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

№ 2(155)/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): Копишев Э.Е.
х.ғ.к., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Бас редактор (география):	**Рамазанова Н.Е.** *PhD, проф. м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*
Жауапты хатшы (химия):	**Уали А.С.** *х.ғ.к., қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*
Жауапты хатшы (география):	**Самарханов К.Б.** *г.ғ.к., PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*

Редакция алқасы:
Химия

Адекенов С.М.	х.ғ.д., проф., ҚР ҰҒА академигі, Фитохимия халықаралық ғылыми-өндірістік холдингі, Қарағанды, Қазақстан
Айбульдинов Е.К.	PhD, Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Байкенов М.И.	х.ғ.д., проф., Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қарағанды, Қазақстан
Бакибаев А.А.	х.ғ.д., проф., Томск Политехникалық Университеті, Томск, Ресей
Еркасов Р.Ш.	х.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Иргибаева И.С.	х.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Искакова Ж.Б.	х.ғ.к., қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Кирюхин М.В.	х.ғ.к., қауымдас. проф., Accelerated Materials Pte Ltd, Сингапур
Корольков И.В.	PhD, қауымдас. проф., Ядролық физика институты, Астана, Қазақстан
Маскевич А.А.	ф.-м.ғ.д., проф., Я. Купала мемлекеттік университеті, Гродно, Беларусь
Мустафин Р.И.	PhD, қауымдас. проф., Қазан Мемлекеттік Медициналық Университеті, Қазан, Ресей
Сафаров Р.З.	х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Султанова Н.А.	х.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Филиппов С.К.	PhD, проф., Або Академия университеті, Турку, Финляндия
Хуторянский В.В.	PhD, проф., Рединг Университеті, Рединг, Ұлыбритания
Шатрук М.	PhD, проф., Флорида Мемлекеттік Университеті, Талахасси, АҚШ

География

Атасой Е.	PhD, проф., Бурса-Улудаг Университеті, Бурса, Турция

Ахмеденов К.М.	проф., М. Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан мемлекеттік университеті, Орал, Қазақстан
Дунец А.Н.	г.ғ.д., проф., Алтай мемлекеттік университеті, Барнаул, Ресей
Dobrica M.P.	PhD, аға ғылыми қызметкер, Jovan Cvijic атындағы география институты, Сербия ғылым және өнер академиясы, Белград, Сербия
Егинбаева А.Е.	PhD, қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Мукаев Ж.Т.	қаум. проф., Шәкәрім атындағы Семей мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан
Мусабаева М.Н.	г.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Озгелдинова Ж.О.	PhD, проф. м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Pešić A.M.	PhD, аға ғылыми қызметкер, Jovan Cvijic атындағы география институты, Сербия ғылым және өнер академиясы, Белград, Сербия
Реджеп Э.	проф., Балікесір университеті, Балікесір, Түркия
Schultz R.C.	проф., Айова штаты университеті, Айова, АҚШ
Саипов А.А.	п.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Токсанбаева С.Т.	PhD, доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Редакцияның мекен-жайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2,
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 402 б.
Тел.: +7 (7172) 709-500, (ішкі 33-207). **E-mail:** vest_chem@enu.kz
Техникалық хатшылар: Алагуджаева Манира Амангельдиевна, Белгібаева Дана Сапарғалиқызы

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

© Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Editorial board: Editor-in-Chief (Chemistry): Kopishev E.E.
Cand.Chem.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editor-in-Chief (Geography):	**Ramazanova N.E.** *PhD, Act. Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*
Executive Secretary (Chemistry):	**Uali A.S.** *Cand.Chem.Sci., Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*
Executive Secretary (Geography):	**Samarkhanov K.B.** *Cand.Geogr.Sci., PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

Editorial board
Chemistry

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

Geography

Atasoy E.	PhD, Prof., Bursa Uludağ University, Bursa, Türkiye
Akhmedenov K.M.	Prof., M. Utemisov West Kazakhstan State University, Oral, Kazakhstan
Dunetc A.N.	Dr.Geogr.Sci., Prof., Altai State University, Barnaul, Russia

Dobrica M.P.	PhD, Senior Research Associate, Jovan Cvijic Institute of geography, Serbian Academy of Sciences and arts, Belgrade, Serbia
Eginbaeva A.E.	PhD, Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Mukaev Zh.T.	Assoc.Prof., Shakarim Semipalatinsk State University, Semey, Kazakhstan
Musabaeva M.N.	Dr.Geogr.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Ozgeldinova Zh.O.	PhD, Act.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Pešić A.M.	PhD, Senior Research Associate, Jovan Cvijic Institute of geography, Serbian Academy of Sciences and arts, Belgrade, Serbia
Redzhep E.	Prof., Balikesir University, Balikesir, Turkey
Schultz R.C.	Prof., University of Iowa, Iowa, USA
Saipov A.A.	Dr.Ped.Sci., Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Toksanbaeva C.T.	PhD, Act.Assoc.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

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

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

© L.N. Gumilyov Eurasian National University

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

Главный редактор (география):	**Рамазанова Н.Е.** *PhD, и.о. 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):	**Самарханов К.Б.** *к.г.н., PhD, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

Редакционная коллегия:
Химия

Адекенов С.М.	д.х.н., проф., академик НАН РК, Международный научно-производственный холдинг Фитохимия, Караганда, Казахстан
Айбульдинов Е.К.	PhD, НИИ новых химических технологий, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Байкенов М.И.	д.х.н., проф., Карагандинский национальный исследовательский университет им. Е.А.Букетова, Караганда, Казахстан
Бакибаев А.А.	д.х.н., проф., Томский политехнический университет, Томск, Россия
Еркасов Р.Ш.	д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Иргибаева И.С.	д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Искакова Ж.Б.	к.х.н., ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Кирюхин М.В.	к.х.н., ассоц.проф., Accelerated Materials Pte Ltd, Сингапур
Корольков И.В.	PhD, ассоц.проф., Институт ядерной физики, Астана, Казахстан
Маскевич А.А.	д.ф.-м.н., профессор, Гродненский государственный университет имени Я. Купалы, Гродна, Беларусь
Мустафин Р.И.	PhD, асс. проф., Казанский государственный медицинский Университет, Казань, Россия
Сафаров Р.З.	к.х.н., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Султанова Н.А.	д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Филиппов С.К.	PhD, проф., Университет Академия Або, Турку, Финляндия
Хуторянский В.В.	PhD, проф., Университет Рединга, Рединг, Объединенное Королевство

