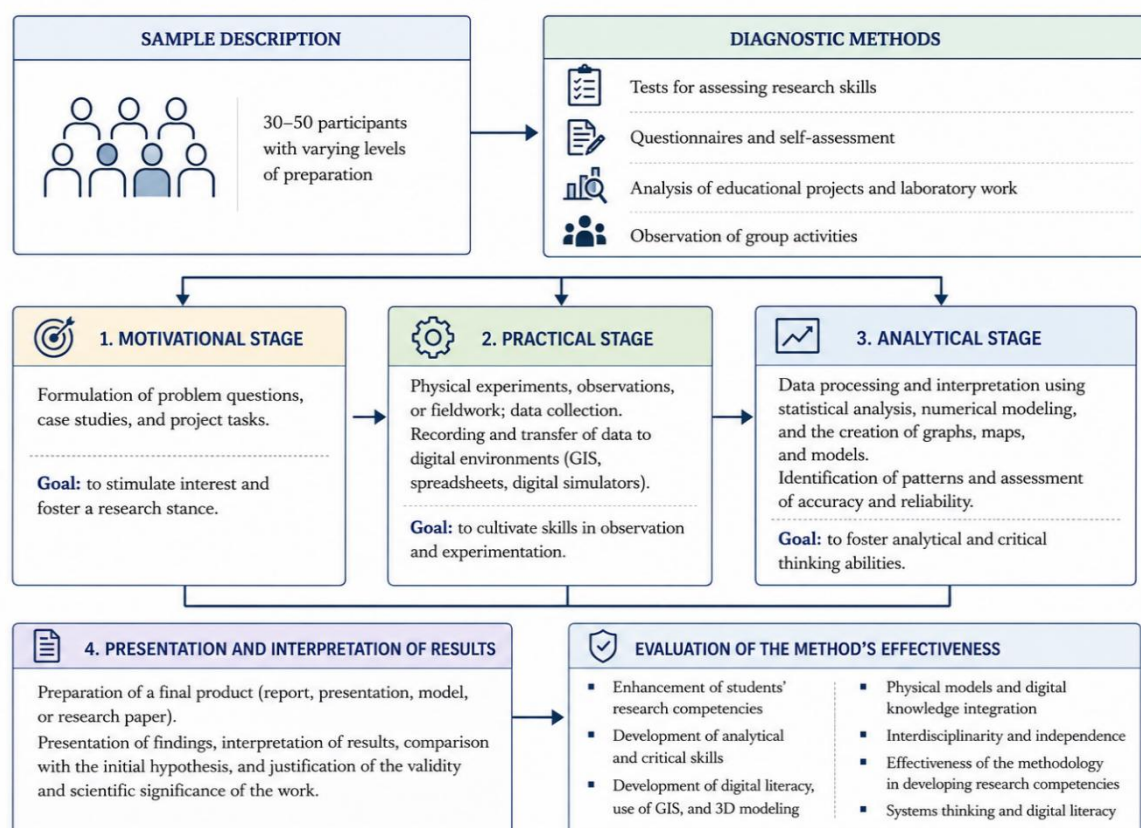


Figure 4. Stages of instructional implementation and evaluation of the proposed methodology

The pedagogical intervention followed four interconnected stages: motivational, practical, analytical, and presentation-reflective. During the motivational stage, students worked with problem-based tasks and analytical cases designed to stimulate interest in geomorphological inquiry and support the formulation of research questions and hypotheses. The practical stage involved experiments with physical terrain models, including hydraulic tables and sand-based terrain models, together with the application of GIS, 3D modelling, and digital simulation tools (Caldwell, 2001; Markov et al., 2022). During the analytical stage, students processed and interpreted the collected data, constructed graphs and visualisations, identified relationships and patterns, and formulated evidence-based conclusions. The presentation-reflective stage involved presenting mini-projects, discussing findings, evaluating initial hypotheses, and reflecting on the research process.

Assessment of Research Competencies

Changes in students' research competencies were assessed using multiple complementary methods. Structured testing was used to evaluate the ability to formulate research problems and hypotheses and to select appropriate research methods. Surveys and self-assessment instruments were used to examine students' confidence in working with physical models and digital technologies. In addition, students' mini-projects, reports, graphs, maps, and visualisations were analysed as evidence of their ability to apply research procedures in practice. Observation of group activities focused on participation, interaction, discussion of hypotheses, interpretation of evidence, and communication of research findings (Ilyashenko, 2019).

Diagnostics were conducted before and after the pedagogical intervention, allowing changes in the main components of students' research activity to be examined (Granberg et al., 2023). The combination of testing, coursework and project analysis, observation, and self-assessment was intended to provide a multidimensional evaluation rather than relying on a single assessment instrument. For each indicator, students' performance was evaluated using predefined assessment criteria corresponding to the research skills assessed. The scores obtained for each indicator were converted into percentages of the maximum achievable score. This procedure enabled direct

comparison of competency levels before and after the pedagogical intervention. The same assessment criteria and scoring procedure were applied at both measurement stages to ensure consistency and comparability of the results. Five indicators were considered: overall research competencies, skills in working with physical models, skills in working with digital tools, analytical and critical skills, and motivation and engagement. The results are presented as percentages of the maximum achievable level (Table 2).

Table 2. Evaluation of research competencies before and after the pedagogical intervention

Indicator	Before (%)	After (%)	Change (percentage points)
Research competencies	50	85	+35
Skills in working with physical models	40	80	+40
Skills in working with digital tools	45	78	+33
Analytical and critical skills	55	88	+33
Motivation and engagement	60	90	+30

Analysis of the Results

The descriptive results indicate positive changes across all five assessed indicators following the implementation of the methodology. Across the five indicators, the mean percentage score increased from 50.0% before the intervention to 84.2% after the intervention. This represents an absolute increase of 34.2 percentage points and a relative increase of 68.4%.

The largest change was observed in skills in working with physical models, which increased from 40% to 80% (+40 percentage points). Overall research competencies increased from 50% to 85% (+35 percentage points), while skills in working with digital tools and analytical and critical skills increased by 33 percentage points each. Motivation and engagement increased from 60% to 90% (+30 percentage points). Thus, improvement was observed across practical, digital, analytical, and motivational dimensions rather than being confined to a single component of research activity.

The changes in the assessed indicators before and after the pedagogical intervention are illustrated in Figure 5.

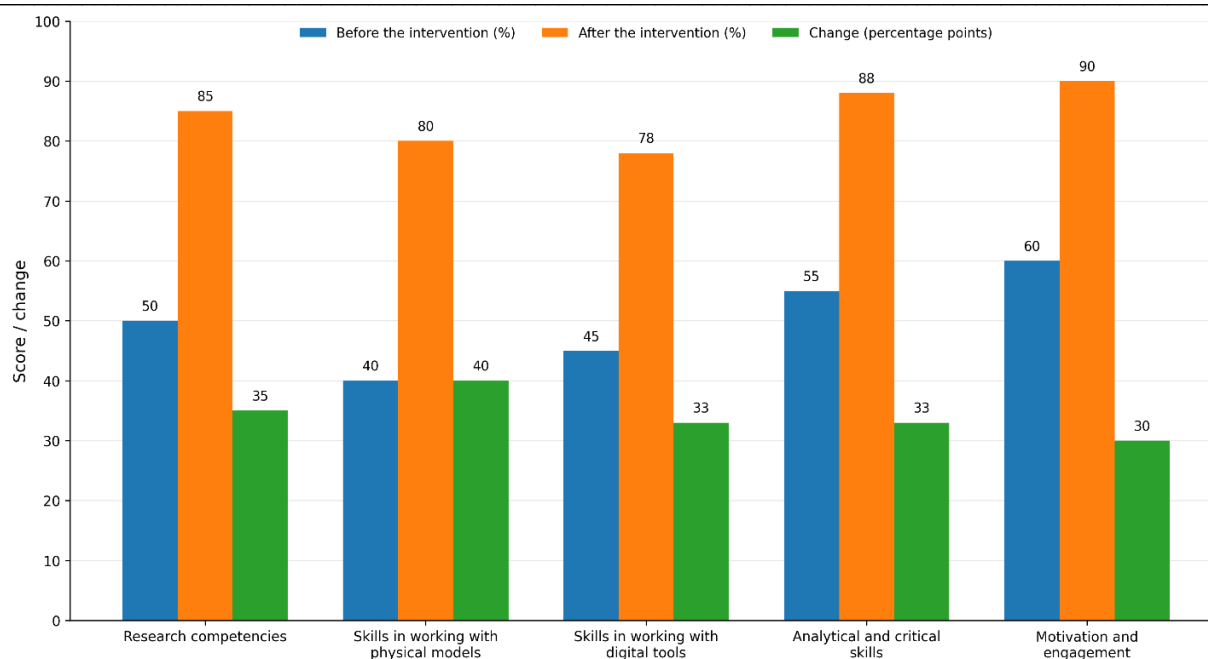


Figure 5. Changes in research competency indicators before and after the pedagogical intervention

The pattern shown in Figure 5 suggests that the most pronounced improvement occurred in students' ability to work with physical models. This finding is particularly relevant to the proposed methodology because physical experimentation constitutes an important link between theoretical explanations of geomorphological processes and their subsequent digital representation and analysis. Improvements in digital, analytical, and critical skills further suggest that combining hands-on experimentation with GIS, modelling, and data visualisation can provide a productive environment for research-oriented learning.

Because the available results are aggregated at the indicator level, they are interpreted descriptively in the present study. Claims of statistical significance are therefore avoided in the absence of individual-level pre- and post-intervention scores required for an appropriate inferential statistical test. Future applications of the methodology should incorporate individual-level measurements and, where possible, a comparison or control group to enable more robust statistical evaluation of intervention effects.

4. Discussion

The findings provide preliminary empirical support for the educational value of integrating physical modelling and digital technologies within a structured approach to geomorphology education. The observed improvements across the five competency indicators suggest that the methodology can support several interconnected dimensions of research-oriented learning, including empirical investigation, digital data processing, analytical reasoning, and learner engagement. However, given the single-group pre-post design, these changes should be interpreted as associations observed during the intervention rather than as evidence of a definitive causal effect.

The findings are broadly consistent with research emphasising the role of digital technologies in geographical education. GIS and related digital tools have been associated with the development of spatial thinking, analytical reasoning, and problem-solving skills (Bondarenko, 2025). Research on the digital transformation of geographical education has similarly highlighted the potential of technology-supported learning to increase student engagement and facilitate the understanding of complex geographical processes (Satymova, 2025). The present study extends this perspective by integrating digital technologies with physical terrain modelling rather than treating digital tools as an independent instructional component.

This combination constitutes an important feature of the proposed approach. Previous studies have demonstrated the educational potential of GIS, digital elevation models, 3D mapping, virtual environments, and physical representations of terrain for visualising and analysing geomorphological phenomena (Carbonell-Carrera & Hess-Medler, 2019; Polidori & El Hage, 2020; Vidal de Souza et al., 2025). In the present methodology, however, physical and digital modelling are incorporated into a single instructional sequence that progresses from problem formulation and empirical observation to data analysis, interpretation, presentation, and reflection. The specific contribution of the study therefore lies in connecting hands-on modelling with digital spatial analysis within a structured research-oriented framework and examining changes in students' competencies before and after its implementation.

The largest improvement in skills related to physical models is noteworthy in this context. Physical terrain models allow geomorphological processes to be observed and manipulated in a tangible form, whereas digital tools enable the resulting spatial patterns and relationships to be processed, visualised, and interpreted at a more analytical level. Their combined use may therefore facilitate a transition from the descriptive study of landforms towards process-oriented analysis, which is fundamental to contemporary geomorphology. Working with empirical observations and geospatial data also encourages students to formulate hypotheses, examine evidence, identify relationships, and justify conclusions rather than merely reproduce theoretical information.

At the same time, the effectiveness of technology-supported instruction depends on appropriate pedagogical and technical conditions. The integration of GIS, 3D modelling, and simulation environments requires adequate digital infrastructure and sufficient teacher competence. Limited access to specialised software or equipment and insufficient teacher preparation may constrain the implementation of the methodology. Consequently, its wider application should be accompanied by appropriate methodological support, teacher professional development, and adaptation to the technological resources available in individual educational institutions.

Several limitations should be considered when interpreting the findings. First, the study involved only 30 students from a single educational programme at one university, which limits the generalisability of the results. Second, the absence of a control group prevents direct comparison with conventional teaching approaches and does not allow the observed changes to be attributed exclusively to the intervention. Third, the available results are based on aggregated competency indicators; therefore, inferential statistical testing of individual pre-post differences could not be performed. Future research should involve larger and more diverse samples, individual-level assessment data, control or comparison groups, and appropriate inferential statistical procedures to evaluate the magnitude and statistical reliability of observed changes.

Despite these limitations, the study demonstrates the practical potential of combining physical terrain models with GIS, 3D modelling, simulation, and data-analysis tools in research-oriented geomorphology education. The proposed methodology creates a coherent connection between observation, experimentation, spatial analysis, interpretation, and scientific communication. Such integration may contribute to the development of research competencies, spatial and critical thinking, digital literacy, and students' ability to address complex geographical problems using multiple forms of evidence.

5. Conclusion

This study developed and evaluated an interdisciplinary methodology for fostering research competencies in geomorphology education through the integrated use of physical models and digital technologies. The proposed approach combines hands-on investigation of geomorphological processes with GIS, 3D modelling, digital simulation, and spatial data analysis within a structured research-oriented learning framework. This integration enables students to progress from problem formulation and hypothesis development to empirical observation, data analysis, interpretation, and scientific communication.

The pedagogical intervention showed positive changes across all assessed competency indicators. The mean score across the five indicators increased from 50.0% before the intervention to 84.2% after its implementation. The largest improvement was observed in skills related to physical models (+40 percentage points), followed by overall research competencies (+35 percentage points). Skills in working with digital tools and analytical and critical skills each increased by 33 percentage points, while motivation and engagement increased by 30 percentage points. These findings suggest that combining physical experimentation with digital analysis can support the development of research-oriented, analytical, and digital competencies in geomorphology education.

The specific contribution of the proposed methodology lies in integrating physical terrain modelling and digital technologies within a single instructional framework rather than treating them as separate educational tools. Physical models provide opportunities for direct observation and experimentation with erosion, tectonic, and hydrological processes, whereas digital technologies extend these activities through spatial analysis, modelling, visualisation, and interpretation. Their combined application supports a transition from the descriptive study of landforms towards a more process-oriented and evidence-based understanding of geomorphological phenomena.

From a practical perspective, the methodology can be incorporated into geography and geomorphology courses in higher education and, with appropriate adaptation, in colleges and other educational settings. It can support research-based and project-based learning, laboratory and field activities, student projects, and interdisciplinary modules combining geography, geoinformatics, and digital modelling. The framework may also contribute to curriculum development aimed at strengthening research skills, spatial thinking, digital literacy, and students' capacity for independent scientific inquiry.

The findings should nevertheless be interpreted in light of the study limitations. The pedagogical intervention involved a relatively small sample of 30 students from a single educational programme and did not include a control group. In addition, the available results were analysed at the aggregated indicator level, which did not permit inferential statistical testing of individual pre–post changes. Consequently, the observed improvements should be regarded as preliminary evidence supporting the potential of the methodology rather than as definitive proof of its causal effectiveness.

Future research should evaluate the methodology using larger and more diverse samples, control or comparison groups, individual-level pre–post measurements, and appropriate inferential statistical procedures. Longitudinal studies could further determine whether the observed competencies are retained and transferred to subsequent academic and professional activities. Additional research may also explore the integration of virtual laboratories, interactive 3D terrain environments, big geospatial data, and machine-learning applications. Such developments could extend the proposed framework and further strengthen the role of research-oriented, interdisciplinary, and digitally supported learning in contemporary geomorphology education.

6. Supplementary Materials: No supplementary materials.

7. Author Contributions:

Conceptualization – Ye.N.; methodology – Ye.N.; software – Ye.N.; investigation – Ye.N., Ye.T.; resources – Ye.N., Ye.T.; methodology development, provision of research materials, and supervision – Ye.T.; writing – original draft preparation, review, editing, and formal analysis – Ye.N.

8. Information about the Authors:

Nurkeyev, Yerlan – Master of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer, Kazakh National Women's Teacher Training University, 114/1 Gogol Street, Almaty 050000, Kazakhstan; er.nurkeev@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8940-6127>

Tulegenov, Yerdaulet – PhD, Acting Associate Professor, Kazakh National Women's Teacher Training University, 114/1 Gogol Street, Almaty 050000, Kazakhstan; tulegenov.e@qyzpu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-4586-9642>

9. Funding: This research received no external funding.

10. Acknowledgements: None.

11. Conflict of Interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

12. References

1. Abdimanapov, B., Kumarbekuly, S., & Gaisin, I. (2025). Technology for achieving learning objectives through a system-activity approach and the development of critical thinking in geography studies. *Journal of Ecohumanism*, 3(8), 11989–12004. <https://doi.org/10.62754/joe.v3i8.5797>
2. Aidoo, B. (2024). A reflective study on adopting inquiry-based science teaching methods. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 6, 29. <https://doi.org/10.1186/s43031-024-00119-3>
3. Alipina, K. B., & Kitapbaeva, A. A. (2023). Formation of research competencies of students (Bilim alushylyardyn gylymi-zertteu quzyrettiligin qalyptastyru in Kazakh). *Iasau universitetinin habarshysy*, (4)130, 344–360. <https://doi.org/10.47526/2023-4/2664-0686.28>
4. Bondarenko, O. V. (2025). Teaching geography with GIS: a systematic review, 2010–2024. *Science Education Quarterly*, 2(1), 24–40. <https://doi.org/10.55056/seq.903>
5. Bondarenko, O., Pakhomova, O., & Lewoniewski, W. (2020). The didactic potential of virtual information educational environment as a tool of geography students training. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2002.07473>
6. Caldwell, D. R. (2001). Physical terrain modeling for geographic visualization. *Cartographic Perspectives*, 38, 66–72. <https://doi.org/10.14714/CP38.795>
7. Carbonell-Carrera, C., & Hess-Medler, S. (2019). 3D landform modeling to enhance geospatial thinking. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 65. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020065>
8. D’Este, P., & Robinson-García, N. (2023). Interdisciplinary research and the societal visibility of science: the advantages of spanning multiple and distant scientific fields. *Research Policy*, 52, 104609. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104609>
9. Farooq, E., Zaidi, E., & Shah, M. M. A. (2024). The future classroom: Analyzing the integration and impact of digital technologies in science education. *Jurnal Penelitian dan Pengkajian Ilmu Pendidikan: E-Saintika*, 8(2), 280–318. <https://doi.org/10.36312/esaintika.v8i2.1957>
10. Franceschi, L., Bosino, A., La Licata, M., & De Amicis, M. (2025). Geomorphological mapping and social sciences: a qualitative review. *Geosciences*, 15(7), 271. <https://doi.org/10.3390/geosciences15070271>
11. Gladskoy, I. B., Pavlova, A. V., & Telyatnikov, I. S. (2020). Use of GIS technologies and a digital relief model to study processes in the geological structures of the region. *Ecological Bulletin of the Scientific Centres of the Black Sea Economic Cooperation*, 17(2), 29–35. <https://doi.org/10.31429/vestnik-17-2-29-35>
12. Granberg, C., Palm, T., & Palmberg, B. (2021). A case study of a formative assessment practice and the effects on students’ self-regulated learning. *Studies in Educational Evaluation*, 68, 100955. <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2020.100955>
13. Hickman, J. (2023). Spatial thinking and GIS: developing and assessing student competencies. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 32(2), 140–158. <https://doi.org/10.1080/10382046.2022.2138172>
14. Horowitz, S. S., & Schultz, P. H. (2014). Printing space: using 3D printing of digital terrain models in geosciences education and research. *Journal of Geoscience Education*, 62(1), 138–145. <https://doi.org/10.5408/13-031.1>

15. Ilyashenko, L. K. (2019). Determining the level of students' research skills and designing a model of influencing factors on research skills. *Humanities & Social Sciences Reviews*, 7(3), 581–584. <https://doi.org/10.18510/hssr.2019.7386>
16. Jia, W., Pan, L., Neary, S., & Moore, N. (2025). Interdisciplinary knowledge flow in international higher education research: characteristics and mechanisms. *Education Sciences*, 15(2), 221. <https://doi.org/10.3390/educsci15020221>
17. Katoh, S., Aalbers, R., & Sengoku, S. (2021). Effects and interactions of researcher's motivation and personality in promoting interdisciplinary and transdisciplinary research. *Sustainability*, 13(22), 12502. <https://doi.org/10.3390/su132212502>
18. Ki, J. (2019). GIS and big data visualization. In *Geographic information systems and science*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82052>
19. Leonis, A. N., Ahmed, M. F., Mokhtar, M. B., Lim, C. K., & Halder, B. (2024). Challenges of using a Geographic Information System (GIS) in managing flash floods in Shah Alam, Malaysia. *Sustainability*, 16(17), 7528. <https://doi.org/10.3390/su16177528>
20. Luppichini, M., Capolongo, D., Scardino, G., Scicchitano, G., & Bini, M. (2025). Artificial intelligence in geomorphology: a bibliometric analysis of trends, techniques, and global research patterns. *Geosciences*, 15(9), 331. <https://doi.org/10.3390/geosciences15090331>
21. Markov, D. S., Ginko, V. I., & Malygin, A. D. (2022). Development of geoinformation competencies among students majoring in History and Geography (44.03.05 Pedagogical Education). *Samara Journal of Science*, 11(1), 307–313. <https://doi.org/10.55355/snv2022111308>
22. Muhamad Dah, N., Mat Noor, M. S. A., Kamarudin, M. Z., & Syed Abdul Azziz, S. S. (2024). The impacts of open inquiry on students' learning in science: a systematic literature review. *Educational Research Review*, 43, 100601. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2024.100601>
23. Panjaitan, B. R., Ningrum, E., & Waluya, B. (2023). Digital learning tools in geography education: A systematic literature review. *The Eurasia Proceedings of Educational and Social Sciences*, 33, 135–143. <https://doi.org/10.55549/epess.1413355>
24. Paucar-Curasma, R., Unsihuay-Tovar, R. F., Acra-Despradel, C., & Villalba-Condori, K. O. (2025). Integration of technological resources and problem-solving method for the development of research competencies in engineering and nursing students from two public universities in Peru. *Education Sciences*, 15(9), 1250. <https://doi.org/10.3390/educsci15091250>
25. Pavlova, A. V., & Telyatnikov, I. S. (2022). Use of GIS technologies and a digital terrain model to study spatial processes. *Ecological Bulletin of the Scientific Centres of the Black Sea Economic Cooperation*, 19(1), 35–41. <https://doi.org/10.31429/vestnik-19-1-35-41>
26. Polidori, L., & El Hage, M. (2020). Digital elevation model quality assessment methods: a critical review. *Remote Sensing*, 12(21), 3522. <https://doi.org/10.3390/rs12213522>
27. Samsul, S. A., Yahaya, N., & Abuhassna, H. (2023). Education big data and learning analytics: A bibliometric analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*, 10, 709. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02176-x>
28. Sang, X., Xue, L., Leng, X., Li, X., & Zhou, J. (2020). Using photo modeling based 3DGRSL to promote the sustainability of geo-education: a case study from China. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2004.05535>
29. Satymova, Z. (2025). Interdisciplinary research methodologies in teaching geography under digital transformation. *Eurasian Science Review: An International Peer-Reviewed Multidisciplinary Journal*, 3(7), 152–159. <https://doi.org/10.63034/esr-573>
30. Tapullima-Mori, C., Pizzan Tomanguillo, S., Pizzan Tomanguillo, N., Vásquez Sánchez, M., & Soria Quijaite, J. (2025). Charting the path to excellence: a review of research competencies in university students. *Journal of Technology and Science Education*, 15(2), 364–379. <https://doi.org/10.3926/jotse.2729>