География

Атасой Е.	PhD, проф., Университет Бурсы-Улудаг, Бурса, Турция
Ахмеденов К.М.	проф., Западно-Казахстанский государственный университет им. М. Утемисова, Уральск, Казахстан
Дунец А.Н.	д.г.н., проф., Алтайский государственный университет, Барнаул,

	Россия
Dobrica M.P.	PhD, CHC, Институт географии Jovan Cvijic, сербская академия наук и искусств, Белград, Сербия
Егинбаева А.Е.	PhD, асс. проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Мукаев Ж.Т.	ассоц.проф., Семипалатинский государственный университет имени Шакарима, Семей, Казахстан
Мусабаева М.Н.	д.г.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Озгелдинова Ж.О.	PhD, и.о. проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Pešić A.M.	PhD, CHC, Институт географии Jovan Cvijic, сербская академия наук и искусств, Белград, Сербия
Реджеп Э.	проф., Университет Баликесир, Баликесир, Турция
Schultz R.C.	проф., Университет штата Айовы, Айова, США
Саипов А.А.	д.п.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Токсанбаева С.Т.	PhD, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2,
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, каб. 402
Тел.: +7(7172) 709-500, (вн. 33-207). **E-mail:** vest_chem@enu.kz
Технические секретари: Алагуджаева Манира Амангельдиевна, Бельгибаева Дана Сапаргалиевна

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

© Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ СЕРИЯСЫ

BULLETIN OF L.N. GUMILYOV EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY. CHEMISTRY. GEOGRAPHY SERIES

ВЕСТНИК ЕВРАЗИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ Л.Н. ГУМИЛЕВА. СЕРИЯ ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ

№2(155)/2026

МАЗМҰНЫ/ CONTENT/ СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ/ CHEMISTRY

А. Асаматдинов, Ш. Муродов, О. Кудияров
Қарақалпақстан Республикасының жерасты су ресурстары: жай-күйі және перспективалары
А. Асаматдинов, Ш. Муродов, О. Кудияров
Изучение химических свойств подземных вод и почвы Республики Каракалпакстан на примере Караузяксого района
A. Asamatdinov, Sh. Murodov, O. Kudiyarov
Groundwater resourced of the Republic of Karakalpakstan: state and prospects 10

А. Елшібаева, Ж. Жұмағалиева, А. Калдыбаева, Г. Мукушева, Б. Тикар, Р. Джалмаханбетова
Achillea millefolium L. тамырларын ИҚ-спектроскопиясы, ГХ-МС және биологиялық сынақтар арқылы кешенді зерттеу
А. Елшибаева, Ж. Жумагалиева, А. Калдыбаева, Г. Мукушева, Б. Тикар, Р. Джалмаханбетова
Комплексное исследование корней Achillea millefolium L. методами ИК-спектроскопии, ГХ-МС и биологических тестов
A. Yelshibayeva, Zh. Zhumagaliyeva, A. Kaldybayeva, G. Mukusheva, B. Ticar, R. Jalmakhanbetova
Comprehensive study of Ahillea millefolium L. roots using IR spectroscopy, GC-MS, and biological tests 31

Д. Женисова, Г. Алламбергенова, Е. Байкенов, Р. Сафаров
Ағын суларды детоксикациялау үшін Фентон тәрізді жүйелерді қолдану
Д. Женисова, Г. Алламбергенова, Е. Байкенов, Р. Сафаров
Применение Фентон-подобных систем для детоксикации сточных вод
D. Zhenisova, G. Allambergenova, Ye. Baikenov, R. Safarov
Application of Fenton-like systems for wastewater detoxification 44

С. Азат, Ж. Асенгали, И. Сапаргали, Қ. Тоштай
MXene синтезіндегі заманауи жетістіктер: катализ және тұрақты энергия сақтау саласындағы қолданылуы
С. Азат, Ж. Асенгали, И. Сапаргали, К. Тоштай
Современные достижения в синтезе MXene: применение в катализе и устойчивом хранении энергии
S. Azat, Zh. Assengali, I. Sapargali, K. Toshtay
Recent progress in MXene synthesis: applications in catalysis and sustainable energy storage 68

ГЕОГРАФИЯ/ GEOGRAPHY

А. Әлимұратқызы, Г. Мұқанова, Т. Базарбаева, Б. Шимшиков, А. Ошақбай, А. Низамиев
Хромтау өнірі топырағының физика-химиялық қасиеті мен гранулометриялық құрамын талдау

А. Әлимураткызы, Г. Муканова, Т. Базарбаева, Б. Шимшиков, А. Ошакбай, А. Низамиев
Анализ физико-химических свойств и гранулометрического состава почв Хромтауского региона
A. Alimuratkyzy, G. Mukanova, T. Bazarbayeva, B. Shimshikov, A. Oshakbay, A. Nizamiev
Analysis of the physicochemical properties and particle-size distribution of soils in the Khromtau region 103

Т. Дедова, Л. Балакай, Н. Баширова, Б. Искаков, А. Мерекеев, Г. Кайранбаева
Жоғары дәлдікті спутниктік деректер негізінде Каспий теңізінің жағалау сызығы динамикасының мониторингі
Т. Дедова, Л. Балакай, Н. Баширова, Б. Искаков, А. Мерекеев, Г. Кайранбаева
Мониторинг динамики береговой линии Каспийского моря по спутниковым данным высокого разрешения
T. Dedova, L. Balakay, N. Bashirova, B. Iskakov, A. Merekeyev, G. Kairanbayeva
Monitoring the dynamics of the Caspian Sea coastline using high-resolution satellite data 119

Д. Дунец, Н. Курепина
Ресей Алтайындағы Шу тауаралық қазаншұңқырының дала кеңістігіндегі туризмнің аумақтық құрылымын қалыптастырудағы аттракторлардың рөлі
А. Дунец, Н. Курепина
Аттракторы как основа территориальной структуры туризма в условиях степных пространств Чуйской межгорной котловины в Российском Алтаев
A. Dunets, N. Kurepina
Attractors as the basis of the territorial structure of tourism in the conditions of the steppe spaces of the Chuya intermountain basin in the Russian Altai 136

Қ. Қырғызбай, Б. Дүйсебек, Т. Усманов, И. Рахметов, Е. Муканов
Жерді қашықтықтан зондтау деректерінің негізінде Терiс өзенінің бассейніндегі экологиялық жағдайды және атропогендік әсерді бағалау (Жамбыл облысы)
Қ. Қырғызбай, Б. Дүйсебек, Т. Усманов, И. Рахметов, Е. Муканов
Оценка экологического состояния и антропогенного воздействия в бассейне реки Терис на основе данных ДЗЗ (Жамбылская область)
K. Kyrgyzbay, B. Duisebek, T. Usmanov, I. Rakhmetov, Ye. Mukanov
Assessment of ecological condition and anthropogenic impact in the Teris River basin based on remote sensing data (Zhambyl region) 147

М. Мұсабаева, Ш. Шахарбек
Шаған көлінің соңғы 30 жылдағы гидроэкологиялық динамикасын ғарыштық және геоақпараттық әдістер арқылы зерттеу
М. Мусабаева, Ш. Шахарбек
Исследование гидроэкологической динамики озера Чаган за последние 30 лет с использованием космических и геоинформационных методов
M. Musabayeva, Sh. Shakharbek
Study of the hydroecological dynamics of Lake Chagan over the last 30 years using remote sensing and gis methods 170

Г. Оспанова, А. Мылкайдаров, А. Сансызбаева
Азық-түлік белдеуін зерттеудегі географиялық алғышарттар жүйесінің әдіснамалық негіздері
Г. Оспанова, А. Мылкайдаров, А. Сансызбаева
Методологические основы системы географических предпосылок в исследовании продовольственного пояса
G. Ospanova, A. Mulkaydarov, A. Sansyzbayeva
Methodological foundations of the system of geographical prerequisites in the study of the food belt 182

МРНТИ 06.81.23
Химия
Статья

Изучение химических свойств подземных вод и почвы Республики Каракалпакстан на примере Караузякского района

Алим Асаматдинов[1,2]*, Шухрат Муродов[2], Оралбай Кудияров[3]

[1]Нукусский государственный педагогический институт им. Ажинияза asamatdinov1973@gmail.com
[2]Научно-исследовательский институт окружающей среды и природоохранных технологий m.oikos@mail.ru
[3]Среднеобразовательная школа №12 Канлыкульского района kudyarovoralbay33@gmail.com
*Корреспондеция: asamatdinov1973@gmail.com

Аннотация: В статье представлены результаты исследования химических свойств подземных вод и почв Караузякского района Республики Каракалпакстан в условиях усиливающейся аридизации климата и дефицита водных ресурсов Приаралья. Проведён анализ гидрогеологических условий района, выполнена оценка минерализации и гидрохимического состава подземных вод на основе данных 20 эксплуатационных скважин, а также исследованы показатели засоления и агрохимические свойства почвенного профиля. Для интерпретации гидрохимических особенностей использована диаграмма Пайпера, позволившая установить основные типы подземных вод и направления их геохимической эволюции. Выявлена последовательная трансформация химического состава вод от гидрокарбонатно-кальциевого через гидрокарбонатно-натриевый к хлоридно-натриевому типу, обусловленная процессами ионного обмена, испарительного концентрирования и вторичного засоления. Установлено преобладание натриевых и гидрокарбонатных ионов в большинстве исследованных проб и показана связь между ростом минерализации подземных вод и ухудшением их качества. Исследование почв выявило щелочную реакцию среды (pH 8,4–9,4), повышенное содержание водорастворимых солей и наличие высокой корреляции между электропроводностью насыщенного почвенного экстракта и суммарным содержанием солей ($R^2 = 0,987$). Полученные результаты свидетельствуют о тесной взаимосвязи процессов гидрогеохимической трансформации подземных вод и вторичного засоления почв. Практическая значимость работы заключается в возможности использования выявленных закономерностей для совершенствования мониторинга подземных вод, оценки экологических рисков и разработки мероприятий по устойчивому управлению водными ресурсами в условиях экологического кризиса Приаралья.

Ключевые слова: подземные воды; Караузякский район; Республика Каракалпакстан; гидрохимический состав;

Цитирование: Асаматдинов, А., Муродов, Ш., Кудияров, О. (2026). Изучение химических свойств подземных вод и почвы Республики Каракалпакстан на примере Караузякского района. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия Химия, География. 155(2), 10-30. https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-10-30

Академический редактор: Э.Е. Копишев

Поступила: 20.05.2026
Исправлена: 11.06.2026
Принята: 12.06.2026
Опубликована: 30.06.2026

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/)

минерализация; засоление почв; электропроводность; диаграмма Пайпера; гидрогеохимическая трансформация; Приаралье.

1. Введение

Регион Приаралья и Республика Каракалпакстан относятся к числу наиболее уязвимых территорий Центральной Азии в условиях климатических изменений и длительного антропогенного воздействия. Усыхание Аральского моря, сокращение стока Амударьи, рост минерализации речных вод с 0,5–0,7 г/дм^3 в 1960–1980-е до 1,0–1,5 г/дм^3 и выше в 2020-е, а также вторичное засоление почв сделали поверхностные источники крайне ненадёжными.

Подземные воды приобретают статус основного альтернативного ресурса. По данным государственного кадастра на 01.06.2025, в Республике эксплуатируется 699 скважин с суммарным отбором около 78,61 тыс. м^3/сут. Доминирующим в использовании грунтовых вод является направление по обводнению пастбищ 61,5 %, затем производственно-технические нужды 22,0 %, хозяйственно-питьевое потребление составляет лишь ~9,2 %.