31. Vidal de Souza, A. S., Maia, R. P., Rocha, H., Araújo, M. B. de, & Moura, P. E. de F. (2025). Technologies applied to geomorphology teaching - virtual reality and digital models. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 26(3). <https://doi.org/10.20502/rbg.v26i3.2639>
32. Viles, H. (2016). Technology and geomorphology: are improvements in data collection techniques transforming geomorphic science? *Geomorphology*, 270, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.011>
33. Wu, S., Lin, M., Ji, M., & Wang, T. (2024). Exploring core knowledge in interdisciplinary research: Insights from topic modeling analysis. *Applied Sciences*, 14(21), 10054. <https://doi.org/10.3390/app142110054>
34. Xiong, L., Li, S., Tang, G., & Strobl, J. (2022). Geomorphometry and terrain analysis: data, methods, platforms and applications. *Earth-Science Reviews*, 233, 104191. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104191>
35. Yu, L., & Zin, Z. M. (2023). The critical thinking-oriented adaptations of problem-based learning models: a systematic review. *Frontiers in Education*, 8, 1139987. <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1139987>

Цифрлық технологиялар мен модельдеуді интеграциялау арқылы геоморфологияны оқытуда зерттеу құзыреттіліктерін дамыту

Ерлан Нуркеев, Ердаулет Тулегенов

Аңдатпа: Білім беруді цифрландыру үдерісінің жалғасуы және зерттеуге бағытталған оқытудың маңыздылығының артуы жағдайында пәнаралық тәсілдер арқылы студенттердің зерттеу құзыреттіліктерін дамыту жоғары білім берудің негізгі басымдықтарының біріне айналды. Бұл зерттеуде зерттеу дағдылары мен ғылыми ойлауды жетілдірудің негізі ретінде геоморфологияны физика және цифрлық технологиялармен интеграциялау қарастырылады. Физикалық модельдеу мен цифрлық құралдарды ұштастыру студенттердің жер бедерінің қалыптасу үдерістерін терең түсінуіне, сондай-ақ аналитикалық, сыни және жүйелік ойлау қабілеттерін дамытуға бағытталған.

Зерттеуде эрозия, тектоникалық қозғалыстар және гидрологиялық құбылыстар сияқты геоморфологиялық үдерістерді көрсету үшін физикалық модельдердің білім беру әлеуеті талданды. Бұл модельдер студенттерге табиғи жүйелердің динамикасын бақылауға және түсіндіруге мүмкіндік береді. Сонымен қатар геоморфологиялық ақпаратты жинау, өңдеу, визуализациялау және модельдеу үшін географиялық ақпараттық жүйелерді (GIS), цифрлық картографиялауды, жер бедерін модельдеуді және үлкен деректерді (Big Data) талдауды қолдану қарастырылды.

Аталған технологиялар эксперимент нәтижелерін түсіндіруге және цифрлық сауаттылықты дамытуға ықпал етеді. Зерттеу құзыреттіліктерін дамытуға арналған кезеңдік әдістеме ұсынылды. Ол проблемалық оқытуды, физикалық эксперимент жүргізуді, цифрлық деректерді талдауды және нәтижелерді жобалық негізде түсіндіруді қамтиды. Студенттер табиғи құбылыстарды бақылаудан бастап модельдер құруға, деректерді талдауға, гипотезалар ұсынуға, себеп-салдарлық байланыстарды анықтауға және зерттеу нәтижелерін цифрлық форматта ұсынуға дейінгі кезеңдерден өтеді. Бұл үдеріс өз бетінше зерттеу жүргізу, бірлесіп оқу және дәлелдерге негізделген ғылыми пайымдау дағдыларын дамытуға мүмкіндік береді.

30 студенттің қатысуымен жүргізілген педагогикалық зерттеу нәтижелері практикалық эксперименттерді цифрлық технологиялармен ұштастыру зерттеу құзыреттіліктерінің, сыни ойлаудың, аналитикалық қабілеттердің және проблемаларды шешу дағдыларының артуымен, сондай-ақ ғылыми зерттеулерге қатысу уәжінің жоғарылауымен байланысты екенін көрсетті. Ұсынылған тәсіл цифрлық экономика талаптарына сәйкес келетін және геоғылымдарды

оқытуда цифрлық әдістерді қолдана алатын мамандарды даярлаудың практикалық моделін ұсынады.

Түйін сөздер: геоморфология; пәнаралық тәсіл; физикалық модельдер; цифрлық технологиялар; GIS; деректерді талдау; зерттеу құзыреттіліктері; зерттеу қызметі; студенттерді даярлау; цифрлық сауаттылық.

Развитие исследовательских компетенций при обучении геоморфологии посредством интеграции цифровых технологий и моделирования

Ерлан Нуркеев, Ердаулет Тулегенов

Аннотация: В условиях продолжающейся цифровизации образования и возрастания значимости исследовательски-ориентированного обучения развитие исследовательских компетенций студентов посредством междисциплинарных подходов становится одним из ключевых приоритетов высшего образования. В данном исследовании рассматривается интеграция геоморфологии, физики и цифровых технологий как основа для развития исследовательских навыков и научного мышления.

Сочетание физического моделирования и цифровых инструментов направлено на углубление понимания студентами процессов формирования рельефа, а также на развитие аналитического, критического и системного мышления. В исследовании анализируется образовательный потенциал физических моделей для демонстрации геоморфологических процессов - эрозии, тектонических движений и гидрологических явлений, позволяющих студентам наблюдать и интерпретировать динамику природных систем. Также рассматривается применение географических информационных систем (GIS), цифрового картографирования, моделирования рельефа и анализа больших данных (Big Data) для сбора, обработки, визуализации и моделирования геоморфологической информации.

Использование данных технологий способствует интерпретации результатов экспериментов и развитию цифровой грамотности. Предложена поэтапная методика развития исследовательских компетенций, включающая проблемно-ориентированное обучение, проведение физических экспериментов, анализ цифровых данных и проектную интерпретацию полученных результатов. Студенты последовательно переходят от наблюдения природных явлений к построению моделей, анализу данных, формулированию гипотез, выявлению причинно-следственных связей и представлению результатов в цифровом формате. Такой подход способствует развитию самостоятельной исследовательской деятельности, совместного обучения и научного мышления, основанного на доказательствах.

Результаты педагогического исследования с участием 30 студентов показывают, что сочетание практических экспериментов и цифровых технологий связано с повышением уровня исследовательских компетенций, критического мышления, аналитических способностей и навыков решения проблем, а также с усилением мотивации к участию в научно-исследовательской деятельности. Предлагаемый подход представляет собой практическую модель подготовки специалистов, способных применять цифровые методы в геонаучном образовании, и соответствует современным требованиям цифровой экономики.

Ключевые слова: геоморфология; междисциплинарный подход; физические модели; цифровые технологии; GIS; анализ данных; исследовательские компетенции; исследовательская деятельность; подготовка студентов; цифровая грамотность.

Пространственная дифференциация городов Центральной Азии в условиях демографической и экологической трансформации: индексный подход и стратегии устойчивого развития

Гульнара Нюсупова¹, Стивен С. Янг², Асем Сарсембаева^{1*}, Асел Баятанова¹, Айгерим Нурболкызы¹, Чингиз Жумагулов¹

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; gulnara.nyussupova@kaznu.kz, a.sarsembayeva.kz@gmail.com, bayatanova.assel@gmail.com, aikenti1987@inbox.ru, c.zhumagulov@gmail.com

²Сейлемский государственный университет, Сейлем, МА, США; syoung@salemstate.edu

*Корреспонденция: a.sarsembayeva.kz@gmail.com

Цитирование: Нюсупова, Г., Янг, С., Сарсембаева, А., Баятанова, А., Нурболкызы, А., Жумагулов, Ч. (2026). Пространственная дифференциация городов Центральной Азии в условиях демографической и экологической трансформации: индексный подход и стратегии устойчивого развития. Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География, 156(3), 177-191. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-177-191>

Академический редактор:
А.М. Сергеева

Поступила: 30.05.2026
Исправлена: 03.06.2026
Принята: 14.09.2026
Опубликована: 30.09.2026



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. Статья посвящена количественной оценке пространственной дифференциации городских систем Казахстана, Кыргызстана, Узбекистана и Таджикистана в условиях одновременного демографического и экологического давления. Временной охват - 2019–2024 гг. Цель работы состоит в разработке и апробации Индекса эколого-демографической нагрузки (ИЭДН) - составного показателя, объединяющего нормализованные данные о сальдо миграции, дефиците зелёных зон, риске водного стресса и уровне урбанизации. Практическая значимость определяется тем, что существующие подходы, как правило, рассматривают демографическое и экологическое измерения по отдельности, тогда как именно их совместное действие формирует специфическую для региона модель расселения - с перегруженными ядрами на одном полюсе и обескровленной периферией - на другом. Типология 21 субнационального региона и города выявила три устойчивых класса: ядра-абсорбенты (ИЭДН $\geq 0,70$; 7 единиц), буферные зоны (0,40–0,69; 2 единицы) и активные доноры с критическим экологическим стрессом (ниже 0,40; 12 единиц). Семикратный разрыв значений ИЭДН между крайними полюсами выборки подтверждает острую поляризацию расселения. Для каждого типа территорий предложены адресные стратегии планирования, согласованные с целями ЦУР 11 и ЦУР 13.

Ключевые слова: демография; пространственная дифференциация; эколого-демографическая нагрузка; климатическая миграция; ложная урбанизация; ЦУР 11; ЦУР 13; Центральная Азия; полицентричное развитие.

1. Введение

Когда в начале 1990-х годов рушилась советская плановая система, вместе с ней рушились и механизмы, которые более или менее равномерно распределяли население по территории.

Промышленные предприятия в малых городах закрывались или деградировали; дотационная поддержка отдалённых районов прекращалась; инфраструктура - дороги, больницы, школы - переставала обслуживаться. Это запустило устойчивый отток населения из малых городов и сельской местности. Постепенно нарастая, внутренние миграционные потоки концентрировались в тех центрах, где сохранялись доступные рабочие места и более благоприятные условия жизни, - то есть в нескольких крупных городах (Centre for Economic Research, 2013).

К 2000 году суммарное население четырёх стран - Казахстана, Кыргызстана, Узбекистана и Таджикистана - составляло около 55 млн человек; по прогнозам Всемирного банка, к 2050 году оно превысит 105 млн (World Bank, 2021). Принципиальное значение имеет не сам прирост, а его пространственное распределение. Рисунок 1 показывает, что параллельно с ростом общей численности населения стремительно нарастает и число внутренних климатических мигрантов: с примерно 200 тысяч человек в 2000 году до потенциальных 2,4 млн к 2050-му. Большинство из них движется в одном направлении - в несколько городов, инфраструктурная ёмкость которых не рассчитана на приток такого масштаба.

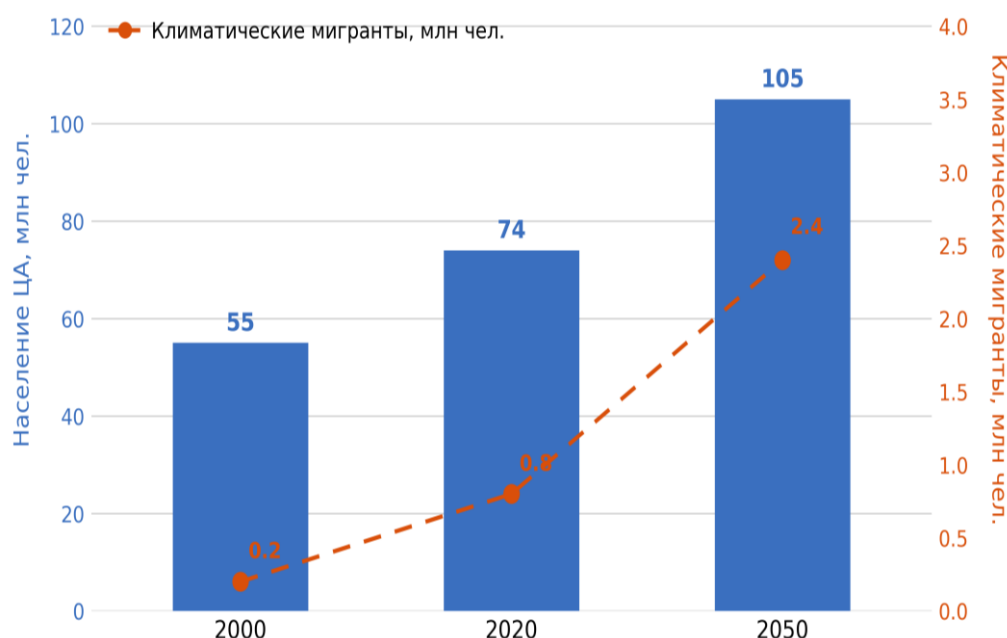


Рисунок 1. Динамика населения и прогноз климатической миграции в Центральной Азии, 2000–2050 гг.

Примечание: составлено авторами на основе данных национальных статистических ведомств и прогнозов Всемирного банка (Groundswell: Preparing for Internal Climate Migration (World Bank, 2021))

Последнее десятилетие добавило к этой картине новое измерение, которое прежде воспринималось как нечто далёкое и абстрактное, - экологический кризис. Ледники Тянь-Шаня и Памира, по имеющимся оценкам, потеряли за последние полвека от 30 до 40 % своего объёма (Idrisov, 2023). Аральское море практически исчезло. Дефицит поливной воды в Ферганской долине, в Сурхандарьинской и Хатлонской областях носит регулярный характер и ежегодно фиксируется в вегетационный период. Отток населения обусловлен здесь не притягательностью городов, а утратой условий для хозяйственной деятельности на прежнем месте. Этот тип миграции принципиально отличается от экономического: финансовыми инструментами его не остановить.

Парадокс нынешней ситуации состоит в том, что обе проблемы - избыточная концентрация в ядрах и опустение периферии - хорошо задокументированы по отдельности, но почти не изучены в связке. Работы по внутренней миграции, как правило, акцентируют

рыночные детерминанты и лишь вскользь упоминают экологический контекст (Bulegenova et al., 2024; Shchesnovich, 2023). Публикации об экологической деградации, напротив, редко выходят на вопросы расселения (Idrisov, 2023; Seitov, 2023). Разрыв между двумя исследовательскими традициями ведёт к тому, что ни одна из них не даёт полноценной оценки совокупного давления на городские системы. Настоящая работа предпринимает попытку его восполнить.

Цель исследования - разработать и апробировать интегральный индексный инструмент для совместного измерения демографической и экологической нагрузки на урбанизированные системы Центральной Азии, построить на его основе типологию субнациональных территорий и предложить дифференцированные рекомендации в логике ЦУР 11 и ЦУР 13. Для этого последовательно решались четыре задачи: гармонизация данных по 21 региону четырёх стран за 2019–2024 гг.; конструирование Индекса эколого-демографической нагрузки (ИЭДН); построение типологии; субрегиональная верификация через кейс Бухарской области.

Теоретические истоки и состояние вопроса

Идея о том, что пространственные диспропорции самовоспроизводятся, а не выравниваются под давлением рыночных сил, имеет долгую историю в экономической географии. Мюрдаль описал этот механизм через концепцию кумулятивной причинности (Myrdal, 1957): капитал притягивает квалифицированный труд, который порождает новые инвестиции - и так по кругу; периферия же оказывается в зеркально обратной ситуации. Фридман переложил ту же логику на пространственный язык через модель «центр - периферия» (Friedmann, 1966), ставшую отправной точкой для большинства последующих региональных исследований.

В постсоветском контексте эта схема получила конкретное воплощение. Нефёдова и Трейвиш (Nefyodova & Treivish, 2002) зафиксировали, что российские и в целом постсоветские миграционные потоки выстраиваются в строгую иерархическую последовательность: сначала люди перетекают из сёл в районные центры, затем - в областные, затем - в столицы. Малые города проигрывают на каждом этапе этой цепочки. Применительно к Центральной Азии схожий вывод делают Бюлегенова и соавторы (Bulegenova et al., 2024), систематически отслеживавшие агломерационную динамику региона за 2000–2023 годы: во всех четырёх странах темпы роста столичных агломераций последовательно превышают среднереспубликанские.

Морфологическую сторону процесса детально описали Демидова и Макушин (Demidova & Makushin, 2025) на примере Алматы и Бишкека. Уплотнение советской малоэтажной застройки, поглощение пригородных посёлков, застройка бывших зелёных зон - всё это авторы фиксируют как системные, а не случайные трансформации. Параллельно Нюсупова и соавторы (Nyussupova et al., 2025b) апробировали индексный подход к оценке городской устойчивости казахстанских городов, применив процедуру линейного масштабирования (min-max normalization) для приведения разнородных показателей к единой шкале. Именно эта методология взята нами за основу при конструировании ИЭДН.

Молодёжное измерение проблемы заслуживает отдельного упоминания. МОМ фиксирует (IOM, 2019), что 43,8 % мигрантов в регионе - лица в возрасте 15–34 лет. Значительная часть из них, оказавшись в пригородных зонах крупных городов без нормальной работы и доступного образования, пополняет прослойку NEET (Not in Education, Employment or Training). По данным Кошербаевой (Kosherbayeva, 2018), рост этой прослойки служит одним из наиболее чувствительных индикаторов нарушения устойчивости городского развития - и одновременно указывает на то, что принимающие города не справляются с нагрузкой.

Климатическое измерение в течение долгого времени оставалось на периферии академического внимания применительно к Центральной Азии. Идрисов (Idrisov, 2023) и Сеитов (Seitov, 2023) - в числе немногих, кто последовательно рассматривает водный дефицит именно как вытесняющий фактор, а не просто как экологическую проблему сельских

территорий. Принципиальная особенность климатической миграции, на которую оба автора обращают внимание: она необратима в среднесрочной перспективе. Если экономический отток теоретически поддаётся коррекции через создание рабочих мест, то исчезновение воды или деградацию пахотных земель субсидиями не остановить. Всемирный банк прогнозирует до 2,4 млн внутренних климатических мигрантов в регионе к 2050 году (World Bank, 2021) - и почти все они будут направлены в те города, инфраструктура которых уже сегодня функционирует на пределе ёмкости.

Таким образом, в литературе сложился очевидный методологический пробел: инструмент, который позволял бы в единой метрике и в межстрановом измерении оценить совокупное демографическое и экологическое давление на городские системы, в настоящее время отсутствует. Предлагаемый ИЭДН претендует на заполнение этой ниши.

2. Данные и методы

2.1. Источниковая база

Исследование опирается на официальные данные четырёх национальных статистических ведомств: Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан (BNS RK, 2024), Национального статистического комитета Кыргызской Республики (NSC KR, 2024), Агентства статистики Республики Узбекистан (AgStat RUz, 2024) и Агентства статистики при Президенте Республики Таджикистан (AgStat RT, 2024). Временной горизонт - 2019–2024 годы; такой охват позволяет отсеять флуктуации пандемийного периода и работать с устойчивыми воспроизводящимися тенденциями.

Единицей анализа выступают административные единицы первого порядка: области и города республиканского значения. Выбор именно этого пространственного уровня продиктован не удобством, а методологической необходимостью: лишь на областном уровне одновременно доступны демографическая и экологическая статистика в форматах, допускающих сопоставление между четырьмя странами. Итоговая выборка - 21 единица.

Демографические данные дополнены двумя экологическими источниками. Показатели риска водного стресса взяты из базы WRI Aqueduct 3.0 (Hofste et al., 2019) - стандартизированного глобального инструмента на пятибалльной шкале (1 - низкий риск, 5 - критический). Данные о площади зелёных зон на одного жителя получены из базы Greenspace Central Asia (World Bank, 2021); в качестве нормативного ориентира использована рекомендация ВОЗ - 9 м²/чел. По регионам, для которых сведения об озеленении недоступны, проставлено «н/д».

2.2. Оценка сальдо миграции: метод демографического баланса

Официальная регистрация внутренних мигрантов в Кыргызстане, Таджикистане и ряде регионов Узбекистана систематически занижает реальные объёмы перемещений. Сотни тысяч людей, переезжающих в пригороды Бишкека или Душанбе, годами не обновляют регистрацию - вследствие административных издержек и отсутствия практических стимулов. Для преодоления этого ограничения применялся косвенный метод демографического баланса:

$$MB_i = (P_{t+1} - P_t) - (B_i - D_i), \quad (1)$$

где P_t и P_{t+1} - численность населения региона на начало и конец года; B_i и D_i - число родившихся и умерших соответственно. Разность между общим изменением численности и естественным приростом даёт расчётное сальдо миграции. Поскольку метод не улавливает краткосрочные маятниковые перемещения, получаемые значения следует интерпретировать как нижние консервативные оценки реального оттока. В таблицах такие значения отмечены звёздочкой (*).