Геополитический регион Центральной Азии характеризуется континентальным засушливым и полузасушливым климатом со среднегодовым количеством осадков 600–800 мм в горных районах и 80–150 мм в пустынных регионах (Qadir et al, 2009). Специфические климатические условия Центральной Азии определяют решающую роль воды в урбанизации, поддержании жизни и сохранении уникальных природных объектов (Karkra et al, 2017). В связи с последствиями глобального потепления и ростом спроса на продовольствие и энергию из-за быстрого роста населения по всей Центральной Азии, водные ресурсы в этом регионе испытывают все большее давление (Ruan et al, 2020). Поэтому дефицит воды и неравномерное пространственное распределение водных ресурсов значительно ограничивают социально-экономическое развитие региона Центральной Азии (Guo et al, 2016). Помимо дефицита водных ресурсов, в Центральной Азии нарастают проблемы загрязнения воды и связанные с этим проблемы со здоровьем (Бектурганов и др., 2016). В ряде исследований сообщалось о чрезмерной солености воды ниже по течению рек Амударья и Сырдарья и описывались источники загрязняющих веществ, сбрасываемых в поверхностные воды (Osokova et al, 2000; Tornqvist et al, 2011; LenECg et al, 2021).

Целью статьи является исследование химических свойств подземных вод и почв Караузякского района Республики Каракалпакстан, оценка степени минерализации и засоления, определение гидрогеохимических особенностей формирования и трансформации состава подземных вод, а также выявление экологических рисков их использования для питьевого водоснабжения и сельского хозяйства в условиях аридизации климата и дефицита водных ресурсов.

Научная новизна исследования заключается в установлении современных закономерностей формирования химического состава подземных вод и процессов засоления почв Караузякского района Республики Каракалпакстан; выявлении гидрогеохимической трансформации подземных вод от гидрокарбонатно-кальциевого к хлоридно-натриевому типу; определении роли ионного обмена и испарительного концентрирования в процессах минерализации; а также в количественном обосновании связи между электропроводностью почвенного раствора и накоплением водорастворимых солей в почвенном профиле.

Основные гидрогеологические комплексы подземных вод

С гидрогеологической точки зрения Республика Узбекистан характеризуется значительной неоднородностью распределения ресурсов подземных вод. Наиболее крупные и стратегически важные месторождения пресных и слабоминерализованных подземных вод сосредоточены в северо-западной части страны - в пределах Республики Каракалпакстан, Приаралья и прилегающих пустынных территорий.

В настоящее время в этом регионе выделены четыре ключевых месторождения подземных вод, имеющих региональное значение для водоснабжения, сельского хозяйства и потенциального промышленного развития:

1. Месторождения подземных вод Каракалпакстана. Они охватывают левобережную часть нижнего течения реки Амударья в Республике Каракалпакстан. Характеризуются сложной структурой водоносных горизонтов, включающих как безнапорные аллювиальные горизонты, так и напорные (артезианские) горизонты более глубоких неогеново-четвертичных отложений. Значительная часть запасов подвержена вторичному засолению в результате повышения уровня грунтовых вод и капиллярного подъема солей.

2. Месторождения подземных вод нижнего течения Амударьи расположены на правом берегу нижнего течения реки Амударья (преимущественно в Хорезмской области и на юго-востоке Каракалпакстана). Они состоят в основном из высокопроницаемых аллювиальных водоносных горизонтов. Отложения образуются за счет просачивания из русла реки и ирригационных систем, что приводит к тесной гидравлической связи с поверхностными водами.

3. Залежи подземных вод Южного Аральского моря. Расположенное в южной части Аральского моря, в зоне влияния сокращающегося Аральского моря, месторождение характеризуется наличием нескольких артезианских комплексов в неогеново-четвертичных отложениях. Артезианские воды демонстрируют повышенную минерализацию по мере приближения к бывшему морскому бассейну, но в некоторых районах сохраняются горизонты приемлемого качества для бытового и питьевого водоснабжения. Запасы формируются преимущественно за счет боковой фильтрации из зоны подпитки на юге и юго-востоке.

4. Залежи подземных вод Устюртского плато. Расположено на Устюртском плато (северный Каракалпакстан). Водоносные горизонты представлены преимущественно трещинно-жиловыми и трещинно-поровыми системами в палеогеново-неогеновых карбонатно-терригенных отложениях. Солоноватые и слабосолоноватые воды встречаются в виде локализованных линз и зон активного водообмена в верхней части разреза; ниже преобладают сильно минерализованные рассолы. Месторождение имеет большое значение как потенциальный источник промышленной и питьевой воды для разработки месторождений газового конденсата и инфраструктуры плато (Отчет).

Перечисленные месторождения (рис.1) представляют собой основную базу для децентрализованного водоснабжения в условиях дефицита поверхностных вод в северо-западном регионе Узбекистана. Вместе с тем их эксплуатация сопряжена с рядом гидрогеологических и экологических рисков: вторичное засоление, снижение напоров в артезианских горизонтах, загрязнение коллекторно-дренажными стоками и общее ухудшение качества подземных вод в зоне Приаралья под влиянием аридизации климата и антропогенной нагрузки (Lilly et al., 2026).

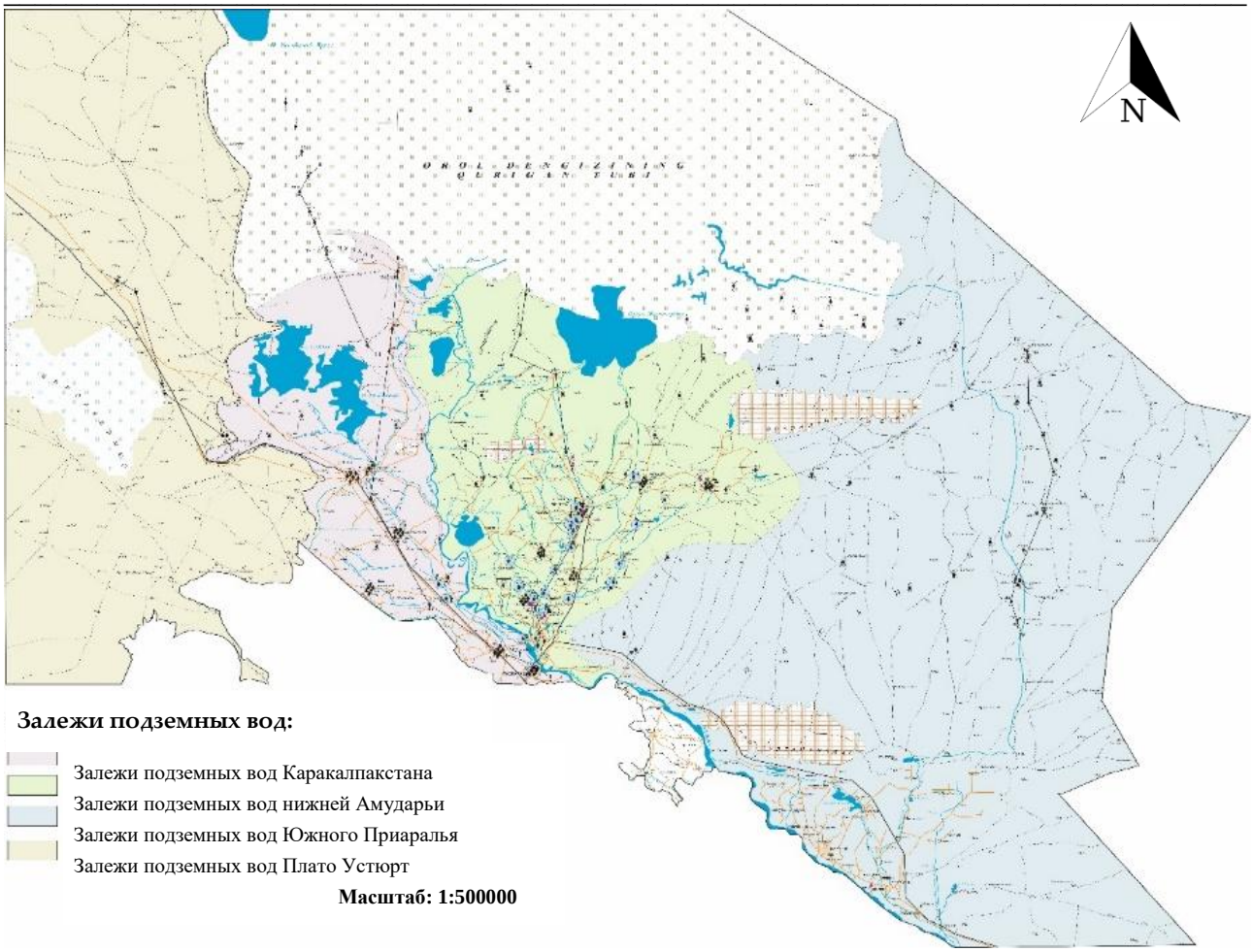


Рисунок 1. Карта месторождений подземных вод. (Lilly et al., 2026)

Дальнейшее рациональное использование указанных месторождений требует комплексного мониторинга, моделирования режима подземных вод и внедрения современных технологий охраны и искусственного восполнения запасов (Чембарисов и др., 2022).

На территории Республики Каракалпакстан гидрогеологические условия низовий и дельты реки Амударья определяют особую роль подземных вод как альтернативного и стратегически важного источника водоснабжения в условиях хронического дефицита поверхностного стока и прогрессирующей деградации качества речных вод.

Среди эксплуатируемых и перспективных объектов особое значение имеют два крупных гидрогеологических комплекса, приуроченных к правобережной и левобережной частям долины нижней Амударьи.

Правобережное месторождение подземных вод расположено на правом берегу реки в пределах административных границ Каракалпакстана. Основной источник питания фильтрационные потери из русла Амударьи и крупных магистральных каналов. Гидравлическая связь с поверхностными водами обусловливает сезонные колебания уровня и химического состава подземных вод. Минерализация в зоне активного водообмена обычно составляет 0,5–1,5 г/дм^3, что позволяет классифицировать эти воды как пресные и слабоминерализованные. Месторождение активно используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения населённых пунктов и производственно-технических нужд.

Левобережное месторождение подземных вод охватывает левобережную часть дельты и низовий Амударьи, включая территории Ходжейлийского, Шуманайского, Кунградского, Канлыкульского и частично Муйнакского районов. Водоносные комплексы представлены многослойной толщей четвертичных аллювиальных отложений с преобладанием песчаных и

супесчаных фракций вдоль русла реки и крупных каналов (Кегейли, Куаныш-жарма, Октябрь-Арна и др.). Формирование пресных и слабосолоноватых линз происходит за счёт инфильтрации из поверхностных водотоков; мощность пресноводных линз достигает 20–40 м при ширине 1–3 км. В приканальных зонах активно применяются методы искусственного восполнения запасов и локального опреснения. Минерализация варьирует от 0,6–1,2 г/дм^3 в зонах интенсивного питания до 3–5 г/дм^3 и более в периферийных участках, подверженных влиянию коллекторно-дренажного стока и вторичного засоления.

Оба месторождения характеризуются высокой перспективностью благодаря наличию значительных эксплуатационных запасов пресных и условно-питьевых вод, относительно благоприятным фильтрационным свойствам водовмещающих пород, возможности комбинированного использования с поверхностными источниками в многоводные периоды, потенциалу для дальнейшего наращивания добычи путём строительства новых водозаборов и внедрения технологий защиты от засоления.

Таким образом, правобережное и левобережное месторождения подземных вод нижней Амударьи остаются ключевыми элементами системы децентрализованного водоснабжения Республики Каракалпакстан. Их рациональное использование требует комплексного гидрогеологического мониторинга, математического моделирования режима, внедрения технологий искусственного пополнения запасов и строгого контроля качества подземных вод в условиях нарастающего антропогенного и климатического стресса в Приаральском регионе (Бахиев, 2025).