2.3. Конструирование ИЭДН

Индекс эколого-демографической нагрузки (ИЭДН) строится как взвешенная сумма четырёх нормализованных компонентов. Нормализация проводится по методу линейного min-max масштабирования (Nyussupova et al., 2025b), приводящему разнородные показатели к единой безразмерной шкале [0; 1]:

$$I_{ji} = (x_{ji} - x_{min,j}) / (x_{max,j} - x_{min,j}), \tag{2}$$

где I_{ij} - стандартизированное значение j-го показателя для i-го региона. 0 соответствует наихудшему результату в выборке, 1 - наилучшему. Для компонента I_3 (водный стресс) шкала инвертирована: более высокое значение водного стресса соответствует худшим условиям среды. Состав и веса компонентов представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Компоненты и веса Индекса эколого-демографической нагрузки (ИЭДН)

Компонент	Вес	Обоснование	Источник
I_1 : норм. сальдо миграции	0,35	Результирующий измеритель вектора демографического потока	НСВ РК, Нацстатком КР, Агентства статистики РУз и РТ (BNS RK, 2024; NSC KR, 2024; AgStat RUz, 2024; AgStat RT, 2024)
I_2 : норм. дефицит зелёных зон	0,25	Индикатор ЦУР 11.7; норма ВОЗ — 9 м²/чел.	WHO Urban Green Space Guidelines; Greenspace CA (World Bank, 2021)
I_3 : норм. риск водного стресса	0,25	Экологический push-фактор климатической миграции	WRI Aqueduct 3.0 (Hofste et al., 2019)
I_4 : норм. уровень урбанизации	0,15	Структурный маркер концентрации населения	НСВ, Нацстаткомы (BNS RK, 2024; NSC KR, 2024; AgStat RUz, 2024; AgStat RT, 2024)
Итоговый ИЭДН	1,00	$ИЭДН_i = 0,35 \cdot I_1 + 0,25 \cdot I_2 + 0,25 \cdot I_3 + 0,15 \cdot I_4$	Авторский расчёт

Примечание: авторская разработка на основе (BNS RK, 2024; NSC KR, 2024; AgStat RUz, 2024; AgStat RT, 2024; Nyussupova et al., 2025b; World Bank, 2021; Hofste et al., 2019)

Логика распределения весов такова. Миграционному сальдо отдан наибольший вес (0,35) - как результирующему показателю, непосредственно отражающему вектор демографического потока. Экологические компоненты (I_2 и I_3) получили в сумме 0,50 - это принципиальный выбор, отражающий исходную гипотезу об их соразмерной роли наряду с демографическими факторами. Урбанизация (I_4) с весом 0,15 выступает структурным маркером, фиксирующим уже сложившуюся степень концентрации. Итоговая формула:

$$ИЭДН_i = 0,35 \cdot I_1 + 0,25 \cdot I_2 + 0,25 \cdot I_3 + 0,15 \cdot I_4. \tag{3}$$

Интерпретация значений зависит от характера региона. Высокий ИЭДН в городском ядре сигнализирует о перегрузке: мощный приток населения наложился на нарастающий экологический дефицит среды. Высокий ИЭДН в периферийном регионе с отрицательным миграционным сальдо - например, в Ферганской области - говорит об ином: экологическое вытеснение при низкой привлекательности. Именно такое сочетание служит диагностическим признаком климатически обусловленной миграции.

2.4. Типологизация и верификация

Регионы отнесены к трём типам на основе квартильного разграничения. Тип I - ядра-абсорбенты - ИЭДН $\geq 0,70$; Тип II - буферные зоны - 0,40–0,69; Тип III - активные доноры - ИЭДН $< 0,40$. Единство пороговых значений для всех четырёх стран обеспечивает сопоставимость результатов.

Верификация проводилась в два этапа. Во-первых, средневзвешенные показатели урбанизации по выборке сопоставлялись с официальными агрегатами Всемирного банка - расхождение не превысило трёх процентных пунктов. Во-вторых, типология была проверена на субрегиональном уровне через кейс Бухарской области: если предложенная классификация описывает реальные процессы, а не является методологическим артефактом, она должна воспроизводиться и для конкретных малых городов - что и подтвердилось.

3. Результаты и их интерпретация

3.1. Сводная картина: семикратный разрыв

Рассчитанные значения ИЭДН по всей выборке представлены в Таблице 2. Главный результат - поляризация, которую сложно охарактеризовать иначе как структурной: индекс варьируется от 0,81 (Алматы) до 0,11 (Хатлонская область), то есть разрыв между крайними полюсами семикратный. Устойчивость трёхтипной структуры прослеживается во всех четырёх странах без исключения - это даёт основания говорить о межстрановой закономерности, а не о специфике отдельных случаев.

Таблица 2. Эколого-демографическая нагрузка на городские системы Центральной Азии (2019–2024 гг.)

Регион / город	Население, тыс. чел.	Уровень урбанизации, %	Сальдо миграции, чел.	Зелёные зоны, м²/чел.	Водный стресс (1–5)	ИЭДН	Тип
Казахстан							
г. Алматы	2 228,0	100	+36 061	4,2	3	0,81	I
г. Астана	1 430,0	100	+73 238	6,1	2	0,76	I
г. Шымкент	1 236,0	100	+9 361	3,8	4	0,72	I
Алматинская обл.	1 500,0	16,0	+2 639	н/д	3	0,44	II
16 периф. регионов†	13 372,8	55,0	–121 299	н/д	3	0,12	III
Кыргызстан							
г. Бишкек	1 219,9	100	+15 000*	3,1	2	0,79	I
г. Ош	412,2	100	+5 000*	2,7	3	0,71	I
Чуйская обл.	1 013,1	19,2	+10 000*	н/д	2	0,48	II
Ошская обл.	1 427,0	8,5	–15 000*	н/д	4	0,21	III
Джалал-Абад. обл.	1 323,4	30,2	–15 000*	н/д	4	0,19	III
Узбекистан							
г. Ташкент	3 500,0	100	н/д	3,4	5	0,70	I
Самаркандская обл.	4 106,8	51,0	–15 000*	н/д	5	0,19	III

Регион / город	Население, тыс. чел.	Уровень урбанизации, %	Сальдо миграции, чел.	Зелёные зоны, м²/чел.	Водный стресс (1–5)	ИЭДН	Тип
Ферганская обл.	3 962,7	51,0	–15 000*	н/д	5	0,18	III
Ташкентская обл.	2 990,1	51,0	–15 000*	н/д	4	0,24	III
Таджикистан							
г. Душанбе	1 242,6	100	+15 000*	2,9	3	0,74	I
Хатлонская обл.	3 697,7	18,0	–20 000*	н/д	5	0,11	III
Согдийская обл.	2 930,0	25,0	–20 000*	н/д	4	0,16	III

Примечание: (*) - авторские расчёты по формуле (1); (†) - агрегат 16 периферийных областей Казахстана; дефицит зелёных зон - отклонение от нормы ВОЗ (9 м²/чел.); водный стресс по шкале WRI 1–5; н/д - нет данных. Источник: составлено авторами на основе (BNS RK, 2024; NSC KR, 2024; AgStat RUz, 2024; AgStat RT, 2024; Nyussupova et al., 2025b; World Bank, 2021; Hofste et al., 2019).

*Примечание: Для г. Ташкента прямые официальные данные по сальдо внутренней миграции в открытом доступе отсутствуют (н/д). Для расчёта интегрального индекса (ИЭДН = 0,70) применялись расчётные значения чистого миграционного притока, полученные косвенным путём через уравнение демографического баланса (см. раздел 2.2).

Таблица 3. Типология субнациональных регионов Центральной Азии по значениям ИЭДН

Тип	Диапазон ИЭДН	Число единиц	Примеры	Ключевые характеристики
Тип I - ядра-абсорбенты	≥ 0,70	7	Алматы, Астана, Шымкент, Бишкек, Ош, Ташкент, Душанбе	Высокий миграционный приток при нарастающем экологическом дефиците
Тип II - буферные зоны	0,40–0,69	2	Алматинская обл., Чуйская обл.	Умеренный приток; субурбанизационный рост; транзитная функция
Тип III - активные доноры	< 0,40	12	Хатлонская, Ошская, Ферганская обл. и др.	Отрицательное сальдо + высокий экологический стресс; «демографический насос»

Источник: авторская классификация.

Казахстан: три города против шестнадцати регионов.

Казахстанский случай представляет собой наиболее выраженный вариант, позволяющий оценить масштаб процесса. Три города, Алматы, Астана и Шымкент, суммарно аккумулируют свыше 90 % положительного миграционного сальдо страны при доле в общей численности населения менее 25 %. Детальный баланс отражён в Таблице 4.

Таблица 4. Демографический баланс регионов Казахстана (2023–2024 гг.)

Регион	Население нач. 2024, тыс. чел.	Естественный прирост, чел.	Сальдо миграции, чел.	Коэфф. удержания, %	ИЭДН	Тип
г. Алматы	2 228,0	23 400	+36 061	253,1	0,81	I
г. Астана	1 430,0	26 300	+73 238	404,9	0,76	I
г. Шымкент	1 236,0	25 942	+9 361	136,1	0,72	I

Регион	Население нач. 2024, тыс. чел.	Естественный прирост, чел.	Сальдо миграции, чел.	Коэфф. удержания, %	ИЭДН	Тип
Алматинская обл.	1 500,0	24 277	+2 639	110,9	0,44	II
16 периф. регионов†	13 372,8	159 936	-121 299	24,2	0,12	III

Примечание: коэффициент удержания = (естественный прирост + сальдо миграции) / естественный прирост × 100. Значения выше 100 % для ядер означают приток сверх собственного прироста. (†) - агрегат 16 периферийных регионов.

Источник: составлено авторами на основе (BNS RK, 2024).

Астана в этом ряду выделяется особо: +73 238 человек ежегодного миграционного прироста при численности населения 1,43 млн - это более 51 человека на 1 000 жителей, показатель, нетипичный даже для быстрорастущих азиатских столиц. Экологические последствия фиксируются уже в текущих показателях: обеспеченность зелёными зонами - 6,1 м²/чел. при нормативе ВОЗ в 9 м²/чел., то есть город, официально позиционируемый как «зелёная столица», уже нарушает стандарт ЦУР 11.7. Субъективные опросные данные жителей при этом фиксируют более высокий уровень удовлетворённости качеством жизни в Астане по сравнению с менее урбанизированными городами (Nyussupova et al., 2025a), что отчасти объясняет устойчивость миграционного притока, несмотря на экологическую перегрузку.

По 16 периферийным областям совокупный коэффициент удержания составляет 24,2 %. Это значит: из каждых четырёх человек, рождённых на казахстанской периферии, трое в конечном счёте уходят - в ядра или за пределы страны. При суммарном естественном приросте 16 областей около 160 тысяч человек в год отрицательное сальдо миграции достигает 121 299 человек. Речь идёт не о стихийном явлении, а об устойчиво воспроизводящейся структурной закономерности - то, что в настоящей работе названо «демографическим насосом».

Кыргызстан: водораздел по параллели.

Кыргызстанский случай интересен тем, что пространственная поляризация здесь имеет очень чёткое географическое выражение. Бишкек (ИЭДН = 0,79) и Чуйская область (0,48) на севере, а также город Ош (0,71) на юге формируют зоны относительного притяжения. Остальные южные и восточные регионы - Ошская и Джалал-Абадская области - устойчиво теряют население.

Ошская область генерирует 29 530 человек естественного прироста в год при расчётном оттоке около 15 000 человек (Kadyrbek & Koblandin, 2025). Коэффициент удержания - 49,2 %: половина биологического прироста регион не сохраняет (Panzabekova et al., 2025). Ситуацию усугубляет водный стресс уровня 4/5: при традиционно высокой зависимости населения юга Кыргызстана от орошаемого земледелия это означает, что возможности для хозяйственной деятельности сужаются быстрее, чем успевает адаптироваться местная экономика. Именно в этом регионе наиболее отчётливо выражен климатически обусловленный отток.

Узбекистан: когда демографической мощи не хватает.

Узбекистан представляет наиболее сложный для интерпретации случай в выборке. Демографический потенциал страны существенно превышает показатели остальных стран выборки: Самаркандская, Ферганская и Андижанская области генерируют от 78 до 97 тысяч человек естественного прироста ежегодно каждая (Maksakova, 2016). При этом указанные регионы находятся в зоне критического водного стресса (5/5 по шкале WRI).

Отдельно стоит прокомментировать административную урбанизацию. В 2009 году ряд крупных сельских населённых пунктов получил городской статус, что немедленно подняло официальный показатель урбанизации выше 51% по большинству областей (Tojiyeva & Ibragimov, 2021). В Таблице 2 это хорошо заметно: три крупнейших региона - Самаркандская, Ферганская и Ташкентская области — показывают ровно 51 %. Это не совпадение, а след единовременного административного решения. Реальная обеспеченность городской

инфраструктурой в этих регионах значительно ниже того, что следует из официальных цифр, - обстоятельство, существенное при оценке возможностей для удержания населения.

Важно подчеркнуть: хотя прямая муниципальная статистика по сальдо миграции для Ташкента ограничена (н/д), расчёт интегрального индекса (ИЭДН = 0,70), выполненный через уравнение демографического баланса, математически подтверждает его статус абсолютного ядра-абсорбента.

Таджикистан: максимальное давление при минимальной ёмкости.

Таджикистан - крайний случай в выборке по совокупности параметров. Хатлонская область: расчётный естественный прирост около 72 000 человек ежегодно, уровень урбанизации 18 %, водный стресс 5/5, отток около 20 000 человек. ИЭДН - 0,11, минимум по выборке. Здесь максимальный демографический донор и зона критической экологической уязвимости совпадают в одном регионе.

Душанбе (ИЭДН = 0,74) принимает на себя значительную часть этого потока. Обеспеченность зелёными зонами - 2,9 м²/чел., то есть менее трети от рекомендуемого ВОЗ минимума. Инфраструктурная нагрузка нарастает быстрее, чем ведётся строительство новых объектов. Демографический резервуар следующего десятилетия в Таджикистане уже сформирован и поддаётся количественной оценке - степень готовности принимающих городов к его абсорбции остаётся открытым вопросом.

Субрегиональная верификация: Бухарская область Узбекистана

Региональный уровень анализа неизбежно скрывает то, что происходит внутри отдельных областей. Бухарская область Узбекистана выбрана для верификации именно потому, что здесь на компактной территории одновременно существуют города с принципиально различными траекториями развития (Sergeyeva et al., 2025). Если предложенная типология отражает реальные структурные процессы, она должна воспроизводиться и на субрегиональном уровне.

Таблица 5. Типология городов Бухарской области по сценариям развития (2015–2023 гг.)

Тип / города	Динамика населения, 2015–2023	Уровень урбанизации, %	Водный стресс	Зелёные зоны	Соответствие ЦУР 11	Стратегия
Тип 1 Бухара, Когон	+12–18%	68–72	4/5 — высокий	< 4 м²/чел.	Частичное	Ограничение роста, защита зелёных зон, ливневые системы
Тип 2 Гиждуван, Ромитан, Вобкент	+4–7%	38–45	3/5 — умеренный	5–7 м²/чел.	Высокое	«15-минутный город», ревитализация, поддержка МСБ
Тип 3 Газли, Каравулбазар	–8–15%	22–31	5/5 — критический	н/д	Низкое	«Умное сжатие», рекультивация

Примечание: авторская типология на основе (Sergeyeva et al., 2025; AgStat RUz, 2024; Hofste et al., 2019).

Бухара и Когон (Тип 1). Агломерационный рост в этих городах проявляется одновременно по нескольким направлениям: уплотняется исторический центр, в периметр агломерации втягиваются соседние посёлки, этажность новой застройки неуклонно растёт. За 2015–2023 годы население увеличилось на 12–18 %. Критический водный стресс (4/5) сочетается с острым дефицитом зелёных зон. Без регуляторного вмешательства этот сценарий

несовместим с ЦУР 11.7: сокращение открытых пространств опережает темпы формирования регуляторных механизмов их защиты.

Гиждуван, Ромитан, Вобкент (Тип 2). Умеренный рост (+4–7 %), традиционная махаллинская квартальная структура расселения, социальная инфраструктура, в целом справляющаяся с нагрузкой. Обращает на себя внимание следующее обстоятельство: исторически сложившаяся пространственная организация этих городов де-факто реализует то, что сегодня называется «15-минутным городом», - без каких-либо специальных управленческих усилий. Задача планирования в данном случае состоит в том, чтобы сохранить сложившуюся эффективную структуру, не нарушив её девелоперским давлением.

Газли и Каравулбазар (Тип 3). Устойчивая убыль населения: –8–15 % за восемь лет. Критический водный стресс (5/5) отрезал сельскохозяйственный уклад от каких-либо перспектив. Жилой фонд ветшает, точечная новая застройка лишь усиливает фрагментарность городского пространства. Административные попытки удержать население через льготы или ограничения - в постсоветском контексте этот инструмент не давал результата нигде. «Умное сжатие» представляет собой не отказ от развития, а единственно реалистичную стратегию: адаптировать инфраструктуру под снижающуюся численность вместо борьбы с демографическим трендом.

Верификационный кейс подтвердил исходное допущение: типология, выявленная на макрорегиональном уровне, воспроизводится и внутри отдельной области. Это свидетельствует о том, что описываемые закономерности имеют структурный, а не масштабный характер.

4. Обсуждение

Полученные данные в целом укладываются в концепцию кумулятивной причинности (Myrdal, 1957): центростремительные силы перевешивают механизмы распространения, и периферия последовательно обескровливается. В этом смысле Центральная Азия не уникальна. Уникальна она в другом - в характере выталкивающего фактора.

В западном опыте пространственная мобильность ведёт к межрегиональной конвергенции доходов (Shumway & Otterstrom, 2015): люди переезжают туда, где лучше платят, но возможности для этого имеются в нескольких местах. В центральноазиатском случае к экономическому притяжению ядра добавляется экологическое выталкивание периферии. Разница принципиальная: миграция из Хатлонской области или с юга Кыргызстана - это не выбор между более и менее благоприятными условиями, а вынужденное перемещение при утрате условий проживания. Остановить такой поток через финансовые инструменты нельзя по определению.

Один из неочевидных выводов анализа касается административной урбанизации в Узбекистане. Переклассификация сельских населённых пунктов в городские производит статистический эффект, который маскирует реальную ситуацию: уровень урбанизации формально высок, а инфраструктурная оснащённость - нет. При работе с официальными данными это обстоятельство требует постоянной поправки. Включение в ИЭДН компонента I_2 (дефицит зелёных зон) частично нейтрализует этот эффект, поскольку зелёная инфраструктура - достаточно надёжный косвенный индикатор реального качества городской среды.

Нельзя обойти стороной и ограничения исследования. Первое - неполнота данных по зелёным зонам за пределами крупных городов. По большинству периферийных регионов этот компонент отсутствует, что несколько снижает точность ИЭДН для Типа III. Второе ограничение - экспертный характер весов: при использовании альтернативных весовых схем абсолютные значения индекса изменятся, хотя типологическая структура, по всей видимости, останется устойчивой - об этом свидетельствует её воспроизводимость на субрегиональном уровне.

Практические рекомендации

Выявленная типология задаёт дифференцированную логику управленческих ответов - в противовес тому универсальному подходу «одно решение для всех», который регулярно прослеживается в региональных политических документах.

Для регионов Типа I первоочередная задача - не стимулировать рост, а научиться им управлять. Здесь необходимы чётко закреплённые и обеспеченные механизмами контроля границы застройки, защита зелёных поясов и водоохраных зон, опережающее - а не компенсирующее - развитие ливневых систем. Климатическая адаптация должна входить в генеральные планы как сквозной принцип, а не в виде отдельного декларативного раздела. Особое внимание - пригородным поясам: именно там оседают новые волны климатических мигрантов, именно там формируется прослойка NEET.

Для регионов Типа II - управляемая субурбанизация. Алматинская и Чуйская области де-факто уже выполняют буферную функцию, перехватывая часть потока. Задача - институционализировать этот процесс, не давая ему превратиться в стихийную неформальную застройку: легализовать сложившиеся пригородные поселения, обеспечить их базовой инженерной и социальной инфраструктурой, создать рабочие места через вынос производственных мощностей из перегруженных столичных агломераций.

Для регионов Типа III - не удержание, а подготовка. При высокой вероятности выезда молодёжи из Хатлонской или Ошской области ключевое значение приобретает уровень её профессиональной подготовки к моменту переезда. В регионах, где есть реальная ресурсная база - транзитные коридоры, агропотенциал, туристические объекты, - стоит апробировать точечные якорные проекты. Там, где ресурсов нет, «умное сжатие» - единственно реалистичная стратегия.

На макрорегиональном уровне полицентричное планирование приобретает характер практической необходимости. Давление на несколько городов-ядер уже сегодня превышает разумные пределы, а к 2050 году оно вырастет кратно. Регулярный расчёт ИЭДН как инструмента мониторинга позволит выявлять проблемные зоны заблаговременно - до того, как они приобретут необратимый характер.

5. Заключение

В настоящей работе предложен и апробирован Индекс эколого-демографической нагрузки (ИЭДН) - воспроизводимый межстрановой инструмент для совместного измерения демографического и экологического давления на городские системы. Верификация на 21 субнациональном регионе и городах Казахстана, Кыргызстана, Узбекистана и Таджикистана за 2019–2024 годы выявила устойчивую трёхтипную структуру: семь перегруженных ядер-абсорбентов, две буферные зоны и двенадцать периферийных доноров в условиях критического экологического стресса.

Ключевой вывод работы состоит в следующем: климатическая миграция перестала быть фоновым условием и стала самостоятельным структурным фактором, усиливающим пространственную поляризацию. Регионы с наибольшим водным стрессом одновременно генерируют наибольший естественный прирост - они и формируют резервуар климатических мигрантов следующего десятилетия. Игнорирование экологического измерения при демографическом прогнозировании ведёт к систематическому занижению реальных масштабов будущего давления на городские системы.

Трёхтипная типология воспроизводится как на уровне макрорегиона, так и внутри отдельных областей - что подтвердила верификация через Бухарский кейс. ИЭДН воспроизводим без специализированного программного обеспечения и пригоден для регулярного мониторинга пространственного развития. Перспективные направления исследований: детализация анализа до уровня районов и муниципалитетов, включение дистанционных данных (динамика ледников, ночная освещённость VIIRS, индексы деградации земель) для приближения оценок к режиму реального времени.