2. Материалы и методы

2.1. Аллювиальные горизонты нижней Амударьи

Это наиболее доступные, востребованные пресные и слабоминерализованные линзы четвертичного возраста. Правобережное месторождение тесная гидравлическая связь с Амударьёй и магистральными каналами, минерализация составляет 0,5–1,5 г/дм³, основное питание фильтрационные потери. Структура Левобережного месторождения многослойные песчаные и супесчаные отложения, пресные линзы мощностью 20–40 м, шириной 1–3 км; минерализация 0,6–1,2 г/дм³ в зонах питания 3–5 г/дм³ на периферии. Коэффициент фильтрации 5–25 м/сут (до 40–50 м/сут в грубообломочных фациях).

2.2. Артезианские комплексы плато Устюрт и Южного Приаралья

Устюртское месторождение трещинно-поровые и жильные системы в палеоген-неогеновых карбонатно-терригенных породах, минерализация 7–25 г/дм³ и выше. Использование преимущественно техническое (газодобыча) и поение скота. Южно-Приаральское месторождение напорные горизонты неоген-четвертичного и мелового возраста, минерализация от 3–5 до 10–50 г/дм³. Самоизлив на ряде участков питьевое использование возможно только после фильтрации и опреснения.

2.3. Меловой комплекс Южного Приаралья

Мощность 210–650 м (средняя 300–500 м), глубина кровли 150–1200 м напорные условия (самоизлив до 20–80 м). Коэффициент фильтрации 1–15 м/сут (песчаники), 0,5–8 м/сут (известняки); минерализация 5–15 г/дм^3 преимущественно хлоридно-натриевые рассолы.

Перспективными и активно используемыми в Республике Каракалпакстан считаются подземные воды в водоносных горизонтах мощностью 10–40 м, приуроченных преимущественно к четвертичным и неоген-четвертичным песчаным и песчано-гравийным отложениям аллювиального и субаэрального генезиса. Эти горизонты формируют локальные и протяженные пресные и слабоминерализованные линзы в долине и дельте нижней Амударьи, а также в приканальных зонах основных магистральных ирригационных систем.

2.4. Ключевые характеристики подземных вод

Караузякский район расположен в северной части Каракалпакстана (на правом берегу реки Амударьи) и считается орошаемым районом с типичными пустынными условиями. Ключевые параметры основаны на многолетних наблюдениях (включая 2025–2026 гг.). Уровень грунтовых вод (долгосрочные колебания, средний многолетний уровень и внутригодовые изменения). Изучение минерализации (солености) и химического состава.

Высокая минерализация делает воду непригодной для питья без опреснения и ограничивает ее использование в сельском хозяйстве. Влияние орошения: просачивание из каналов (Таш-Арна, Кок-Озек и др.) и плохой дренаж повышают уровень воды и увеличивают соленость. В сельской местности многие жители зависят от грунтовых вод (в некоторых деревнях до 70 %), что создает риски для здоровья.

2.5. Отбор проб воды

Мониторинг включает: глубину (скважины, точки наблюдения), отбор проб для определения минерализации, химического состава (сухой остаток, хлориды и др.) и частоту (сезонно/ежемесячно на ключевых участках). В 2025 году проводился мониторинг скважин в этом районе для обеспечения устойчивого управления. Объектами исследования были грунтовые воды из скважин в Караузякском районе. Для исследования в 2024 и 2025 годах были отобраны пробы воды для анализа (таблица №1) химического состава из 20 скважин в Караузякском районе (рис. №2) в соответствии с установленными стандартами (Asamatdinov, 2025) в чистые полимерные контейнеры объемом 1000 см³. Контейнеры были полностью заполнены водой и герметично закрыты крышками для удаления воздуха. Проба не хранилась и анализировалась как можно скорее после отбора, но не позднее чем через 24 часа (Tlueova et al., 2023). Для определения засоленности почв проведены измерения электрической проводимости в водной вытяжке при соотношении объёмов почва: вода 1:5 (EC 1:5). Измерения проводили в dS/m (дециземс на метр) элекрокондуктометром, имеющим электрод с температурным компенсатором.

Метод оценки степени засоления почв по электрической проводимости насыщенных почвенных экстрактов принят в международной практике из-за его простоты, однако в местных условиях ранее широко не применялся. В результате репрезентативного числа измерений ECe и EC 1:5, для условий Узбекистана получен коэффициент пересчета “K”, равный 4,0, который позволяет по измеренным значениям EC в водной вытяжке 1:5 оценивать степень засоления почв используя.

2.6. Отбор почвы

Образцы проб отбирали с помощью ручного бура и чистым шпателем клали в чистые полиэтиленовые пакеты примерно по 1 кг. Отобранные образцы сушили в комнатной температуре в течение 7 суток. Координаты отбора образцов - Караузякский район (43°02'37.6"N 60°03'00.5"E). Для образца почвенного разреза (P-1, Караузяк) были выполнены следующие анализы:

1. Определение механического состава почвы методом седиментации (метод Стокса).
2. Измерение показателя почвы pH.
3. Измерение электропроводности EC в водной вытяжке 1:5, (с пересчётом в ECe), dS/m. Оценка степени засоления почвы по методике ФАО.
4. Определение содержания общего количества солей (плотный остаток) % - методом выпаривания.
5. Определение ионного состава почвы HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+ по общепринятой методике в водной вытяжке 1:5, выраженный в % и в мг-экв на 100 г почвы.
6. Определение содержания гипса и карбонатов в солянокислой вытяжке.

Агрохимические анализы почвы

1. Содержание гумуса, методом Тюрина

2. Содержание питательных элементов NPK (в подвижных формах: N-NO_3, P_2O_5, K_2O)

Подготовка образцов почвы

Образцы почвы высушиваются на воздухе, размельчаются в фарфоровой ступке с помощью пестика и просеиваются через сито с ячейками размером в 1 мм. По международным стандартам широко используется просеивание почвы через сито диаметром 2 мм, так как большинство почв Центральной Азии имеют пик распределения частиц почвы по их размерам, который в международной классификации относятся к фракции “пыли”, мало вероятно, что эта разница может послужить причиной получения большой разницы величин при анализах.

Приготовление водной вытяжки

Из-за того, что доминирующей проблемой в регионе является засоление земель, анализы почвы обычно производятся на водных экстрактах из почвы. 20 грамм мелкозема (образцы почвы 1 мм) взбалтываются вместе со 100 миллилитрами дистиллированной воды в течение 5 минут и затем эта суспензия фильтруется.

Сумма солей или плотный остаток в водной вытяжке

Сумма солей или плотный остаток в водной вытяжке определяется с помощью взвешивания остатка из почвенной аликвотной пробы, высушенной в чашке в начале на водяной бане, а затем в сушильном шкафу. Для почв используется следующее равенство:
(Wt соли (г) ах объем экстрагирующего вещества (100 мл) ах 100·К) /(Объем аликвотной пробы х wt почвы (20 г)), где К - коэффициент, обычно равный 1

pH - водородный показатель

Эта величина измеряется стандартным хлористо-ртутным электродом с автоматической температурной компенсацией. В образцах почвы величина pH измеряется в водной суспензии 1:5

HCO_3^-

10 мл пробы водной вытяжки из почвы титруется на фоне 0,01N H_2SO_4, используется в качестве индикатора метилоранж. Процент содержания HCO_3^- во фракции мелкозема почвы равен 0,0315х, где ах – объем титра в мл.

SO_4^{2-}

5 мл пробы водной вытяжки из почвы нагревается вместе с раствором $BaCl_2$ и осадок заливается горячей, разведенной соляной кислотой (HCl), затем все это высушивается и взвешивается.

Cl^-

10 мл пробы водной вытяжки из почвы титруется на фоне стандартного раствора $AgNO_3$ до изменения цвета.

Ca^{2+}

10 мл пробы водной вытяжки из почвы титруется на фоне 0,05N раствора Трилона - Б - комплексного реагента (можно использовать также EDTA), используется в качестве индикатора мурексид.

Mg^{2+}

10 мл пробы водной вытяжки из почвы титруется на фоне стандартного раствора комплексного реагента Трилона - Б, в качестве индикатора используется Черный эрихром.

K^+ и Na^+

Измеряется с помощью пламенного газового фотометра с использованием соответствующих фильтров

Содержание органического вещества

Содержание органического вещества в почве определяется по методу И.В. Тюрина. Метод основан на окислении углерода гумуса раствором хромового ангидрида в серной кислоте и титровании неиспользованного хромового ангидрида солью Мора. Полученные величины органического углерода умножаются на 1,72, и в результате определяется расчетное содержание органического вещества в почве (organic mater).

Определение азота нитратов, аммиака.

Содержание усвояемого азота в почве определяется колориметрированием. Основой колориметрического определения нитратов по методу Гранвальд-Ляжу служит реакция между нитратами и дисульфофеноловой кислотой, приводящая к образованию тринитрофенола. В щелочной среде тринитрофенол образует солеобразное производное, имеющее желтую окраску.

Аммиак из почвы извлекается 1 %-ным раствором хлористого калия. В основу метода положена реакция между щелочным раствором йодистой ртутно-калиевой соли с аммиачными солями, в результате которой получается йодистый меркуроаммоний, имеющий желтую окраску.

3. Результаты

3.1. Основные гидрогеологические характеристики продуктивных горизонтов

По литолого-фациальному составу преобладают хорошо отсортированные пески средней и крупной зернистости, прослои супесей, гравийно-галечниковых отложений. Коэффициент фильтрации обычно составляет 5–25 м/сут, реже до 40–50 м/сут в наиболее проницаемых фациях. Мощность водоносного пласта варьирует от 10 до 40 м (наиболее часто 15–30 м), максимальные значения характерны для прирусловых и приканальных зон, где мощность пресноводных линз достигает 25–40 м. Глубина залегания: от 3–8 м в зонах интенсивного питания до 15–25 м на периферии линз; в ряде участков возможно формирование безнапорных и слабонапорных условий.

Минерализация в центральных частях линз 0,5–1,2 г/дм^3 пресные и условно-питьевые воды, по периферии возрастает до 1,5–3,0 г/дм^3 под влиянием бокового притока засоленных грунтовых вод и капиллярного поднятия солей.

Основные гидрогеологические характеристики мелового комплекса

По литолого-фациальному составу преобладают терригенно-карбонатные отложения, хорошо проницаемые песчаники (кварцевые, полевошпатово-кварцевые, часто слабосцементированные), алевролиты и известняки (органогенно-детритовые, оолитовые, мергелистые). В разрезе наблюдаются чередования проницаемых коллекторов (песчаники мощностью 20–150 м) с относительно водоупорными прослоями глин, алевролитов и мергелей.

Мощность водовмещающих отложений варьируется от 210 до 650 м (в среднем 300–500 м в наиболее продуктивных зонах); максимальные значения характерны для погруженных частей бассейна в направлении к центру бывшего Аральского моря и южным депрессиям. Глубина залегания кровли продуктивного комплекса от 150–300 м в периферийных зонах, до 600–1200 м и более в центральных частях Южно-Приаральского прогиба.

Таким образом, меловые песчаники и известняки мощностью 210–650 м остаются стратегическим резервом глубинных подземных вод для технического и ограниченного хозяйственного использования в южной части Приаралья, где поверхностные и мелкие подземные ресурсы практически исчерпаны или деградированы (Rakhmatullaev Sh. et al, 2012).

Структура эксплуатации и использование (по состоянию на 2025 г.)

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к увеличению роли опреснительных установок в системе хозяйственно-питьевого водоснабжения населения за счёт использования подземных вод различной степени минерализации. Это обусловлено прогрессирующим дефицитом поверхностных пресных вод реки Амударья, вторичным засолением мелких водоносных горизонтов, истощением локальных пресных линз аллювия и общим ухудшением качества доступных ресурсов в условиях экологического кризиса Приаралья и аридизации климата. Согласно данным государственного кадастра подземных вод, который ведётся Каракалпакской гидрогеологической станцией (в структуре Государственного предприятия «Узбекгидрогеология» или профильных органов), по

состоянию на 01.06.2025 года на территории республики зарегистрировано 1447 эксплуатационных скважин различного назначения и глубины.