6. Вспомогательный материал

Нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация – Г.Н., С.Я.; методология – Г.Н., А.С.; формальный анализ – А.Б., А.С.; исследование – А.С., А.Б.; курирование данных – А.С.; написание - подготовка оригинального черновика – А.С., А.Н.; написание - рецензирование и редактирование - Г.Н., С.Я.; визуализация – Ч.Ж.; руководство – Г.Н. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторе

Нюсупова, Гульнара - д.г.н., профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; gulnara.nyussupova@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5294-2671>

Янг, Стивен С. - PhD, профессор, Сейлемский государственный университет, 352 Лафайет-стрит, Сейлем, МА, США, 01970; syoung@saalemstate.edu, <https://orcid.org/0000-0003-0895-8515>

Сарсембаева, Асем – докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; a.sarsembayeva.kz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-5558-5328>

Баятанова, Асел - докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; bayatanova.assel@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-7267-8686>

Нурболкызы, Айгерим - докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; aikenti1987@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5778-5914>

Жумагулов, Чингиз - докторант, КазНУ им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; c.zhumagulov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-3147-4945>

9. Финансирование

Нет внешнего финансирования.

10. Благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам за конструктивные замечания. Исследование выполнено без внешнего финансирования.

11. Конфликты интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Финансисты не играли никакой роли в разработке исследования, сборе данных, анализе, написании рукописи или решениях о публикации.

12. References

1. Agency on Statistics of the Republic of Uzbekistan. (2024). *Statistical yearbook of Uzbekistan regions* (Statisticheskii ezhegodnik regionov Uzbekistana in Russian). AgStat RUz. <https://stat.uz>
2. Agency on Statistics under the President of the Republic of Tajikistan. (2024). *Statistical yearbook 2023* (Statisticheskii ezhegodnik 2023 in Russian). AgStat RT. <https://www.stat.tj/wp-content/uploads/2024/08/ezhegodnik-2023.pdf>
3. Bulegenova, B. B., Shermukhamedova, N. A., & Turemuratov, O. Zh. (2024). Urbanisation trends in Central Asian countries: the development of agglomerations over the years of independence (2000–2023) (Tendentsii urbanizatsii v stranakh Tsentral'noy Azii: razvitiye aglomeratsiy za

- gody nezavisimosti (2000–2023 gg.) in Russian). *Rossiia v global'nom mire*, 27(2), 150–166. <https://doi.org/10.48612/rg/RGW.27.2.8>
4. Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan. (2024). *Demographic yearbook of Kazakhstan* (Demograficheskiy ezhegodnik Kazakhstana in Russian). BNS ASPIR RK. <https://taldau.stat.gov.kz/>
 5. Centre for Economic Research. (2013). *Urbanisation in Central Asia: challenges, problems and prospects* (Urbanizatsiya v Tsentral'noy Azii: vyzovy, problemy i perspektivy in Russian). (Analytical Report No. 2013/03). CER. https://www.unescap.org/sites/default/d8files/Urbanization%20in%20CA_RUS_0.pdf
 6. Demidova, K. V., & Makushin, M. A. (2025). Post-Soviet transformations of urban space in Kazakhstan and Kyrgyzstan (Postsovetские трансформации городского пространства Казахстана и Кыргызстана in Russian). *Geograficheskiy vestnik*, 2(73), 31–43. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2025-2-31-43>
 7. Friedmann, J. (1966). *Regional development policy: a case study of Venezuela*. MIT Press.
 8. Hofste, R. W., Kuzma, S., Walker, S., Sutanudjaja, E. H., Bierkens, M. F. P., Kuijper, M. J. M., Faneca Sanchez, M., Van Beek, R., Wada, Y., Galvis Rodríguez, S., & Reig, P. (2019). *Aqueduct 3.0: updated decision-relevant global water risk indicators (Technical Note)*. World Resources Institute. <https://doi.org/10.46830/writn.18.00146>
 9. Idrisov, T. (2023). Climate change and water resources in Central Asia: growing insecurity. In R. Makhmudov (Ed.), *Climate migration in Central Asia: challenges and solutions* (pp. 55–62). Baktria Press.
 10. International organization for migration. (2019). *External youth migration in Central Asian countries: risk analysis and minimization of negative consequences*. IOM. <https://publications.iom.int/books/external-youth-migration-countries-central-asia-risk-analysis-and-minimization-negative>
 11. Kadyrbek, Zh. M., & Koblandin, K. I. (2025). Labour migration in Central Asia (Trudovaya migratsiya v Tsentral'noy Azii in Russian). *Izvestiya KazUIR&WL*, 1(59), 185–197. <https://doi.org/10.48371/ISMO.2025.59.1.012>
 12. Kosherbayeva, A. B. (2018). Analysis of Kazakhstan city development in the context of managed urbanisation (Analiz razvitiya gorodov Kazakhstana v svete upravlyayemoy urbanizatsii in Russian). *Ekonomika i statistika*, 4, 134–140.
 13. Maksakova, L. P. (2016). Demographic and migration potential of Uzbekistan (Demograficheskiy i migratsionnyy potentsial Uzbekistana in Russian). *Narodonaselenie*, 1-1(71-1), 83–89.
 14. Myrdal, G. (1957). *Economic theory and underdeveloped regions*. Duckworth.
 15. National Statistical Committee of the Kyrgyz Republic. (2024). *Demographic yearbook of the KR 2019–2023* (Demograficheskiy ezhegodnik KR 2019–2023 in Russian). NSC KR. <https://stat.gov.kg/media/publicationarchive/dd9ec079-c64a-41b9-8439-812b34edc5f3.pdf>
 16. Nefyodova, T. G., & Treivish, A. I. (2002). Theory of differential urbanisation and the city hierarchy in Russia (Teoriya differentsial'noy urbanizatsii i iyerarkhiya gorodov v Rossii in Russian). In *Problemy urbanizatsii na rubezhe vekov* (pp. 71–86).
 17. Nyussupova, G. N., Kenespayeva, L. B., Tazhiyeva, D. A., Kairanbayeva, G. K., & Sarsembayeva, A. K. (2025a). Sociological survey as a tool for assessing sustainable development: a case study of the cities of Astana and Kyzylorda. In *Goroda na puti iz nastoyashchego v budushchee: sbornik statey Mezhdunarodnoy konferentsii* (pp. 257–258). Moscow.
 18. Nyussupova, G., Aidarkhanova, G., Tazhiyeva, D., Kenespayeva, L., Kelinbayeva, R., Aubakirova, G., Kairanbayeva, G., Zhakypbek, A., & Zhumagulov, C. (2025b). Urban sustainability indexing and GIS mapping: a reproducible framework and intertemporal comparability (Kazakhstan, 2000–2022). *International Journal of Geoinformatics*, 21(12), 93–106. <https://doi.org/10.52939/ijg.v21i12.4655>

19. Panzabekova, A. Zh., Satybaldin, A. A., & Zhanbozova, A. B. (2025). Cluster analysis of the demographic characteristics of Kazakhstan's regions and their relationship with income distribution (Klasternyy analiz demograficheskikh kharakteristik regionov Kazakhstana i ikh svyaz' s raspredeleniyem dokhodov in Russian). *Economic Series of the Bulletin of L.N. Gumilyov ENU*, 3, 83–100. <https://doi.org/10.32523/2789-4320-2025-3-83-100>
20. Seitov, A. (2023). The problem of climate migration in Uzbekistan: A sociological perspective. In R. Makhmudov (Ed.), *Climate migration in Central Asia: challenges and solutions* (pp. 129–136). Baktria Press.
21. Sergeyeva, A., Dan'shin, A., Akbar, I., Usmonov, A., & Ergashev, A. (2025). Urbanization and spatial transformation of cities in the Bukhara region in Uzbekistan. *Chinese Journal of Urban and Environmental Studies*, 13(3), 2550017. <https://doi.org/10.1142/S2345748125500174>
22. Shchesnovich, V. N. (2023). Migration features of Central Asian countries: Analytical review (Migratsionnye osobennosti stran Tsentral'noy Azii in Russian). *Rossiia i musul'manskiy mir*, 1(327), 59–71.
23. Shumway, J. M., & Otterstrom, S. M. (2015). Income migration and income convergence across U.S. states, 1995–2010. *Growth and Change*, 46(4), 593–610. <https://doi.org/10.1111/grow.12104>
24. Tojiyeva, Z., & Ibragimov, L. (2021). Labour market and employment in Uzbekistan. *Geografický časopis*, 73(4), 359–374. <https://doi.org/10.31577/geogrcas.2021.73.4.19>
25. World Bank. (2021). *Groundswell Part 2: acting on internal climate migration*. World Bank Publications. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/36248>

Демографиялық және экологиялық өзгеру жағдайындағы Орталық Азия қалаларының кеңістіктік дифференциациясы: индекстік тәсіл және тұрақты даму стратегиялары

Гүлнар Нүсіпова, Янг С. Стивен, Әсем Сарсембаева, Әсел Баятанова, Айгерім Нұрболқызы, Чингиз Жумагулов

Аңдатпа. Мақалада 2019–2024 жылдар кезеңінде бір мезгілде демографиялық және экологиялық қысым жағдайына тап болған Қазақстан, Қырғызстан, Өзбекстан және Тәжікстан қалалық жүйелерінің кеңістіктік дифференциациясына сандық талдау жүргізілген. Зерттеудің негізгі мақсаты - миграция сальдосы, қалалық жасыл аймақтардың тапшылығы, су стрессі қаупі және урбандалу деңгейі бойынша нормаланған деректерді кіріктіретін Экологиялық-демографиялық жүктеме индексі (ЭДЖИ) әзірлеу және эмпириялық тұрғыдан апробациялау болып табылады. Зерттеудің практикалық маңыздылығы қолданыстағы ғылыми тәсілдердегі олқылықпен байланысты: зерттеушілер демографиялық және экологиялық өлшемдерді, әдетте, бір-бірінен бөліп қарастырады. Алайда аймаққа тән қоныстану үлгісін - бір жағынан шамадан тыс жүктелген қалалық ядроларды, екінші жағынан демографиялық тұрғыдан тозған шеткі аймақтарды - қалыптастыратын дәл осы екі фактордың бірлескен әсері. 21 субұлттық аймақ пен қаланың деректері негізінде жасалған типология үш тұрақты сыныпты анықтады: абсорбент-ядролар ($ЭДЖИ \geq 0,70$; 7 бірлік), буферлік аймақтар (0,40–0,69; 2 бірлік) және сыни экологиялық стресс жағдайындағы белсенді донор аймақтар (0,40-тан төмен; 12 бірлік). Таңдаманың шеткі полюстері арасындағы ЭДЖИ мәндерінің жеті еселік алшақтығы қоныстанудың өткір кеңістіктік поляризациясын дәлелдейді. Аумақтың әрбір түріне арналған ТДМ 11 және ТДМ 13 мақсаттарымен үйлесімді сараланған кеңістіктік жоспарлау стратегиялары ұсынылған.

Түйін сөздер: кеңістіктік дифференциация; экологиялық-демографиялық жүктеме; климаттық көші-қон; жалған урбандалу; ТДМ 11; ТДМ 13; Орталық Азия; полицентрлік даму.

Spatial differentiation of Central Asian cities under demographic and ecological transformation: an index-based approach and sustainable development strategies

Gulnara Nyussupova, Stephen S. Young, Assem Sarsembayeva, Assel Bayatanova, Aigerim Nurbolkyzy, Chingiz Zhumagulov

Abstract. This paper presents a quantitative assessment of spatial differentiation among urban systems in Kazakhstan, Kyrgyzstan, Uzbekistan, and Tajikistan under simultaneous demographic and ecological pressure over the period 2019–2024. The objective is to develop and validate the Eco-Demographic Stress Index (EDSI) - a composite indicator integrating normalised data on net migration balance, urban green space deficit, water stress risk, and urbanisation level. The practical significance of the study stems from the fact that existing approaches typically treat demographic and ecological dimensions in isolation, whereas it is precisely their combined effect that produces the region's characteristic settlement pattern: overloaded urban cores at one pole and demographically depleted peripheries at the other. A typology of 21 subnational regions and cities identified three stable classes: absorber cores ($EDSI \geq 0.70$; 7 units), buffer zones (0.40–0.69; 2 units), and active donor regions under critical ecological stress (below 0.40; 12 units). The sevenfold EDSI gap between the extreme poles of the sample confirms severe spatial polarisation of settlement. Differentiated spatial planning strategies aligned with SDG 11 and SDG 13 targets are proposed for each territorial type.

Keywords: spatial differentiation; eco-demographic stress; climate migration; pseudo-urbanisation; SDG (Sustainable Development Goals) 11; SDG 13; Central Asia; polycentric development.

Ғарыштық альтиметрия негізіндегі Алакөл және Сасықкөл көлдеріндегі су деңгейінің динамикасы (2016-2026 жж.)

Канат Самарханов^{1,2}, Ерболат Муканов^{1,2*}, Жанай Сагин², Сельвина Алиева²

¹Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан;
samarkhanov_kb@enu.kz, mukanov_yen@enu.kz

²Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан;
j.sagin@kbtu.kz

*Корреспонденция: mukanov_yen@enu.kz

Дәйексөз: Самарханов, К., Муканов, Е., Сагин, Ж., Алиева, С. (2026). Ғарыштық альтиметрия негізіндегі Алакөл және Сасықкөл көлдеріндегі су деңгейінің динамикасы. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 156(3), 192-202.

<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-192-202>

Академиялық редактор:
А.М. Сергеева

Редакцияға түсті: 23.08.2026
Түзетілді: 24.09.2026
Қабылданды: 09.09.2026
Басылымға шықты:
30.09.2026



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/>)

Аңдатпа: Алакөл-Сасықкөл көлдер жүйесі Қазақстанның шығысындағы Балқаш-Алакөл ойысында орналасқан біртұтас гидрологиялық жүйені құрайды, Жетісу Алатауы мен Тарбағатай жоталарынан келетін сумен қоректенеді. Дегенмен, қарастырылып отырған қос көлдің гидрологиялық режимі екі түрлі: Алакөл – ағынсыз ащы көл, ал Сасықкөл Қошқаркөл арқылы Алакөлмен байланысты негізгі суын Тентек өзенінен алатын ағынды тұщы көл. Осы жағдайларды ескере отырып қос көлдің су деңгейінің өзгеруін, олардың өзара байланысының ерекшеліктеріне баға беру гидрологиялық тұрғыдан ерекше маңызды. Зерттеу барысында ДАНИТІ ғарыштық альтиметрия деректері қолданылды: 2016–2026 жж. Алакөлдегі виртуальді бекеттен (ID 14036) алынған 125 бақылау, 2002–2026 жж. Сасықкөлдегі виртуальді бекеттен (ID 229) алынған 796 бақылау жазбасы. Осы уақыт қатарлары «Қазгидромет» РМК Рыбзавод гидрологиялық бекеті арқылы тексерілді. Су деңгейінің трендтері Манн-Кендалл сынағы арқылы бағаланып, олардың өзгеру жылдамдықтары Тейл-Сен көлбеуінің көмегімен есептелді. Алакөл деңгейінің шамамен жылына 13,46 см (Манн-Кендалл сынағы $\tau = -0,511$, $p = 0,0466$) төмендеп жатқаны анықталды. Жылы мезгілдегі медианалық су деңгейі 2016-2018 жылдардағы 350,7 м-ден 2022-2026 жылдары 349,9 м-ге дейін төмендеді, осылайша 0,86 м төмендеген болып шықты. Сасықкөл деңгейі төмендегенімен (2,13 см/жыл) 2002-2026 жж. бақылау кезеңінде статистикалық маңызы бар монотонды үрдіс анықталмады. Осы нәтижелер Алакөлдің төмендеу фазасы Сасықкөлмен синхронды емес екенін көрсетті және регрессивті фазаның алғашқы ғарыштық дәлелі.

Түйін сөздер: ғарыштық альтиметрия; ДАНИТІ; Алакөл; Сасықкөл; көл; су деңгейі; Манн-Кендалл.

1. Кіріспе

Ағынсыз көлдер су жиналатын алқаптардағы ағын судың, жауын-шашынның және буланудың балансынан қалыптасады және климаттың өзгерістеріне, жоғарғы ағыстағы суды тұтынуға тікелей байланысты (J. Wang et al., 2018; Wurtsbaugh et al., 2017). Осындай

көлдерде су балансының жетіспеушілігіне, өзен ағынының азаюы мен буланудың күшеюіне, су деңгейінің төмендеуіне сыртқы ағынның болмауы тікелей әсер етеді. Климаттың қызуы, буланудың артуы, таулардағы мұздық пен қар режимінің өзгеруі, суармалы егіншіліктегі суды артық қолдану ағынсыз (эндорейлік) алаптардың гидрологиялық режимдерінің өзгеруіне әсер етеді (Baigaliyeva et al., 2024). Осындай жағдайда Орталық Азияның тұйық көл жүйелері осындай табиғи және антропогендік әсерлерге ерекше сезімталдық көрсетіп жатыр. Мысалы, Арал теңізінің күрт төмендеп негізгі су көлемін жоғалтуы, трансшекаралық суды пайдаланудың өзгеруі салдарынан Сырдария өзенінің су балансының өзгеруі байқалуда (Massakbayeva et al., 2020). Осыған ұқсас Іле өзенінің суын пайдалану мәселесі де өзекті. Осы сияқты жағдайларда су балансының климаттық компоненті мен антропогендік компонентін ажырату оңайға түспейді, екеуі де бірдей ықпал етеді. Олардың әсерін гидрологиялық режимдегі су нысандарын салыстыру арқылы бағалауға болады (Yariyev, Sagintayev, Inglezakis, et al., 2017; Yariyev, Sagintayev, Verhoef, et al., 2017).

Балқаш-Алакөл ойпатындағы қос көл – Алакөл мен Сасықкөлдің су жинақ алабы және климаттық аумағы бір болғанымен гидрологиялық режимдерінің ерекшеліктері бар (Алимкулов et al., 2023). Сондықтан олар гидрологиялық режим тұрғысынан салыстыруға қолайлы зерттеу нысандары ретінде осы зерттеу жұмысында қарастырылған. Ол туралы қашықтықтан зондтау жұмыстарының нәтижелерінде жарық көрген еңбектерде баяндалған. Мысалы Валеев және т.б. авторлар (Valeyev et al., 2019) Landsat және Sentinel-2 суреттерінен Алакөлдің жағалау сызығын MNDWI индексінің көмегімен картаға түсіріп, су айдынының бастапқы кезеңдегі 2912,3 км²-ден (1990 ж.) кейін 3033,2 км²-ге (2018 ж.) дейін өскенін, жағалау сызығының 422-ден 517 км-ге дейін ұзарғанын хабарлады. Алакөлдің деңгейі қайталана отырып өзгеретінін Бабкин және т.б. (Babkin et al., 2017) хабарлаған, өз еңбектерінде 109 жылдық (1894–2003 жж.) қатарды талдап, айтарлықтай амплитуданы – бір минимумнан екінші минимумға дейінгі 61 жыл арасында (1885–1946 жж.) 23 жылы көтерілу мен 38 жылы төмендеу болғанын, су деңгейінің жылына 4,6 см жылдамдықпен төмендегенін анықтаған. Олардың болжамы көл суының біршама төмендеу мүмкіндігін көрсетті.

Кейінгі зерттеулерде Алакөлдің жағалау аймағының табиғи-географиялық әлсіздігі, көл жағалауының деңгейі өзгерістері мен абразияға қатысты сезімтал екені зерттеліп жарық көрді (Liu et al., 2022; Seitkazy et al., 2025). Бақылау деректерінің жеткіліксіздігі жағдайында ғарыштық альтиметрия мен басқа да дерек көздерін біріктіру зерттеуге қолайлы тәсіл болатыны осыған дейін де баяндалған (Velpuri et al., 2012). Көп мақсаттық ғарыштық альтиметрия деректерінің көмегімен су деңгейінің ұзақ мерзімді динамикасын анықтап, су ресурстарын бақылау мүмкіндігі зерттеуге елеулі үлес қосады.

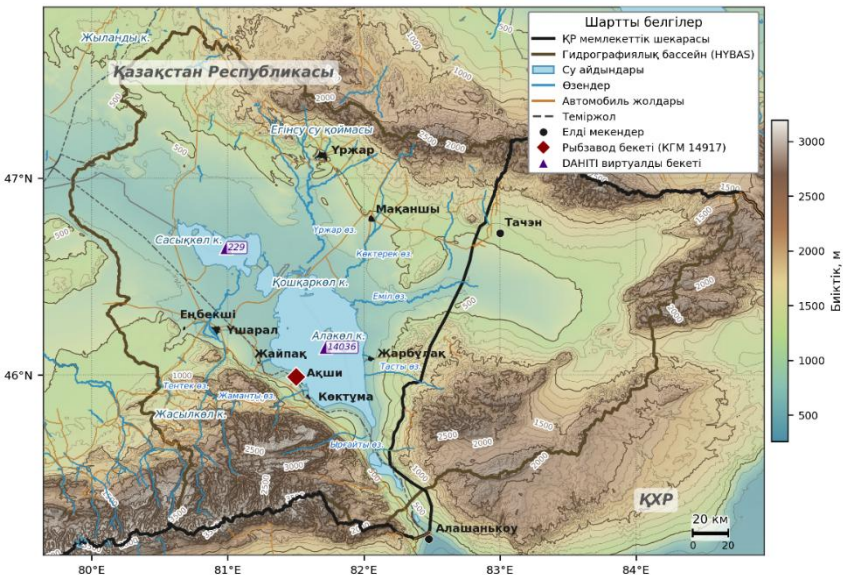
Осы қос көлде трансгрессия немесе регрессия жүріп жатқанын анықтау мәселесі маңызды екенін ескере отырып осы зерттеу жұмысының мақсаты ретінде 2016–2026 жж. аралығындағы Алакөл мен Сасықкөл су деңгейінің траекториясын ғарыштық альтиметрия деректерінің көмегімен сипаттау, бағалауды жаңарту, су жинау алабындағы суару қарқындылығын әсер етуші фактор ретінде бағалау қойылды.

2. Материалдар мен әдістер

Алакөл – теңіз деңгейінен шамамен 350 м биіктікте орналасқан Қазақстандағы екінші үлкен және ағынсыз терең көл (сурет 1) Қытай Халық Республикасының аумағына көрші орналасқан, су ауданы 2650–3030 км², ең терең нүктесі 54 м, орташа тереңдігі 22 м және көлемі шамамен 58,6 км³ (Babkin et al., 2017). Суы ащы, ал су деңгейі құятын ағын мен булану арасындағы теңгерімсіздіктің салдарынан өзгеріп тұрады. Оған құятын негізгі өзендер Үржар (орташа жылдық су шығыны 20 м³/с), Ырғайты (орташа жылдық су шығыны 14,8 м³/с), Еміл (орташа жылдық су шығыны 8,7 м³/с).

Сасықкөл – Алакөлден солтүстік-батысқа қарай шамамен 20 км жерде ұқсас биіктікте орналасқан көл. Суы тұщы, таяз (ең терең жері 9 м шамасында) және ауданы айтарлықтай кішірек (шамамен 736 км²) ағынды көл және оған осы жүйедегі суы ең мол Тентек өзені құяды

(орташа жылдық су шығыны 42 м³/с), көл суы арналар жүйесі арқылы алдымен Қошқаркөлге, содан соң Алакөлге қарай ағады. Қос көлге келетін су ағыны Жетісу Алатауы мен Тарбағатайдың батыс беткейлеріндегі қардың еруі нәтижесінде бастау алады.



Сурет 1. Зерттеу аумағының картасы (OpenStreetMap (Geofabrik GmbH, 2026), SRTM (NASA Jet Propulsion Laboratory, 2013), DANITI (Schwatke et al., 2015) деректерінің негізінде құрастырылған)

Осы зерттеу жұмысында Алакөл мен Сасықкөл су деңгейінің кейінгі динамикасын анықтау мақсатымен ғарыштық альтиметрия, «Қазгидромет» РМК бақылаулары біріктірілді (кесте 1) (Republican State Enterprise Kazhydromet, 2026).

Кесте 1. Зерттеу жұмысында қолданылған деректер

Дерек көзі / көрсеткіштері	Станция нөмірі	Бақылау кезеңі
DANITI / ғарыштық альтиметрия	Алакөл, ID 14036	2016–2026 жж.; 125 жазба
	Сасықкөл, ID 229	2016–2026 жж.; 325 жазба
«Қазгидромет» РМК деректер базасы/ су деңгейі	Рыбзавод гидрологиялық бекеті (№14917)	2000-2024 жж.
NASA/USGS SRTMGL1 v003	Shuttle Radar Topography Mission жер бедерінің сандық үлгісі	2000 ж. ақпан айы
OpenStreetMap; Geofabrik порталы	Қазақстан Республикасы аумағының векторлық карталары	2026 ж. шілде айы

DANITI дерекқорынан су деңгейінің уақыттық қатарлары Алакөл (ID 14036) және Сасықкөл (ID 229) алынды. Алакөл оңтүстік-батыс жағалауында орналасқан Рыбзавод гидрологиялық бекетінен (станция коды 14917) алынған өлшеу нәтижелері ғарыштық альтиметрия өлшеулерінің бағыты мен шамасын тексеру үшін қолданылды. Алакөл үшін

ДАНІТІ деректері 125 бақылаудан (2016-2026 жж. мамыр-маусым) және Сасықкөл көлі үшін 325 бақылаудан (2016-2026 жж. қаңтар-маусым) тұрады. Қарастырылған су деңгейінің динамикасының сенімділігін анықтау мақсатында Mann-Kendall (F. Wang et al., 2020) тренд тесті қолданылды (1):

$$\tau = \frac{S}{N(N-1)/2} \quad (1)$$

Мұндағы S – барлық ықтимал жұптардың айырмашылықтары ретінде есептеледі (2):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+2}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

Мұндағы x_i және x_j уақыт қатарындағы деректердің мәндері ($j > i$), n – деректер нүктелерінің саны. Статистикалық маңыздылығы p -value арқылы бағаланады.

Трендтің көлбеулігін бағалау үшін Сен көлбеуі (Sen's slope, β_{Sen}) (Jiqin et al., 2023) арқылы көлбеулердің медианасы ретінде есептеледі (3).

$$\beta_{\text{Sen}} = \text{median}\left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}\right) \quad (3)$$

Мұндағы $x_{i,j}$ – уақыт қатарындағы деректердің мәндері, ал i мен j – уақыт мезеттері. Осы зерттеу жұмысында медианалық көпжылдық уақыт қатарындағы орташа жылдық өзгерісті бақылау мақсатында қолданылды.

3. Нәтижелер

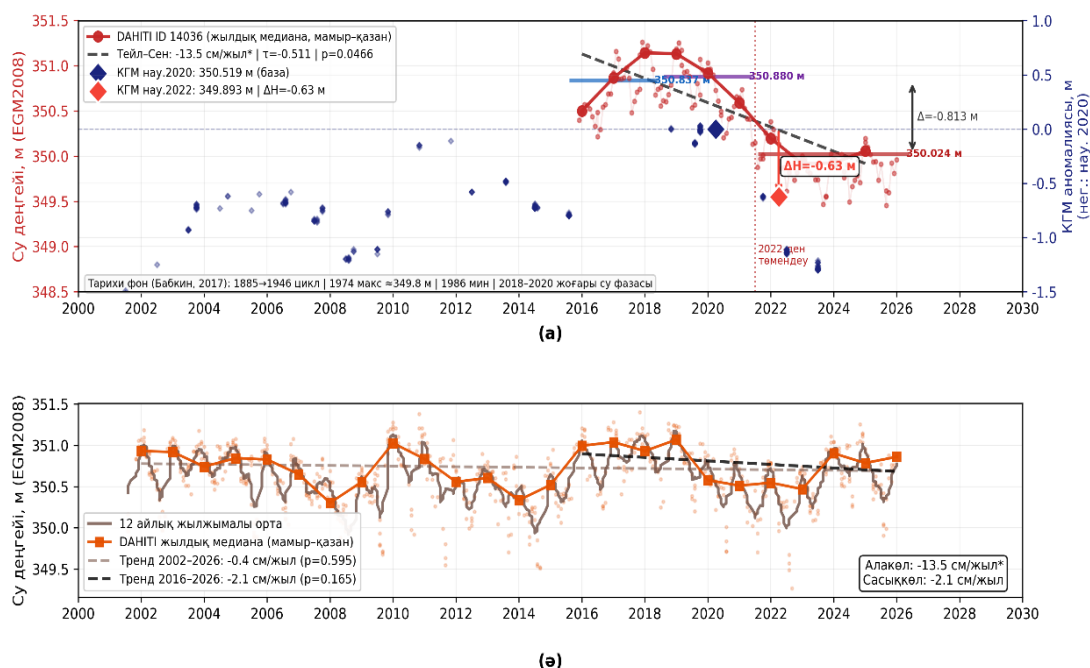
Алакөлге қатысты альтиметрия көрсеткіштері 2016-2026 жж. мамыр-маусым айлары аралығындағы кезеңді қамтыды, су деңгейі EGM2008 вертикальді координат жүйесіне сәйкес 349,46 м (мин.) мен 351,26 м (макс.) аралығында өзгергенін көрсетті. Жылы мезгілдің (мамыр-қазан) көпжылдық орташа көрсеткіштері мұз қату әсерін есептен алып тастаған соң статистикалық тұрғыдан маңызды төмендеу үрдісін көрсететіні анықталды. Манн-Кендалл сынағы $\tau = -0,511$ және $p = 0,0466$, ал су деңгейінің төмендеу жылдамдығы (Тейл-Сен көлбеуі) жылына $-0,1346$ м тең болды (кесте 2).

Кесте 2. Жылы кезеңдегі Алакөл мен Сасықкөлдің 2016–2026 жж. су деңгейлерін ғарыштық альтиметрия деректері бойынша салыстыру

Көл	Кезең	Тренд	Манн-Кендалл	Қорытынды
Алакөл	2016–2026	–13,46 см/жыл	$\tau = -0.511, p = 0.0466$	Трендтің статистикалық мәні бар
Сасықкөл	2002–2026	–0,37 см/жыл	$\tau = -0.080, p = 0.5948$	Мәнді тренд жоқ
Сасықкөл	2016–2026	–2,13 см/жыл	$\tau = -0.345, p = 0.1646$	Мәнді тренд жоқ

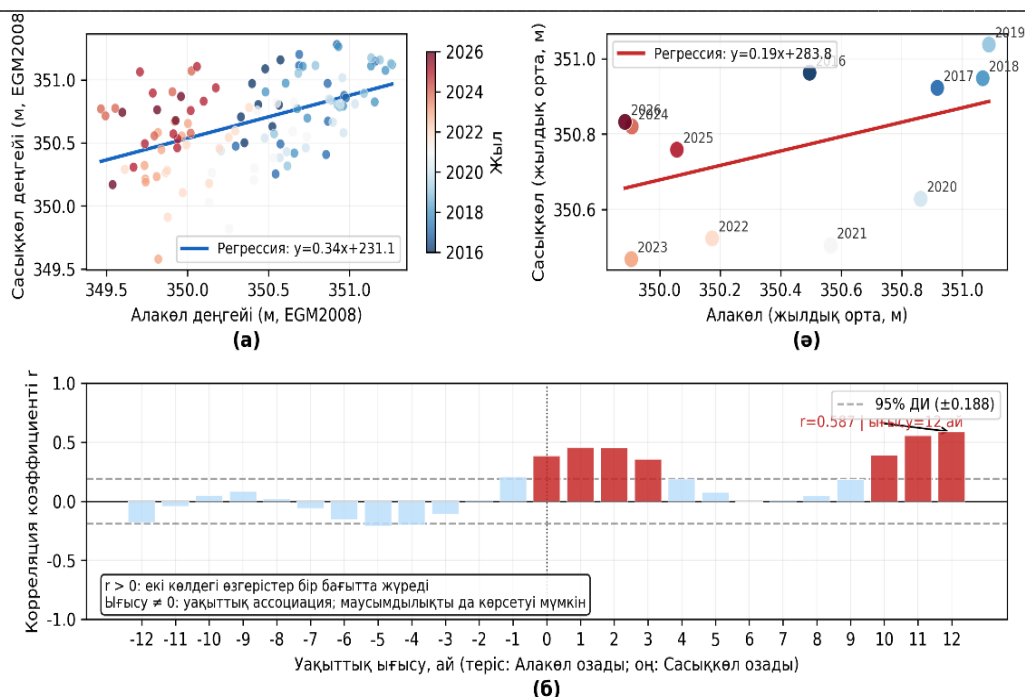
Яғни он жылда су деңгейі 1,35 м шамасына төмендеді, алайда ол біркелкі болған емес. Судың жылдық медиана деңгейі 2016–2018 жылдары 350,736 м, ал 2019–2021 жылдары 350,704 м деңгейінде болды. Кейіннен 2022–2026 жылдары су деңгейі 349,875 м дейін төмендеді. Осылайша, бастапқы және соңғы кезең аралығында жылдық медианалық су деңгейі негізінен 2022 жылдан кейін 0,813 м-ге төмендеді (сурет 2а).

Сасықкөлге қатысты альтиметрия көрсеткіштері ұзактау аралықты - 2002 ж. ақпаны мен 2026 ж. маусымы аралығындағы кезенді қамтыды, су деңгейі EGM2008 вертикальді координат жүйесіне сәйкес 349,27 м (мин.) мен 351,4 м (макс.) аралығында өзгергенін көрсетті.



Сурет 2 – Алакөл (а) мен Сасықкөлдің (ә) су деңгейінің динамикасы Қазгидромет, ДАНІТІ спутниктік альтиметрия, Бабкин және т.б. (Babkin et al., 2017) болжамымен салыстыру

Жылы мезгілдің (2002–2026 жж. мамыр–қазан) көпжылдық жылдық медианалық көрсеткіштері мұз қату әсерін есептен алып тастаған соң статистикалық мәнді төмендеу үрдісі анықталмады. Манн-Кендалл сынағы $\tau = -0,08$ және $p = 0,5948$ (кесте 1), ал су деңгейінің төмендеу жылдамдығы (Тейл-Сен көлбеуі) жылына $-0,37$ см тең болды.



Сурет 3. Алақөл және Сасықкөл су деңгейлерінің корреляциялық талдауы (2016–2026 жж.): а) айлық деңгейлер; ә) мамыр–қазан кезеңінің жылдық медианалары; б) деңгей аномалияларының уақыттық ығысуы бойынша кросс-корреляциясы

Алақөлмен салыстырмалы түрде 2016–2026 жж. аралығында $\tau = -0,345$ және $p = 0,1646$, ал су деңгейінің төмендеу жылдамдығы (Тейл–Сен көлбеуі) жылына $-2,13$ см тең болды. Судың медианалық деңгейі 2016–2018 жылдары 350,954 м, ал 2019–2021 жылдары 350,733 м, 2022–2026 жылдары су деңгейі 350,616 м-ге дейін өзгерді (сурет 2ә). Алайда мұндай айтарлықтай су деңгейінің төмен түсуі статистикалық мәнсіз болып шықты.

Қарастырылған уақыт аралығындағы Алақөл мен Сасықкөлдің ай сайынғы су деңгейлерінің өзара корреляциялық талдауы нәтижесінде (сурет 3а) орташа оң байланыс бар екені анықталды (Пирсон корреляциясы $r = 0,495$, $p < 0,0001$).

Керісінше, жылы мезгілдің жылдық медианалық деңгейлері (сурет 3ә) статистикалық мәнді корреляция көрсетпейді (Пирсон корреляциясы $r = 0,455$, $p = 0,1597$). Сәйкесінше қос көлдің көпжылдық өзгерістері синхронды емес. Сызықтық тренді алып тастағандағы екі көл деңгейлерінің өзара корреляциясы Алақөлдің 12 айға кешігуін қарастырғанда ғана Пирсон корреляциясы $r = 0,587$ мәніне дейін жоғарылады (сурет 3б), алайда бұл тікелей қайталанатын жылдық маусымдық өзгерістер көрсеткіші болуы мүмкін.

Алынған нәтижелер екі көлге ортақ гидроклиматтық күштердің әсерін суреттейді. Алайда қос көл су деңгейлерінің ұзақ мерзімді реакциялары олардың су баланстарының құрылымының айырмашылығына байланысты бірдей емес: Алақөлдің тұйық, ағынсыз, ал Сасықкөлдің ағынды, қос көл ортасындағы Қошқаркөл арқылы өзара гидравликалық байланыста. Сонымен қатар, су әкелетін ағындардың гидрологиялық өзгерістері, су пайдаланудың өзгерістері оларға екі түрлі әсер етуі мүмкін.

4. Талқылау

Қарастырылған кезеңдегі Алақөлдің су деңгейінің айтарлықтай төмендеуі статистикалық тұрғыдан маңызды және бұл көлдің регрессия кезеңіне өтуінің көрсеткіші. Жылы маусымдағы орташа су деңгейі қарастырылған уақыттағы ғарыштық альтиметрия деректерінде байқалған өзгерістің бағыты мен шамасы «Қазгидромет» РМК-ның «Рыбзавод» бекетіндегі бақылаулармен сәйкес келеді. Ал Сасықкөлдегі су деңгейінің динамикасы статистикалық тұрғыдан маңызды өзгерістерді көрсетпеді және қос көл арасындағы

гидрологиялық байланыстың болуы мен режимдерінің ұқсамайтынын көрсетті. Алакөлдегі су деңгейінің айтарлықтай төмендеуі қосымша ағын су, жауын-шашын, су пайдалану деректерін қоса отырып күрделі модель құрастыру қажеттілігін көрсетті.

5. Қорытынды

Осы зерттеу барысында ғарыштық альтиметриялық бақылау деректерінің көмегімен Алакөлдің су деңгейінің статистикалық маңызды төмендеуі анықталды. ДАНИТ миссиясының деректеріне сәйкес 2016-2026 жж. мамыр-маусым аралығында көлдің су деңгейі 349,46-351,26 м (EGM2008) арасында өзгерді. Жылы мезгілдегі су деңгейінің медианалары арқылы айтарлықтай төмендеу трендінің (Манн-Кендалл сынағы $\tau = -0,511$, $p = 0,0466$) бар екендігі, ал су деңгейінің жылына 0,1346 м шамасында (Тейл-Сен көлбеуі) төмендеп жатқандығы анықталды. Су деңгейі 2021 жылға дейін салыстырмалы түрде жоғары болып, ал одан кейінгі кезеңде айқын төмендей бастағаны байқалды және 2016–2025 жж. аралығында медианалық көрсеткіші 0,813 м-ге төмендеді.

Ғарыштық бақылау нәтижесін Қазгидромет ұлттық бақылау жүйесіндегі Алакөл жағасындағы Рыбзавод бекетінен алынған деректер арқылы расталды. Наурыз айындағы су деңгейі 2020 ж. 350,519 м (теңіз деңгейі) 2022 ж. 349,893 м деңгейіне дейін (-0,626 м) төмендегені байқалды. Екі вертикальді координат жүйесіндегі осындай ұқсастық Алакөлдің су деңгейі төмендеуінің гидрологиялық өзгеріс екенін көрсетеді. Осыған дейін тарихи бақылау деректеріне сүйеніп Бабкин және т.б. (2017) су деңгейінің тұрақты төмендеуін болжаған еді. Аталған авторлардың нәтижелерін бақылау көрсеткіштері ретінде қарастырылған кезде зерттеуіміздің Алакөл су деңгейінің сол тұжырымдарға сәйкес төмендеп бара жатқаны анықталды. Дегенмен, төмендеу жылдамдығы тарихи регрессияның орташа қарқынынан біршама жоғары болып шықты.

Сасықкөл мен Алакөлдің ай сайынғы медианалық су деңгейі ғарыштық деректерге сәйкес оң байланыстың барын көрсетті, бұл аймақтық ортақ гидроклиматтық себептерді көрсетеді. Алайда, 2002-2025 жж. арасында Сасықкөл су деңгейінде статистикалық маңызы бар монотондық үрдіс табылмады, яғни екі көлдің аймақтық гидроклиматтық өзгерістерге бірдей жауап бермейтіні анық. Оның себептері қос көлдің екі түрлі гидрологиялық конфигурациясы, араларындағы Қошқаркөл арқылы гидравликалық байланысының болуы мен суды пайдалану қысымының әртүрлігінде болуы мүмкін.

Болашақта зерттеу жұмыстары қос көлдің климаттық өзгергіштік пен суды пайдаланудың рөлін анықтау үшін су ағынын, суды алу деректерін, жауын-шашын мөлшерін, көлдің булануын, қар жинауды бағалауды және жер асты суларының деректерін біріктіруі керек. Қазіргі нәтижелер болашақта су балансын бағалау және аумақтың су ресурстарын басқару үшін ғарыштық және өлшеу құралдарының деректерімен расталған базалық деңгейді ұсынады.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация - К.С., Е.М.; әдістемесі - К.С.; бағдарламалық қамтамасыз ету - К.С.; валидация - Е.М., Ж.С.; формалды талдау - К.С.; зерттеу - Ж.С.; ресурстар - Е.М.; деректерді өңдеу - К.С.; жазу – түпнұсқа жобасын дайындау - К.С.; жазу – шолу және өңдеу - Е.М.; визуализация - С.А.; жетекшілік - Ж.С.; жоба жетекшілігі - Ж.С.; қаржыландыру - Ж.С. Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасымен танысып, келісті.

8. Автор туралы ақпарат

Самарханов, Канат – доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; жетекші ғылыми қызметкер, Қазақ-Британ

техникалық университеті, Төле би көшесі, 59, Алматы, Қазақстан, 050000; samarkhanov_kb@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9799-8695>.

Муқанов, Ерболат – доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; жетекші ғылыми қызметкер, Қазақ-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі, 59, Алматы, Қазақстан, 050000; mukanov_yen@enu.kz, <https://orcid.org/0009-0003-3132-6388>.

Сагин, Жанай – профессор, Қазақ-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі, 59, Алматы, Қазақстан, 050000; j.sagin@kbtu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0386-888X>.

Алиева, Сельвина – ғылыми қызметкер, Қазақ-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі, 59, Алматы, Қазақстан, 050000; salieval120@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7793-7016>.

9. Қаржыландыру: Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің «Жамбыл, Алматы, Жетісу, Абай және Шығыс Қазақстан облыстары үшін сулы горизонттарды басқарылатын толықтырудың гидрогеологиялық стратегияларымен су тасқыны-кұрғақшылық салдарын төмендету инновациялары» (ЖТН: BR27197639) бағдарламалық-мақсатты қаржыландыру жобасы аясында жүргізілді.

10. Алғыстар: Авторлар DANITI, Google Earth Engine платформаларының Жерді қашықтықтан зерделеу деректерінің мұрағаттарына, оларды өңдеу мен талдауда қолданылған есептеу ресурстарына қол жеткізуді қамтамасыз еткені үшін алғыс білдіреді. «Қазгидромет» РМК-на гидрологиялық бақылау нәтижелерін қолжетімді еткені үшін ерекше алғыс білдіреді.

11. Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдде қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Aizen, V. B., Aizen, E. M., Melack, J. M., & Dozier, J. (1997). Climatic and hydrologic changes in the Tien Shan, Central Asia. *Journal of Climate*, 10(6). [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1393:CAHCIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1393:CAHCIT>2.0.CO;2)
2. Babkin, A. V., Madibekov, A. S., Musakulkyzy, A., & Cherednichenko, A. V. (2017). Verification and actual forecast of the water level of Lake Alakol for the near future. *Hydrometeorology and Ecology. Almaty*, 3, 60–71.
3. Baigaliyeva, M., Mount, N., Gosling, S. N., & McGowan, S. (2024). Unravelling long-term impact of water abstraction and climate change on endorheic lakes: a case study of Shortandy Lake in Central Asia. *PLoS ONE*, 19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0305721>
4. Geofabrik GmbH. (2026). *Data Extracts – Technical Details*. <https://download.geofabrik.de/technical.html>
5. Jiqin, H., Gelata, F. T., & Gameda, S. C. (2023). Application of MK trend and test of Sen's slope estimator to measure impact of climate change on the adoption of conservation agriculture in Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3). <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.508>
6. Liu, Y., Ye, Z., Jia, Q., Mamat, A., & Guan, H. (2022). Multi-source remote sensing data for lake change detection in Xinjiang, China. *Atmosphere*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/atmos13050713>
7. Makhmudova, L., Alimkulov, S., Talipova, E., Birimbayeva, L., Moldakhanova, N., Dautaliyeva, M., Alzhanov, O., Dostayeva, A., Zhunissova, M., & Akzharkynova, A. (2026). Climate-Driven Shifts in Drought Dynamics in the Balkhash–Alakol Water Management Basin Revealed by Integrated Satellite and Ground Observations. *Applied Sciences*, 16(15), 7606. <https://doi.org/10.3390/app16157606>
8. Massakbayeva, A., Abuduwaili, J., Bissenbayeva, S., Issina, B., & Smanov, Z. (2020). Water balance of the Small Aral Sea. *Environmental Earth Sciences*, 79(3), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8739-5>

9. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., & Gomis, M. I. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2(1), 2391.
10. Mukanov, Y., Arystanova, R., Sagin, J., Samarkhanov, K., Usmanov, T., Baisholanov, S., & Zhukonova, A. (2026). A statistical analysis of multi-decadal trends in temperature, precipitation and drought indices in eastern and southeastern Kazakhstan between 1981 and 2023. *Agronomy*, 16(11), 1097. <https://doi.org/10.3390/agronomy16111097>
11. NASA Jet Propulsion Laboratory. (2013). *NASA Shuttle radar topography mission global 1 arc second*. NASA EOSDIS land processes distributed active archive center. <https://doi.org/10.5067/MEASURES/SRTM/SRTMGL1.003>
12. Nurakynov, S., Kaldybayev, A., Zulpikharov, K., Sydyk, N., Merekeyev, A., Chepashev, D., Nyssanbayeva, A., Issanova, G., & Fang, G. (2023). Accelerated glacier area loss in the Zhetysu (Dzhungar) Alatau Range (Tien Shan) for the period of 1956–2016. *Remote Sensing*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/rs15082133>
13. Republican State Enterprise Kazhydromet. (2026). *Hydrological Database of the Republic of Kazakhstan*. RSE Kazhydromet. https://meteo.kazhydromet.kz/database_hydro_kz/
14. Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., & Seitz, F. (2015). DAHITI – an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4345–4364. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4345-2015>
15. Seitkazy, M., Genc, L., Aktymbayeva, A., Valeyev, A., Taukebayeva, M., Kaliyeva, A., & Beisekenov, N. (2025). The effect of changing the shoreline on the east recreation area of Alakol lake (Kazakhstan). *Geojournal of Tourism and Geosites*, 59(2). <https://doi.org/10.30892/gtg.59243-1475>
16. Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., & Beniston, M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2(10), 725–731. <https://doi.org/10.1038/nclimate1592>
17. Valeyev, A., Karatayev, M., Abitbayeva, A., Uxukbayeva, S., Bektursynova, A., & Sharapkhanova, Z. (2019). Monitoring coastline dynamics of Alakol Lake in Kazakhstan using remote sensing data. *Geosciences*, 9(9), 404.
18. Velpuri, N. M., Senay, G. B., & Asante, K. O. (2012). A multi-source satellite data approach for modelling Lake Turkana water level: calibration and validation using satellite altimetry data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1). <https://doi.org/10.5194/hess-16-1-2012>
19. Wang, F., Shao, W., Yu, H., Kan, G., He, X., Zhang, D., Ren, M., & Wang, G. (2020). Re-evaluation of the power of the Mann-Kendall test for detecting monotonic trends in hydrometeorological time series. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00014>
20. Wang, J., Song, C., Reager, J. T., Yao, F., Famiglietti, J. S., Sheng, Y., MacDonald, G. M., Brun, F., Schmied, H. M., Marston, R. A., & Wada, Y. (2018). Recent global decline in endorheic basin water storages. *Nature Geoscience*, 11(12). <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0265-7>
21. Wurtsbaugh, W. A., Miller, C., Null, S. E., Justin De Rose, R., Wilcock, P., Hahnenberger, M., Howe, F., & Moore, J. (2017). Decline of the world's saline lakes. *Nature Geoscience*, 10(11). <https://doi.org/10.1038/NGEO3052>
22. Yapiyev, V., Sagintayev, Z., Inglezakis, V. J., Samarkhanov, K., & Verhoef, A. (2017). Essentials of endorheic basins and lakes: a review in the context of current and future water resource management and mitigation activities in Central Asia. *Water (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/w9100798>
23. Yapiyev, V., Sagintayev, Z., Verhoef, A., Kassymbekova, A., Baigaliyeva, M., Zhumabayev, D., Malgazhdar, D., Abudanash, D., Ongdas, N., & Jumassultanova, S. (2017). The changing water

- cycle: Burabay National Nature Park, Northern Kazakhstan. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(5). <https://doi.org/10.1002/wat2.1227>
24. Zhang, X., Wang, L., & Chen, D. (2019). Changes in precipitation extremes in Central Asia. *Journal of Hydrometeorology*, 20, 459–475.
25. Alimkulov, S. K., Myrzakhmetov, A. B., Tursunova, A. A., Isakan, G., Dostaeva, A. Zh., & Kanay, M. A. (2023). Basic hydrographic information on the rivers and temporary watercourses of the Balkhash–Alakol Basin (Osnovnyye gidrograficheskiye svedeniya o rekakh i vremennykh vodotokakh Balkhash-Alakol'skogo basseyna in Russian). *Bulletin of the Karaganda University. Biology Medicine Geography Series*, 109(1), 195–205. <https://doi.org/10.31489/2023bmg1/195-205>

Dynamics of water level in Alakol and Sasykkol lakes based on space altimetry (2016-2026)

Kanat Samarkhanov, Yerbolat Mukanov, Zhanay Sagin, Selvina Aliyeva

Abstract: The Alakol-Sasykkol lake system forms a single hydrological system located in the Balkhash-Alakol basin in eastern Kazakhstan, fed by the waterflows from the Zhetysu-Alatau and Tarbagatai ranges. However, the hydrological regimes of the two lakes differ: Alakol is a brackish-water endorheic lake, while Sasykkol is a freshwater lake with an inflow, receiving its main water supply from the Tentek River and connected to Lake Alakol via Lake Koshkarkol. Under these conditions, assessing water level changes in the two lakes and the characteristics of their interconnections is of hydrological significance. The study used DAHITI satellite altimetry data: 125 observations from a virtual station in Alakol (ID 14036) for 2016–2026, and 796 observations from a virtual station in Sasykkol (ID 229) for 2002–2026. These series were compared with data from the Rybzavod hydrological station of the KazHydromet Republican State Enterprise. Water level trends were assessed using the Mann-Kendall test, and the rates of change were calculated using the Theil-Sen slope. It was found that the Alakol level has been decreasing by approximately 13.46 cm per year (Mann-Kendall test $\tau = -0.511$, $p = 0.0466$). The median water level in the warm season decreased from 350.7 m in 2016-2018 to 349.9 m in 2022-2026; thus, the decrease amounted to 0.86 m. Although the Sasykkol level decreased (2.13 cm/year), no statistically significant monotonic trend was detected over the observation period of 2002-2026. These results indicate that the phase of Alakol level decline is not synchronous with the phase of Sasykkol level decline and provide evidence of a regressive phase.

Keywords: space altimetry; DAHITI; Alakol; Sasykkol; lake; water level; Mann-Kendall.

Динамика уровня воды в озерах Алаколь и Сасыккол на основе космической альтиметрии (2016-2026)

Канат Самарханов, Ерболат Муканов, Жанай Сагин, Сельвина Алиева

Аннотация: Озерная система Алаколь-Сасыкколь образует единую гидрологическую систему, расположенную в бассейне Балхаш-Алаколь на востоке Казахстана, питаемую водами хребтов Жетысу-Алатау и Тарбагатай. Однако гидрологический режим двух рассматриваемых озер различается: Алаколь – солоноватоводное озеро без притока, а Сасыкколь – пресноводное озеро с притоком, получающее основную воду из реки Тентек и соединено с озером Алаколь через озеро Кошкарколь. В этих условиях особое

гидрологическое значение имеет оценка изменений уровня воды в двух озерах и особенностей их взаимосвязи. В исследовании использованы данные космической альтиметрии DАNІTІ: 125 наблюдений с виртуальной станции в Алаколе (ID 14036) за 2016–2026 годы, 796 наблюдений с виртуальной станции в Сасыкколе (ID 229) за 2002–2026 годы. Данные временные ряды были сопоставлены с данными гидрологической станции «Рыбзавод» РГП «Казгидромет». Тренды уровня воды оценивались с помощью теста Манна-Кендалла, а темпы их изменения рассчитывались с использованием коэффициента наклона Тейла-Сена. Установлено, что уровень Алаколя снижается примерно на 13,46 см в год (тест Манна-Кендалла $\tau = -0,511$, $p = 0,0466$). Медианный уровень воды в теплый сезон снизился с 350,7 м в 2016-2018 годах до 349,9 м в 2022-2026 годах, таким образом, снижение составило 0,86 м. Хотя уровень Сасыкколя снизился (2,13 см/год), статистически значимого монотонного тренда за период наблюдений 2002-2026 годов обнаружено не было. Эти результаты указывают на то, что фаза снижения уровня Алаколя не синхронна с фазой снижения уровня Сасыкколя и предоставляют данные о регрессивной фазе первого озера.

Ключевые слова: космическая альтиметрия; DАNІTІ; Алаколь; Сасыкколь; озеро; уровень воды; Манн-Кендалл.

Human settlements in Shofirkon District, Bukhara Region: geographical features, problems and development prospects

Ahrorbek Usmonov*, Sabina Suvonova

Bukhara State Pedagogical Institute, Bukhara, Uzbekistan;
sabina_suvonova04@gmail.com

*Correspondence: ahroru85@gmail.com

Abstract: This study examines the geographical features, current problems, and development prospects of human settlements in Shofirkon District of Bukhara Region, Uzbekistan, representing one of the first district-level analyses conducted within the region. Drawing on official statistics from the Bukhara Regional Statistical Department, GIS-based cartographic analysis, and comparative-geographical and statistical-analytical methods, the study characterizes a settlement network comprising one administrative city, eight towns, and 144 rural settlements across 3.72 thousand km². The city of Shofirkon grew by 31.9 % between 1995 and 2024, while the district's eight towns, all established in 2009 under the state program "Rural Development and Prosperity," grew unevenly, from 8.0 % to 25.7 %. They remain functionally close to ordinary villages, commonly termed "agro-towns," and display markedly uneven infrastructure despite their shared founding date. Rural settlements are dominated numerically by small, dispersed communities (60.0 % of the total) concentrated mainly in desert and buffer zones, while medium-sized settlements, though fewer, accommodate 61.3 % of the rural population in the fertile oasis center. This spatial pattern reflects a pronounced intra-district ecological gradient associated with water availability. The district faces mounting geoecological problems, including declining groundwater levels, increasing soil salinity, more frequent dust days, and a widening seasonal water deficit associated with population growth and constrained cross-border river management. A household-scale rainwater-harvesting measure is proposed, with an estimated annual yield of approximately 7,800 liters per household, providing a feasible, low-cost means of reducing peak summer water demand in oasis and buffer-zone settlements. The findings indicate that administrative reclassification of villages as towns has not overcome underlying ecological constraints. Further development therefore requires infrastructure investment tailored to each settlement's ecological zone and economic base rather than further status changes. The study provides a replicable district-level framework for analyzing settlement development in arid, oasis-dependent areas of Central Asia.

Citation: Usmonov, A., Suvonova, S. (2026). Human settlements in Shofirkon District, Bukhara Region: geographical features, problems and development prospects. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry, Geography Series, 156(3), 203-219.
<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-156-3-203-219>

Academic Editor:
A.M. Sergeeva

Received: 2.08.2026
Revised: 04.09.2026
Accepted: 07.09.2026
Published: 30.09.2026



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: human settlements; Shofirkon District; Bukhara Region; rural settlements; geoecological problems; water scarcity; agro-towns; Uzbekistan.

1. Introduction

Population is central to the economic reforms aimed at building a stable and efficient national economy, and about 60 % of state budget expenditures are directed toward the social sphere – a fact that underscores the relevance of scientific research on population and related fields.

Globally, accelerating urbanization and international migration continue to widen the development gap between rural and urban settlements. Although urban and rural areas remain functionally interconnected, rural territories in many developing countries lag behind in infrastructure and living standards, and the majority of the world's poor still reside in rural settlements. The United Nations' 2030 Agenda for Sustainable Development and the New Urban Agenda both call for preventing the intensification of socio-ecological, economic-demographic, transport, and other problems within human settlement systems, making territorial research on settlement planning and the dynamics of settlement change particularly relevant.

In Uzbekistan, a number of reforms are underway to improve the territorial distribution of population and settlement development. The New Uzbekistan Development Strategy for 2022–2026 specifically emphasizes the development of a General Scheme for Population Distribution and prioritizes social infrastructure placement around territorial "growth points" within the framework of the "Obod Qishloq" (Prosperous Village) and "Obod Mahalla" (Prosperous Neighborhood) programs. Within this context, research addressing the socio-economic problems of population growth and territorial settlement formation in Bukhara Region – an area of considerable tourism and resource potential – takes on particular significance.

At the same time, continued population growth is increasing demand for social infrastructure and human settlements while intensifying pressure on the ecological condition of the regions, including growing strain on water, land, biological, and climatic resources. Shofirkon District of Bukhara Region, the object of the present study, exemplifies these processes: it faces a range of geographical and environmental problems that constrain its development prospects. A geographical and ecological analysis of these problems is therefore both timely and practically relevant.

Literature analysis and methodology. Geographical research on population has traditionally developed along two lines. The first is oriented toward demographic characteristics proper – population growth, age and sex structure, ethnic composition, and reproduction – while the second addresses human settlement networks, which are themselves a spatial outcome of these demographic processes (Adams, 2022; Bell, Jayne, 2009). Human settlements are commonly defined in the literature not merely as places of residence, but as territorial units combining production, consumption, and socio-economic functions; several scholars converge on this understanding while emphasizing different aspects – from the material conditions of communal life (Conrad et al., 2015) to settlements as centers of labor activity, production, and economic linkage (Di Clemente et al., 2021). Recent scholarship on the Global South has reframed peri-urban and small-settlement dynamics in ways directly relevant to Shofirkon District. Follmann (2022) argues that peri-urbanization is not a transitional or residual category between "rural" and "urban," but a distinct spatial process with its own logic of land-use change, infrastructure lag, and governance ambiguity. This framework fits Shofirkon's eight recently reclassified towns, which occupy exactly this ambiguous administrative-functional space. Roberts (2016) similarly finds that small and intermediate towns in developing regions frequently absorb rural population growth without a corresponding transformation of their economic base, consistent with this study's characterization of the district's towns as "agro-towns." Here, "agro-towns" refers to settlements that acquired formal town status through administrative reclassification while retaining a predominantly agricultural economic base and village-level infrastructure.

Several regional studies establish the comparative context for Shofirkon's settlement network. Ma and Sun (2020) trace the divergent pace of urbanization across the five Central Asian states, finding that Uzbekistan has urbanized more slowly and unevenly than Kazakhstan – consistent with Shofirkon's modest 23.2 % urbanization level. Turemuratov et al. (2024) distinguish "extensive"

agglomeration growth, driven by administrative reclassification, from "intensive" growth built on genuine economic diversification, a distinction that closely matches this study's finding that town status alone has not produced functional urban development in the district. Zhang et al. (2020) document a broader resource-urbanization tension across Central Asia, showing that settlement growth in arid basins tends to outpace sustainable water and land management, corroborating the geoecological pressures identified here. Junussova et al. (2022) show that Central Asian cities' infrastructure investment has generally lagged population growth, particularly in secondary and small urban centers, mirroring the infrastructure-population mismatch documented for Chandir and Juyrabat.

Kurbanov (2014) offers an earlier district-level assessment of urbanization problems across Uzbekistan's administrative districts but does not address Bukhara Region's desert-oasis districts individually - the gap this study fills for Shofirkon. Kurbanov and Oteuliev (2021) document persistent territorial disparities in living standards between Uzbekistan's regions, reinforcing the case for disaggregated, district-level analysis rather than regional averages. Saliev and Fedorko (2012) examine population distribution within Uzbekistan's natural-economic complexes, an approach conceptually related to this study's four-zone classification (oasis center, border, buffer, desert) of Shofirkon's rural settlements. Sergeyeva et al. (2025) analyze urbanization and spatial transformation specifically within Bukhara Region's cities, providing the closest existing comparator to this study, though at the regional rather than district scale.

Liu et al. (2021), examining the Manas River Basin, show how urbanization in arid regions reshapes ecosystem services and human well-being through changes in water and carbon flows, offering a methodological parallel for the water-scarcity mechanisms described here. Nickayin et al. (2022) find that settlement density and agglomeration are closely tied to fertility transitions across the urban-rural divide, relevant to the elevated fertility noted in Mirzoqul, Chandir, and Iskogare. Polinesi et al. (2020) develop a local-regression approach to modeling density effects on population trends, a technique that could extend the present district-level classification to finer spatial resolution in future work. Veckalne and Tambovceva (2023) propose a composite indicator for evaluating urban sustainability in Uzbekistan, a framework that could be applied to assess whether Shofirkon's towns meet sustainability thresholds beyond the infrastructure counts used here.

This literature establishes three points of departure. First, Central Asian urbanization research has largely operated at the national or regional scale (Ma & Sun, 2020; Turemuratov et al., 2024; Zhang et al., 2020), leaving district-level dynamics in arid, oasis-dependent districts comparatively unexamined. Second, Uzbekistan-specific studies (Kurbanov, 2014; Kurbanov & Oteuliev, 2021; Sergeyeva et al., 2025) confirm persistent sub-regional disparities but stop short of the individual-district resolution provided here for Shofirkon. Third, the ecological-demographic literature (Liu et al., 2021; Nickayin et al., 2022) links settlement growth to water-resource constraints but has not previously been applied to a desert-oasis district of Bukhara Region. The present study addresses this threefold gap through a combined demographic, infrastructural, and hydrological analysis at the district level.

Despite this substantial body of work, the natural, historical, and socio-economic factors shaping settlement formation, settlement classification, and the territorial changes occurring within urban- and rural-type settlements have not been examined at the level of individual administrative districts of Bukhara Region - including Shofirkon District. This gap constitutes the immediate rationale for the present study, which combines statistical, cartographic, and comparative-geographical methods to analyze the geographical features, current problems, and development prospects of human settlements in Shofirkon District.

2. Materials and Methods

Study area and data sources

The study area is Shofirkon District, located in the northern part of Bukhara Region, Uzbekistan, bordering Vobkent District to the south, Romitan District to the southwest, Peshku

District to the west, G'ijduvon District to the east, and Konimex District of Navoi Region to the north. The district covers 3.72 thousand km² (9.2 % of the region's total area) and, as of January 1, 2024, had a population of 186.5 thousand people (43.2 thousand urban, 143.3 thousand rural), distributed across 1 city, 8 towns, and 144 rural settlements (Bukhara Regional Department of Statistics, 2024) (Figure 1).

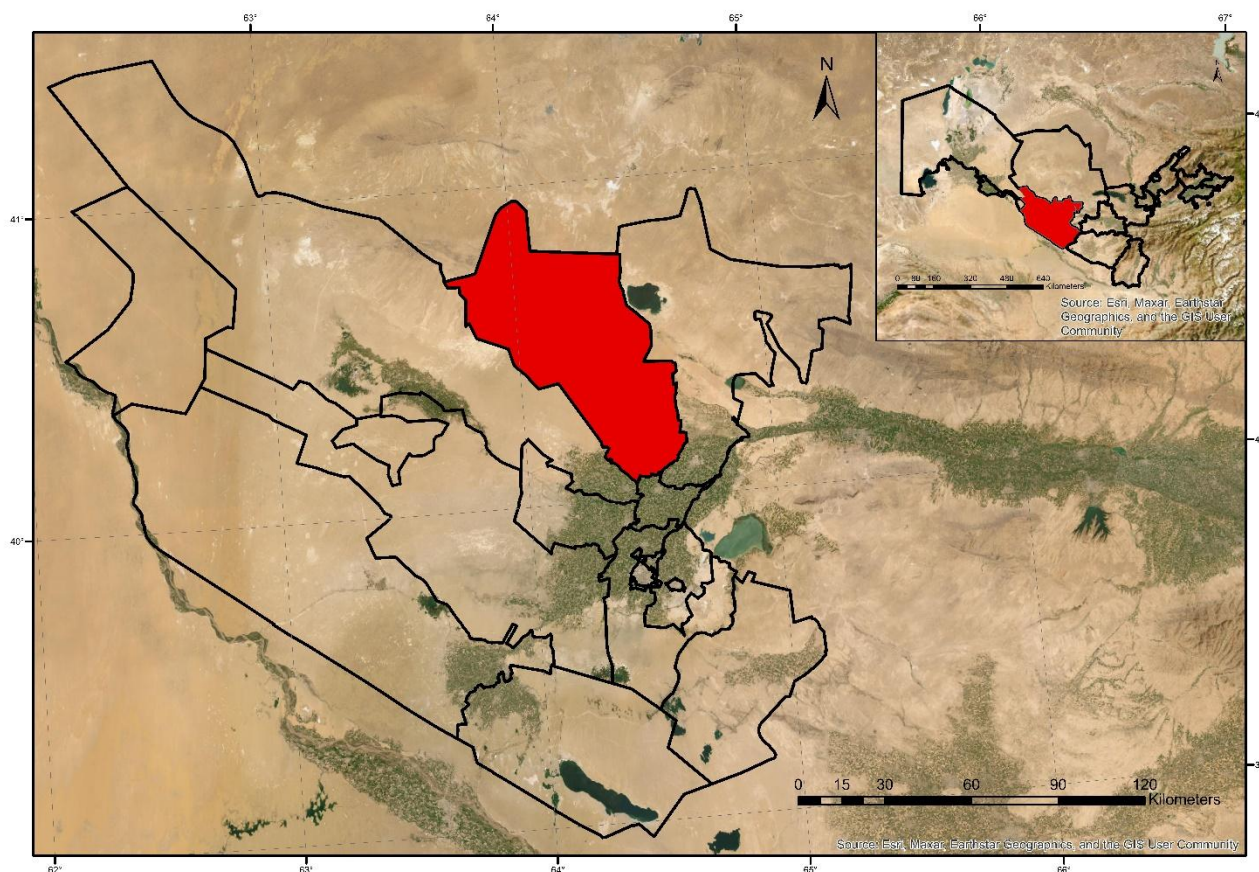


Figure 1. Location of the study area (Shofirkon District) within Bukhara Region, Uzbekistan

The primary data source was official statistics obtained from the Bukhara Regional Statistical Department, covering settlement-level population figures for the district's city and eight towns across five reference years (1990, 1995, 2000, 2016, and 2024 for the city; 2013, 2016, and 2024 for the towns), as well as current data on the socio-economic infrastructure of the newly formed towns, compiled from official records of the Bukhara Regional Statistical Department (no independent field survey was conducted) - the number of small businesses, sales and service outlets, schools, hospitals, pharmacies, markets, and the presence of gas and centralized water supply. These infrastructure indicators were used as a proxy set for assessing how far each town's development corresponds to formal urban-planning criteria. Infrastructure indicators are reported as absolute counts rather than per-capita values because reliable settlement-level population figures for all eight towns in the relevant reference years were not available from the Bukhara Regional Statistical Department; this constraint is discussed further under Limitations. Regulatory and programmatic documents were used as secondary sources to establish the administrative history of the settlement network, in particular the 2009 state program "Rural Development and Prosperity" and Cabinet of Ministers Decree No. 68, under which 966 rural settlements nationwide (67 in Bukhara Region, 8 in Shofirkon District) were granted town status.

Cartographic and GIS methods

Spatial data consisted of vector layers (administrative boundaries and settlement points) obtained from the open cartographic database OpenStreetMap (OSM), with satellite imagery from

Esri World Imagery (Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community) used as a background base layer (spatial resolution up to 0.3–1 m in urban areas, generally 15 m elsewhere, per Esri World Imagery specifications). Data processing, visualization, and spatial analysis were performed in ArcGIS Desktop 10.5 (ArcMap 10.5) using the WGS 1984 / UTM Zone 40N (EPSG:32640) coordinate reference system. The principal methods applied included spatial overlay of thematic layers, analysis of the relative position of objects, measurement of distances and areas, as well as thematic classification and cartographic visualization. These data and methods were used to produce the location map of the study area within Bukhara Region (Fig. 1) and the settlement-distribution map showing the spatial arrangement of the district's city and eight towns relative to the district center (Fig. 2). Straight-line distances from each of the eight towns to the district center were calculated in the GIS environment using Euclidean (straight-line) distance rather than road-network distance, since a complete and geometrically accurate road-network dataset for the district was not available (ranging from 4 km for Mirzoqul to 11.9 km for Quyi Chuqurak) and used as an indicator of geographical accessibility and locational advantage within the settlement network; straight-line distance is therefore used here as a proxy for relative locational advantage rather than actual travel distance.

Comparative-geographical method

This method was applied at two spatial scales. First, at the district scale, the settlement network of Shofirkon was compared with those of neighboring and other rural districts of Bukhara Region to characterize its degree of urbanization (23.2 %, typical of the region's rural districts) and the relative weight of small, medium, and large rural settlements. Second, within the district, the comparative-geographical method was used to differentiate the rural settlement network into four geographically conditioned zones according to their position relative to the Zarafshan oasis and the Kyzylkum desert: (1) settlements located in the oasis center (Revgar, Naqqosh, Savrak); (2) settlements bordering neighboring districts (Madaniyat, Mavri, Yuqori Chitgaron); (3) settlements in the buffer zone between oasis and desert (Jilvon, Quyi Jilvon, Tezguzar); and (4) settlements located within the desert proper (Churuk, Yangibog').

Zone assignment followed a qualitative expert classification based on each settlement's position relative to the boundary of irrigated (oasis) land and its proximity to the Zarafshan River irrigation network, rather than a fixed quantitative distance threshold.

Statistical-analytical method

Population data for all settlements were processed to classify them by demographic size using the threefold typology conventional in Uzbek settlement geography (Saliev & Nazarov, 2009): for rural settlements - small (up to 1,000 inhabitants), medium (1,000–3,000), and large (3,000–5,000 and above); towns were assessed on a comparable scale. Based on this classification, the number, share, and total population of each settlement category were calculated (e.g., 86 small rural settlements, 60 % of the total, with a combined population of 49.3 thousand; 56 medium settlements, 38.6 %, with 87.8 thousand inhabitants; and 2 large settlements, 1.4 %). The same method was applied to the eight towns to determine their combined share (64.4 %) of the district's total urban population and to track their population dynamics since receiving town status in 2009.

To assess whether population growth was associated with proximity to the district center, Spearman's rank correlation coefficient was calculated between the population growth rates of the eight towns during 2013–2024 and their GIS-derived Euclidean distances from Shofirkon. Spearman's rank correlation was selected because of the small sample size ($n = 8$) and because it does not require an assumption of normality. Statistical significance was evaluated at $p < 0.05$.

Applied hydrological estimation

To evaluate a practical mitigation measure for the district's water shortage, a simplified water-harvesting calculation was performed using the standard relationship that 1 mm of precipitation yields 1 liter of water per m^2 of collection surface. This was applied to the average hard-roof (slate-covered) catchment area of rural households in the district (approximately 60 m^2) combined with the midpoint of average regional annual precipitation (130 mm, taken as the mean of the 120–140 mm range),

yielding an estimated potential rainwater-harvesting volume of approximately 7,800 liters per household annually (range: 7,200–8,400 liters across the full precipitation range). This figure represents gross catchment potential before accounting for runoff-coefficient losses (typically 0.8–0.9 for slate roofs) and storage/collection losses, and should therefore be treated as an upper-bound estimate rather than a net usable volume, and its practical use depends on storage capacity sufficient to carry water over into the peak-demand summer period.

Limitations

The analysis relies on district-level administrative statistics rather than primary field survey data; infrastructure indicators for the eight towns are presented as counts rather than per-capita or normalized values, and the hydrological estimate is a first-order approximation intended to illustrate feasibility rather than a full water-balance model.

3. Results

The district covers 3.72 thousand km² (9.2 % of the region's total area) and, as of January 1, 2024, had a population of 186.5 thousand people, of which 43.2 thousand (23.2 %) were urban and 143.3 thousand rural - a level of urbanization typical of the province's predominantly agrarian districts. In Shofirkon District, where the majority of the population is rural, the settlement network is correspondingly dominated by rural forms of habitation. As of 2024, the district comprises 1 city, 8 towns, and 144 rural settlements, most of which are of considerable antiquity and differ markedly from one another in size, architectural landscape, ethnic composition, ecological condition, and tourism potential – a diversity that nonetheless follows the general character of a desert-zone settlement pattern.

As Figure 2 shows, the city of Shofirkon - the district's only city and administrative center - has grown steadily since receiving city status in 1995, its population increasing from 11.6 thousand to 15.3 thousand, or by 31.9 %, over the following three decades. Growth was most rapid in the earliest period (6.9 % between 1995 and 2000) and has since proceeded at a more moderate pace (12.9 % between 2000 and 2016; 9.3 % between 2016 and 2024), suggesting a gradual maturation of the city's demographic base rather than continued rapid expansion.

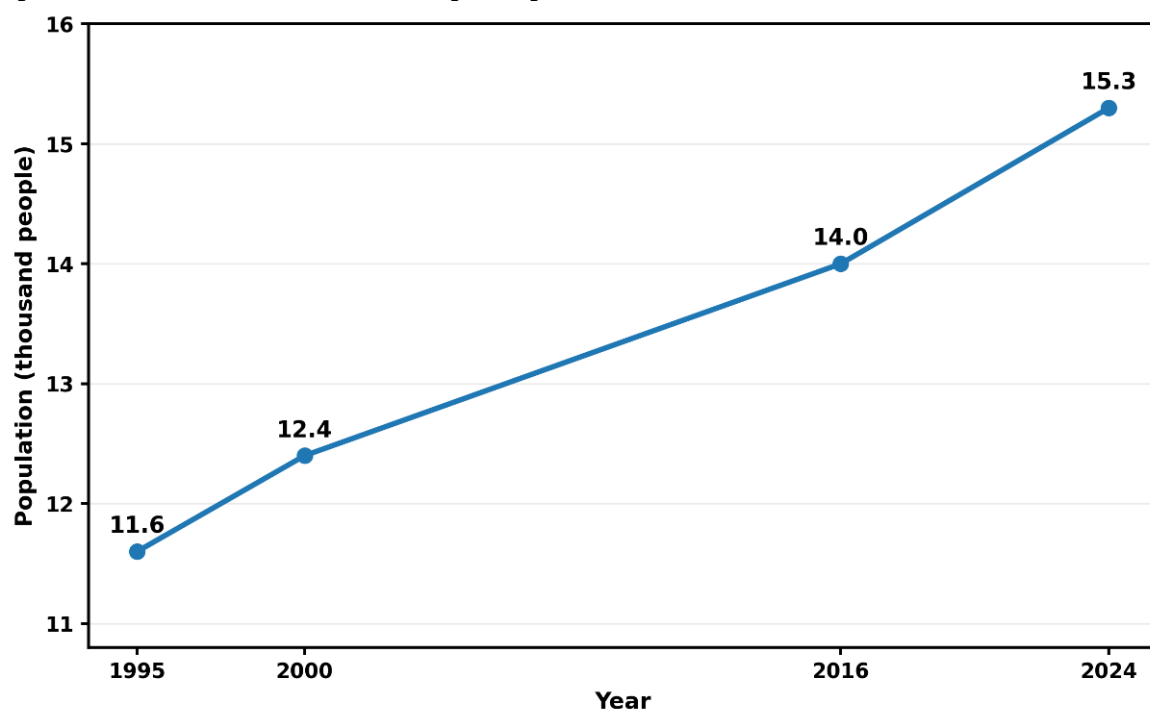


Figure 2. City population dynamics, Shofirkon District, 1995–2024 (thousand people)

To quantitatively assess whether population growth is associated with proximity to the district center, the population dynamics of the eight urban settlements were compared with their distances from Shofirkon (Table 1)

Table 1. Distance from Shofirkon and population growth in urban settlements, 2013–2024

Urban settlement	Distance from Shofirkon, km	Population, 2013, thousand	Population, 2024, thousand	Population growth, 2013–2024, %
Juyrabat	7.0	3.5	4.4	25.7
Iskogare	11.1	4.3	4.9	14.0
Quyi Chuqurak	11.9	2.5	2.7	8.0
Mirzoqul	4.0	2.4	2.6	8.3
Talisafed	9.0	3.8	4.4	15.8
Undare	5.1	2.5	2.8	12.0
Chandir	9.4	2.8	3.4	21.4
Gulomte	8.7	2.2	2.6	18.2

Note: compiled by the authors based on data from the Bukhara Regional statistical department and GIS-based distance calculations

Spearman’s rank correlation analysis was used to assess the relationship between distance from the district center and population growth across the eight urban settlements during 2013–2024. The analysis indicated no statistically significant association between the two variables (Spearman’s $\rho = -0.071$, $p = 0.867$, $n = 8$). Thus, within this small sample, population growth does not appear to vary systematically with distance from the district center.

All eight settlements were granted town status in 2009 under the state program “Rural Development and Prosperity”, when 966 rural settlements nationwide, including 67 in Bukhara Region and 8 in Shofirkon District, were reclassified as towns. As Figure 3 indicates, these towns have grown unevenly over the following fifteen years: their combined population rose from 24.0 thousand in 2013 to 27.8 thousand in 2024, an aggregate increase of 15.8 %, but individual growth rates ranged from 8.0 % (Quyi Chuqurak) to 25.7 % (Juyrabat).

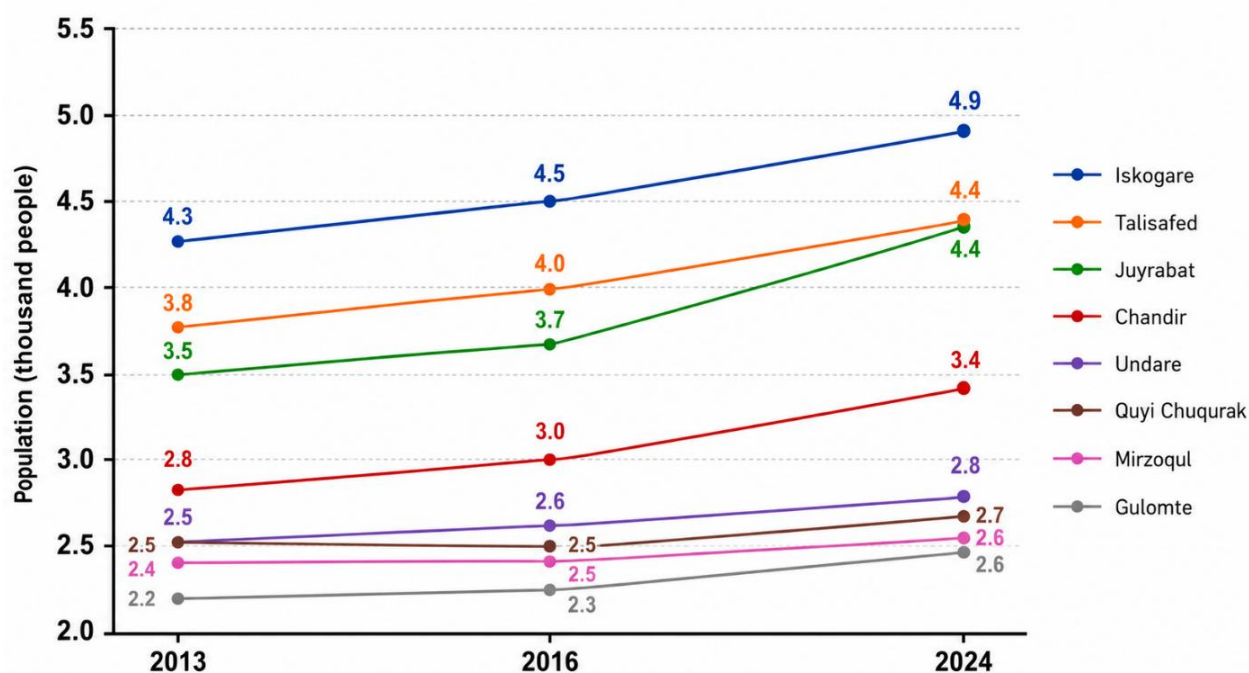


Figure 3. Population Dynamics of Urban Settlements in Shofirkon District, 2013–2024

Juyrabat, Chandir, and Gulomte grew fastest (25.7 %, 21.4 %, and 18.2 %, respectively), while Quyi Chuqurak and Mirzoqul grew slowest (8.0 % and 8.3 %, respectively). Consistent with the Spearman rank correlation analysis presented in Table 1, these differences in population growth show no statistically significant association with distance from the district center (Spearman's $\rho = -0.071$, $p = 0.867$, $n = 8$). This suggests that other factors, including differences in economic specialization and natural-resource conditions, may contribute to the observed variation. Combined, the town population of 27.8 thousand accounts for 64.4 % of the district's total urban population of 43.2 thousand, with the remaining share concentrated in Shofirkon city itself.

Because comparable population data for all eight towns were unavailable, the infrastructure indicators are interpreted descriptively and are not used to rank the towns by per-capita infrastructure provision.

As Figure 4 illustrates, Shofirkon city occupies a geographically favorable central position relative to the surrounding settlements, being comparatively close to all eight towns.

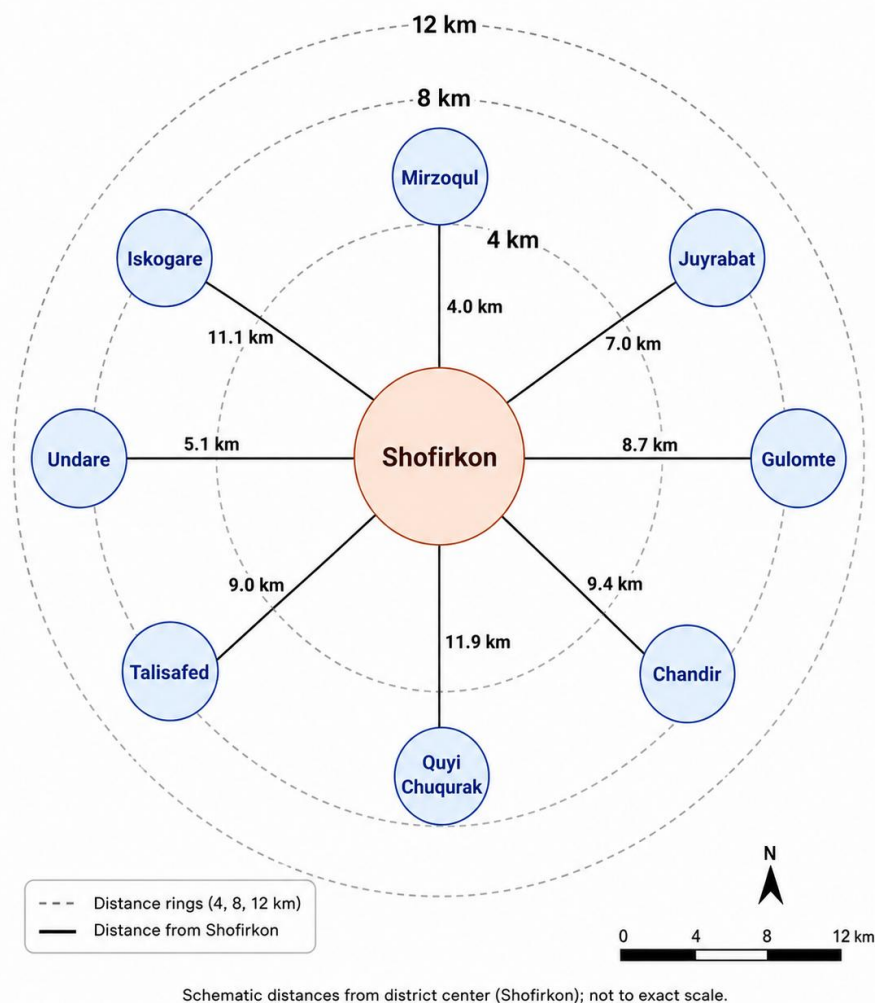


Figure 4. Distance of Urban Settlements from Shofirkon District Center

Mirzoqul is the nearest town to the center, at 4.0 km, followed by Undare (5.1 km) and Juyrabat (7.0 km); Quyi Chuqurak (11.9 km) and Iskogare (11.1 km) are the most peripheral, located roughly three times farther from the center than Mirzoqul. This favorable central position of the district capital, combined with the relatively short average distances to the surrounding towns, is one of the structural advantages of Shofirkon's settlement network compared with more dispersed districts of the region.

The data presented in Table 2 show that, despite formally holding town status since 2009, the infrastructure profile of these settlements remains close to that of ordinary villages, which is why they continue to be referred to locally as “agro-towns.”

Basic social infrastructure (one school and one hospital per town) is uniformly present, reflecting the standardized planning norms applied when the settlements were reclassified, but commercial and utility infrastructure is markedly uneven: Mirzoqul stands out with the highest number of small businesses (3) and service outlets (7), consistent with its central location, while Juyrabat and Undare have no functioning markets. Gas supply is available in five of the eight towns but absent in Chandir, Juyrabat, and Gulomte, indicating an unresolved gap in utility coverage. A comparison of population growth rates and infrastructure indicators shows that Chandir and Juyrabat, despite lacking gas supply, recorded the highest population growth rates (21.4 % and 25.7 %, respectively). This suggests that population growth in these towns has so far outpaced infrastructure development. Overall, only Chandir, Talisafed, and Mirzoqul show the beginnings of genuine urban-forming (non-agricultural) economic networks; the remaining five towns require targeted

development of industry, transport, and public services before they can be considered to meet formal urban-planning criteria.

Table 2. Infrastructure indicators of the eight towns of Shofirkon District (2024)

Indicator	Isko gare	Talis afed	Ju yra bat	Cha ndir	Und are	Quyi Chuqur ak	Mir zoqu l	Gulo mte
Distance from district center, km	11.1	9.0	7.0	9.4	5.1	11.9	4.0	8.7
Small businesses	1	2	1	2	1	1	3	1
Sales/service outlets	5	6	4	6	5	4	7	4
Schools	1	1	1	1	1	1	1	1
Hospitals	1	1	1	1	1	1	1	1
Pharmacies	2	2	1	2	1	1	1	1
Markets	1	1	0	1	0	1	0	0
Transport link to district/regional center	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
Gas supply	+	+	—	—	+	+	+	—
Water supply	+	+	+	+	+	+	+	+

Note: "+" - available; "—" - not available; "+/-" - partial or seasonal availability. All eight towns share the same intermediate (partial/seasonal) transport-link status to the district and regional centers. Compiled by the authors based on data from the Bukhara Regional Statistical Department

As shown in Table 3, small rural settlements dominate numerically (86 settlements, 60.0 % of the total).

This pattern is associated with the district's geographical position: much of its territory lies within the Kyzylkum Desert, where natural conditions and water resources are limited, and the population is thinly and unevenly distributed. Settlements of this category are mainly specialized in livestock husbandry.

Medium-sized settlements, although fewer in number (56, or 38.6 % of the total), account for the largest share of the rural population - 87.8 thousand people, or 61.3 % of the district's rural population. They are typically located in the fertile, well-irrigated center of the oasis, where population density is considerably higher than in the peripheral desert zones.

Only two rural settlements - Mahalakozi and Savrak - exceed 3,000 inhabitants. Across Bukhara Region, only five rural settlements reach this size, of which two are located in Olot District and one in Qorako'l District. This indicates that large rural settlements are relatively uncommon both at the regional scale and within Shofirkon District.

Table 3. Classification of rural settlements in Shofirkon District by population size (2024)

Category	Number of settlements	Share, %	Total population, thousand people
Small (up to 1,000 people)	86	60.0	49.3
Medium (1,000–3,000 people)	56	38.6	87.8
Large (3,000 people and above)	2	1.4	6.2
Total	144	100.0	143.3

Note: compiled by the authors based on data from the Bukhara Regional statistical department. The total population of the “Large” settlement category was calculated as the combined 2024 population of Mahallaqozi (3,157) and Savrak (3,079), totaling 6,236 people (6.2 thousand).

Roughly 90 % of the district's human settlements are concentrated in its southern part, while the extremely arid, typically desert landscape of the central and northern parts leaves settlements there sparse and widely scattered. Accordingly, the rural settlement network can be divided into four geographically conditioned zones: (1) settlements in the center of the oasis (Revgar, Naqqosh, Savrak), corresponding to the district's medium and large settlements; (2) settlements bordering neighboring districts (Madaniyat, Mavri, Yuqori Chitgaron); (3) settlements in the buffer zone between oasis and desert (Jilvon, Quyi Jilvon, Tezguzar); and (4) settlements located within the desert proper (Churuk, Yangibog'), corresponding largely to the small, livestock-oriented settlements that make up 60 % of the district's rural settlement stock.

The district currently faces a number of interlinked geoecological problems, most notably a growing shortage of running water, an increase in dust days, declining groundwater levels, and rising salinity of agricultural land. These pressures appear to be associated with rapid population growth and constraints in the management and use of transboundary water resources. Because the district lies in the sharply continental part of the temperate zone, water demand peaks during the summer “chilla” period, when channel water availability is at its lowest, placing particular pressure on medium-sized, agriculturally dependent oasis settlements that accommodate a large share of the district’s rural population. Under these conditions, household-scale “small reservoirs” for collecting precipitation from hard (slate) roof surfaces may provide a practical, low-cost supplementary measure for reducing seasonal water shortages. Given an average roof catchment area of 60 m² and average regional annual precipitation of 120–140 mm, the gross rainwater-harvesting potential is estimated at approximately 7,800 liters per household annually, before accounting for runoff and storage losses.

4. Discussion

The settlement pattern identified in Shofirkon District is consistent with, yet also refines, the broader regional picture established in earlier studies of Bukhara Region. Tojiyeva et al. (2021) found that Bukhara Region as a whole is characterized by a large number of predominantly small and medium-sized rural settlements, with roughly 70 % of villages in the region having fewer than 500 inhabitants. The present study confirms this pattern at the district level and adds a spatial explanation that a region-wide statistical analysis cannot provide: the predominance of small settlements in Shofirkon is not randomly distributed but concentrated specifically in the desert and buffer zones, while medium-sized settlements cluster in the oasis center. This suggests that the settlement-size distributions reported at the regional scale are, at least in Shofirkon's case, the aggregate outcome of a sharp intra-district ecological gradient rather than a uniform regional tendency - a distinction that

is only visible when the analysis is disaggregated below the regional level, which is precisely the gap identified in the Literature Analysis.

The finding that the district's eight towns remain functionally and morphologically close to villages fifteen years after acquiring town status corroborates the broader critique advanced by Saliev and Nazarov (2009) that most of Uzbekistan's post-2009 "new towns" do not meet formal urban-planning criteria and are better understood as agro-towns. What the present study contributes beyond this general observation is evidence that infrastructure deficits are unevenly distributed even within a single, small district: gas supply, market access, and business density vary considerably among the eight towns despite their shared founding date and shared administrative status, and this variation does not track distance from the district center in any simple way. This indicates that proximity to the administrative center alone is an insufficient predictor of a town's development trajectory, and that other factors - most plausibly each settlement's original economic specialization and its access to irrigation water - play a comparatively larger role.

The coexistence of comparatively rapid population growth in towns that lack gas supply (Chandir, Juyrabat) is a pattern that merits particular attention. Read alongside Khamroev's (2024) finding that Bukhara Region's urbanization level (36.7 %) remains below the national average, this suggests that population is accumulating in these settlements faster than the formal infrastructure needed to support genuinely urban living conditions, reproducing at a micro-scale the same lag between numerical urbanization and functional urbanization that Khamroev documents for the region's cities generally. If this pattern continues, the risk is not merely that these towns remain agro-towns in name, but that population pressure without matching infrastructure investment could intensify the very geoeological problems - groundwater depletion, salinization, water scarcity - that the district is already experiencing.

The geoeological problems identified here should be read as a district-scale manifestation of pressures that are already documented at the national and regional level. Mavlonov's (2010) earlier study of settlement formation in desert conditions across Bukhara Region as a whole identified natural constraints (water availability, soil salinity, desert encroachment) as fundamental determinants of settlement viability; the present findings suggest that, more than a decade later, these same constraints continue to shape not only where settlements can form but which settlements are able to develop beyond agro-town status. This continuity indicates that administrative reclassification (granting town status) has not, by itself, been sufficient to overcome the underlying ecological constraints on development - a conclusion with direct relevance for how future settlement-status decisions in similarly arid districts of Uzbekistan should be evaluated.

The proposed household rainwater-harvesting measure should be understood as a targeted, small-scale response rather than a substitute for addressing the district's structural water problems, which stem primarily from the shared, cross-border management of the Zarafshan River's flow (Abdullaev & Rakhmatullaev, 2004) rather than from a lack of local storage capacity. Its practical value lies in bridging the seasonal gap between peak "chilla"-period demand and minimum channel flow, and it is most directly applicable to the oasis-center and buffer-zone settlements identified in this study, rather than to the desert-zone settlements, where roof catchment area and household density are both lower.

Several limitations of the present analysis should be acknowledged. The reliance on district-level administrative statistics means that infrastructure indicators are reported as simple counts rather than population-normalized measures, which limits direct comparability between towns of different sizes. The rainwater-harvesting estimate is a first-order approximation based on average roof area and average precipitation, and does not account for inter-annual precipitation variability or actual household storage capacity. Finally, because this is, to the authors' knowledge, one of the first studies to examine settlement formation and development at the level of an individual administrative district of Bukhara Region, the findings cannot yet be directly compared with equivalent district-level data from neighboring territories. Establishing whether the patterns identified here are specific to

Shofirkon or characteristic of desert-oasis districts more broadly will require comparable studies of other districts, such as Peshku, Qorako'l, and Olot.

5. Conclusion

This study has examined the geographical features, current problems, and development prospects of human settlements in Shofirkon District of Bukhara Region - one of the first analyses, to the authors' knowledge, conducted at the level of an individual administrative district of the region. The findings show that the district's settlement network is overwhelmingly rural, structured around a single administrative city (Shofirkon) and eight recently formed towns that, despite fifteen years under town status, continue to function largely as agro-towns rather than as settlements meeting formal urban-planning criteria. This gap between administrative classification and functional urban development is not uniform: it varies across the eight towns in ways only partly explained by their distance from the district center, suggesting that differences in economic specialization and access to irrigation water may also contribute to the observed variation.

The district's rural settlement pattern is directly shaped by its physical geography. The predominance of small, dispersed settlements in the desert and buffer zones, contrasted with denser, larger settlements in the fertile oasis center, suggests that natural conditions, particularly water availability, play an important role in shaping where and how settlements form and grow in this part of Bukhara Region. The geoecological problems identified - declining groundwater levels, rising soil salinity, increasing dust days, and a widening seasonal water deficit - are consequences of this same natural constraint interacting with sustained population growth, and they place the greatest pressure precisely on the medium-sized oasis settlements that house the majority of the district's rural population.

On this basis, the following conclusions and recommendations are proposed for improving the development prospects of human settlements in Shofirkon District and mitigating its existing geoecological problems:

- Household-scale "small reservoirs" for collecting seasonal precipitation from roof surfaces should be introduced as a priority measure in oasis-center and buffer-zone settlements, where they can meaningfully offset the summer "chilla"-period water deficit at low cost;
- The feasibility of regulating residential density and developing multi-storey housing in the district center and selected agro-towns should be further assessed as potential land- and water-saving planning measures;
- Settlements adjacent to the desert zone should be protected through natural windbreaks and afforestation measures to slow desertification and reduce dust generation;
- Because the district's town network was formed rapidly and simultaneously in 2009, its urban composition remains fragmented and includes a number of economically vulnerable municipalities; continued monitoring of their functional development is warranted, particularly in Mirzoqul, Chandir, and Iskogare;
- Since the urban network of Shofirkon District remains underdeveloped relative to formal urban-planning norms, priority should be given to strengthening the functional composition of its towns — expanding small industrial enterprises, improving public services, and closing the remaining gaps in gas-supply coverage identified in this study.

Taken together, these findings indicate that further improvement of settlement conditions in Shofirkon District depends less on additional reclassification of villages as towns than on targeted infrastructure investment calibrated to each settlement's ecological zone and economic base. Future research should extend this district-level approach to neighboring desert-oasis districts of Bukhara Region - such as Peshku, Qorako'l, and Olot — to establish whether the patterns identified here are specific to Shofirkon or characteristic of the region's arid districts more broadly.

6. Supplementary Materials: No supplementary material.

7. Author Contributions

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

8. Author Information

Usmonov, Ahrorbek – PhD, Department of Geography, Bukhara State Pedagogical Institute, Piridasgir Avenue 2, Bukhara, Uzbekistan, 200100; ahroru85@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5680-5806>

Suvonova, Sabina – Department of Geography, Bukhara State Pedagogical Institute, Piridasgir Avenue 2, Bukhara, Uzbekistan, 200100; sabina_suvonova04@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1763-1249>

9. Funding: No funding was provided for this research.

10. Acknowledgements: None.

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

12. References

1. Abdullaev, I., & Rakhmatullaev, S. (2004). The analysis of water management in Bukhara oasis of Uzbekistan: historical and territorial trends. *Water International*, 29(1), 20–26. <https://doi.org/10.1080/02508060408691744>
2. Adams, J. J. (2022). Urbanization, long-run growth, and the demographic transition. *Journal of Demographic Economics*, 88(1), 31–77. <https://doi.org/10.1017/dem.2020.36>
3. Bell, D., & Jayne, M. (2009). Small cities? Towards a research agenda. *International Journal of Urban and Regional Research*, 33(3), 683–699. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.2009.00886.x>
4. Bukhara Regional Department of Statistics. (2024). *Newly established enterprises and organizations by administrative territory*. National Statistics Committee of the Republic of Uzbekistan. <https://www.buxstat.uz/uz/>
5. Bukhara Regional Department of Statistics. (2024, June 7). *Agriculture, forestry and fisheries production in the Bukhara Region*. National Statistics Committee of the Republic of Uzbekistan. <https://buxstat.uz/uz/matbuot-markazi/buxoro-yangiliklar/10828-2024-yil-yanvar-mart-oylarida-buxoro-viloyatida-qishloq-o-rmon-va-baliqchilik-xo-jaligi-mahsulot-xizmat-larining-hajmi-4-173-7mlrd-so-mni-tashkil-qildi>
6. Bukhara Regional Department of Statistics. (2024, October 30). *Permanent population of the Bukhara Region by administrative territory*. National Statistics Committee of the Republic of Uzbekistan. <https://www.buxstat.uz/uz/matbuot-markazi/buxoro-yangiliklar/11827-buxoro-viloyatida-doimiy-aholisi-eng-ko-p-bo-lgan-hududlar>
7. Bukhara Regional Department of Statistics. (2024, November 12). *Industrial production in Shofirkon District*. National Statistics Committee of the Republic of Uzbekistan. <https://www.buxstat.uz/uz/matbuot-markazi/buxoro-yangiliklar/11919-shofirkon-tumaning-sanoat-mahsulotlari-ishlab-chiqarish-hajmi>
8. Bukhara Regional Department of Statistics. (2024, November 29). *Population density in the Bukhara Region*. National Statistics Committee of the Republic of Uzbekistan. <https://buxstat.uz/uz/matbuot-markazi/buxoro-yangiliklar/12057-buxoro-viloyati-bo-yicha-aholi-zichligi-2>

9. Conrad, C., Rudloff, M., Abdullaev, I., Thiel, M., Löw, F., & Lamers, J. P. A. (2015). Measuring rural settlement expansion in Uzbekistan using remote sensing to support spatial planning. *Applied Geography*, 62, 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.03.017>
10. Di Clemente, R., Strano, E., & Batty, M. (2021). Urbanization and economic complexity. *Scientific Reports*, 11, 3952. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83238-5>
11. Follmann, A. (2022). Geographies of peri-urbanization in the global south. *Geography Compass*, 16(7), e12650. <https://doi.org/10.1111/gec3.12650>
12. Junussova, M., Maulsharif, M., & Soltybayeva, S. (2022). Developing sustainable infrastructure in Central Asian cities. *Central Asian Economic Review*, 5, 53–67. <https://doi.org/10.52821/2789-4401-2022-5-53-67>
13. Khamroev, M.O. (2024). Urbanization process and urboecological state of cities in Uzbekistan. *Central Asian Journal of the Geographical Researches*, (3-4), 58–63. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14721339>
14. Kurbanov, S. (2014). The development of urban settlement and problems of urbanization in the basic administrative districts of Uzbekistan. *Bulletin of the Association of Russian Human Geographers*, 3, 101–109. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22027389_16642281.pdf
15. Kurbanov, S., & Oteuliev, M. (2021). Territorial differences in living standards in Uzbekistan. *Quaestiones Geographicae*, 40(4), 63–70. <https://doi.org/10.2478/quageo-2021-0038>
16. Liu, R., Dong, X., Wang, X.-C., Zhang, P., Liu, M., & Zhang, Y. (2021). Study on the relationship among the urbanization process, ecosystem services and human well-being in an arid region in the context of carbon flow: taking the Manas River Basin as an example. *Ecological Indicators*, 132, 108248. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108248>
17. Ma, H., & Sun, Z. (2020). Comprehensive urbanization level and its dynamic factors for five Central Asian countries. *Journal of Geographical Sciences*, 30(11), 1761–1780. <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1811-y>
18. Mavlonov, A. M. (2010). Problems of the formation and development of cities under desert conditions (the case of Bukhara Region) [Extended abstract of Candidate of Sciences (Geography) dissertation]. Tashkent.
19. Nickayin, S. S., Nosova, B., Turco, R., Giacalone, M., & Salvati, L. (2022). Demographic change and the urban–rural divide: understanding the role of density and agglomeration in fertility transitions. *Land*, 11(11), 1988. <https://doi.org/10.3390/land11111988>
20. Polinesi, G., Recchioni, M. C., Turco, R., Salvati, L., Rontos, K., Rodrigo-Comino, J., & Benassi, F. (2020). Population trends and urbanization: simulating density effects using a local regression approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 454. <https://doi.org/10.3390/ijgi9070454>
21. Roberts, B. (2016). Rural urbanization and the development of small and intermediate towns. *Regional Development Dialogue*, 35, 1–23.
22. Saliev, A., & Fedorko, V. (2012). Population distribution and elements of urbanization in the territorial system of natural-economic complexes of the Republic of Uzbekistan. *Bulletin of the Sholom-Aleichem Amur State University*, 2, 44–51.
23. Saliev, A., & Nazarov, M. (2009). *Villages of Uzbekistan* (Geography of rural areas). Tashkent: Fan va Texnologiya. 212 p.
24. Sergeyeva, A., Dan'shin, A., Akbar, I., Usmonov, A., & Ergashev, A. (2025). Urbanization and spatial transformation of cities in the Bukhara Region in Uzbekistan. *Chinese Journal of Urban and Environmental Studies*, 13(3), 2550017. <https://doi.org/10.1142/S2345748125500174>
25. Tojiyeva, Z., & Ibragimov, L. (2021). Labour market and employment in Uzbekistan. *Geografický časopis*, 73(4), 359–374. <https://doi.org/10.31577/geogrcas.2021.73.4.19>
26. Turemuratov, O., Byulegenova, B., Pogodin, S., Onuchko, M., & Nurtazina, R. (2024). Urbanization trends in Central Asian countries: aspects of extensive and intensive

- agglomeration growth. *Public Organization Review*, 24(3), 963–986. <https://doi.org/10.1007/s11115-024-00766-0>
27. Veckalne, R., & Tambovceva, T. (2023). Evaluating urban sustainability in Uzbekistan: a novel formula for empirical analysis. *Sustainability*, 15(9), 7035. <https://doi.org/10.3390/su15097035>
28. Zhang, X., Xu, W., Xiang, X., Zhang, Z., & Cui, M. (2020). Mechanism of interaction between urbanization and resource environment in Central Asia. *Journal of Geographical Sciences*, 30(11), 1723–1738. <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1809-5>

Бұхара облысы Шофиркон ауданындағы елді мекендер: географиялық ерекшеліктері, мәселелері және даму келешегі

Ахрорбек Усмонов, Сабина Сувонова

Аңдатпа: Зерттеуде Өзбекстанның Бұхара облысы Шофиркон ауданындағы елді мекендердің географиялық ерекшеліктері, қазіргі проблемалары мен даму келешегі қарастырылады. Жұмыс – жеке әкімшілік аудан деңгейінде жүргізілген алғашқы зерттеулердің бірі. Бұхара облыстық статистика басқармасының ресми статистикалық деректеріне, ГАЖ негізіндегі картографиялық талдауға, салыстырмалы-географиялық және статистикалық-талдамалық әдістерге сүйене отырып, зерттеуде аумағы 3,72 мың км² болатын аудандағы бір әкімшілік қала, 8 кент және 144 ауылдық елді мекеннен тұратын қоныстану жүйесіне сипаттама берілді. Шофиркон қаласының халқы 1995–2024 жылдар аралығында 31,9 %-ға өсті, ал 2009 жылы «Ауылды дамыту және көркейту» мемлекеттік бағдарламасы аясында құрылған ауданның 8 кентінде халық саны әркелкі, яғни 8,0 %-дан 25,7 %-ға дейін өскен. Құрылған уақыты бірдей болғанына қарамастан, олардың инфрақұрылымдық қамтамасыз етілу деңгейі айтарлықтай әркелкі және функционалдық тұрғыдан олар «агроқалашықтар» деп аталатын қарапайым ауылдарға жақын болып калуда. Ауылдық елді мекендер саны бойынша негізінен шөл және буферлік аймақтарда шоғырланған шағын әрі шашыраңқы қоныстар басым (жалпы санының 60,0 %-ы), ал саны аз болғанымен, орташа көлемдегі елді мекендер құнарлы оазистік орталықтағы ауыл халқының 61,3 %-ын қамтиды. Бұл кеңістіктік заңдылық сумен қамтамасыз етілуге байланысты ауданішілік айқын экологиялық градиентті көрсетеді. Ауданда жер асты сулары деңгейінің төмендеуі, топырақтың тұздануының күшеюі, шаңды күндер санының артуы және халық санының өсуі мен трансшекаралық өзен суларын басқарудағы шектеулерге байланысты маусымдық су тапшылығының ұлғаюы сияқты геоэкологиялық проблемалар күшейіп келеді. Үй шаруашылығы деңгейінде жаңбыр суын жинау шарасы ұсынылып, оның жылдық әлеуеті бір үй шаруашылығына шамамен 7 800 литр деп бағаланды. Бұл оазистік және буферлік аймақтардағы елді мекендерде жазғы кезеңдегі суға ең жоғары сұранысты төмендетудің іске асыруға болатын әрі шығыны аз тәсіл. Зерттеу нәтижелері ауылдарды кенттер санатына әкімшілік тұрғыдан қайта жіктеу дамудың негізгі экологиялық шектеулерін жоя алмағанын көрсетті. Сондықтан одан әрі даму елді мекендердің мәртебесін қайта өзгертуден гөрі, әрбір елді мекеннің экологиялық аймағы мен экономикалық базасына бейімделген инфрақұрылымдық инвестицияларды қажет етеді. Зерттеу Орталық Азияның қуаң, оазистерге тәуелді аумақтарындағы елді мекендердің дамуын аудан деңгейінде талдауға арналған басқа аумақтарда да қолдануға болатын әдістемелік негіз ұсынады.

Түйін сөздер: елді мекендер; Шофиркон ауданы; Бұхара облысы; ауылдық елді мекендер; геоэкологиялық мәселелер; су тапшылығы; агроқалашықтар; Өзбекстан.

Населённые пункты Шофирконского района Бухарской области: географические особенности, проблемы и перспективы развития

Ахрорбек Усмонов, Сабина Сувонова

Аннотация: В исследовании рассматриваются географические особенности, современные проблемы и перспективы развития населённых пунктов Шофирконского района Бухарской области Узбекистана. Работа представляет собой одно из первых исследований, проведённых на уровне отдельного административного района. На основе официальных статистических данных Бухарского областного управления статистики, картографического анализа с использованием ГИС, сравнительно-географического и статистико-аналитического методов охарактеризована система расселения района площадью 3,72 тыс. км², включающая один административный город, 8 посёлков и 144 сельских населённых пункта. Численность населения города Шофиркон в период с 1995 по 2024 г. увеличилась на 31,9 %, тогда как в 8 посёлках района, образованных в 2009 г. в рамках государственной программы «Развитие и благоустройство села», рост населения был неравномерным и составил от 8,0 до 25,7 %. Несмотря на одинаковое время их образования, уровень инфраструктурной обеспеченности существенно различается, а в функциональном отношении они остаются близкими к обычным сельским населённым пунктам, которые часто характеризуются как «агрогородки». В структуре сельского расселения по числу населённых пунктов преобладают небольшие и рассредоточенные поселения (60,0 % от общего количества), сосредоточенные преимущественно в пустынной и буферной зонах. В то же время средние по размеру населённые пункты, несмотря на их меньшее количество, концентрируют 61,3 % сельского населения в плодородной оазисной зоне. В районе усиливаются геоэкологические проблемы, включая снижение уровня грунтовых вод, увеличение засоления почв, рост числа пыльных дней и усиление сезонного дефицита воды, обусловленные ростом населения и ограничениями трансграничного управления речными водами. Предложена мера по сбору дождевой воды на уровне домохозяйств, годовой потенциал которой оценивается примерно в 7 800 литров на одно домохозяйство. Результаты исследования показывают, что административная переклассификация сельских населённых пунктов в посёлки сама по себе не устранила основные экологические ограничения их развития. Исследование предлагает методическую основу, которая может быть использована для анализа развития населённых пунктов на районном уровне в других аридных, зависимых от оазисов территориях Центральной Азии.

Ключевые слова: населённые пункты; Шофирконский район; Бухарская область; сельские населённые пункты; геоэкологические проблемы; дефицит воды; агрогородки; Узбекистан.

Редакторлар: С.С. Досмагамбетова, А.М. Сергеева

Авторларға арналған нұсқаулықтар,
жарияланым этикасы журнал сайтында енгізілген: <http://bulchmed.enu.kz>

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы.

Химия. География сериясы.

– 3 (156)/2026 – Астана: ЕҰУ. 220 б.

Шартты б.т. – 20.43. Таралымы – сұраныс бойынша.

Басуға қол қойылды: 30.09.2026

Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://bulchmed.enu.kz>

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті Тел.: +7(71-72) 70-95-00(ішкі 33-207)

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің баспасында басылды