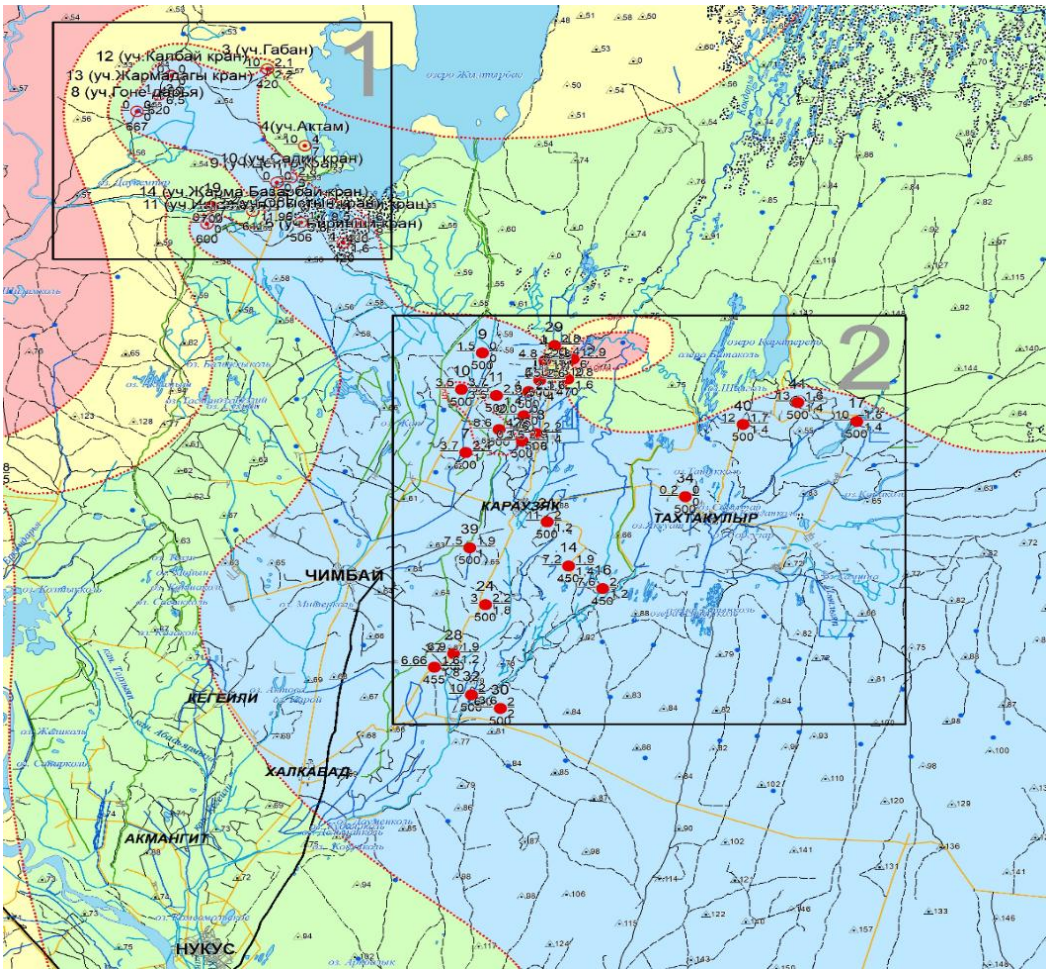


Рисунок 2. Карта расположения скважин подземных вод в Караузякском районе

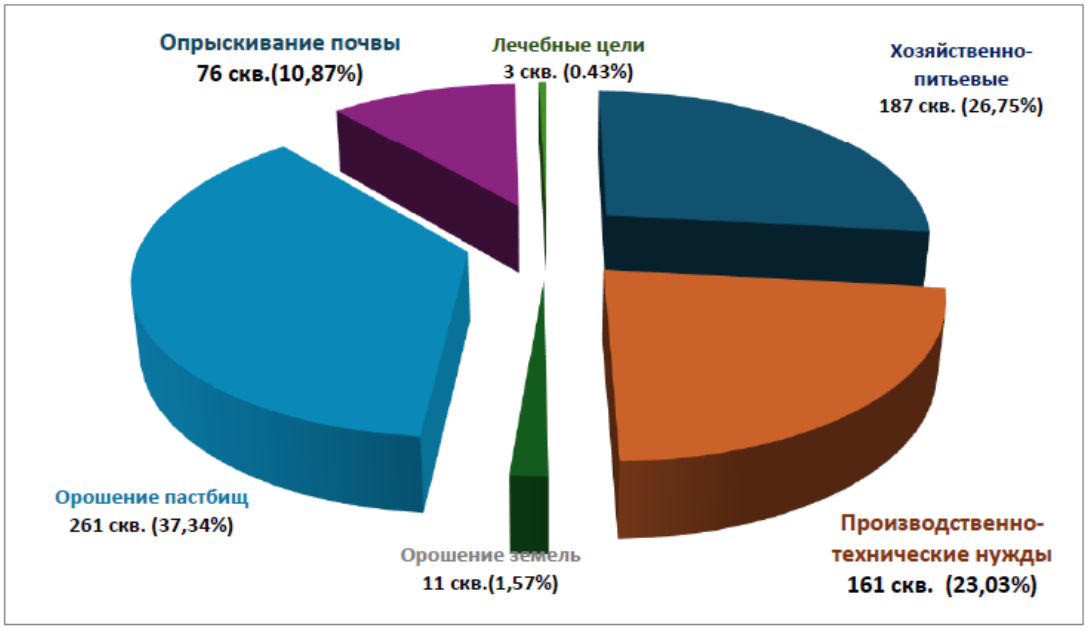


Рисунок 3. Диаграмма распределения действующих эксплуатационных скважин и добываемых с их помощью подземных вод (шт/процент)

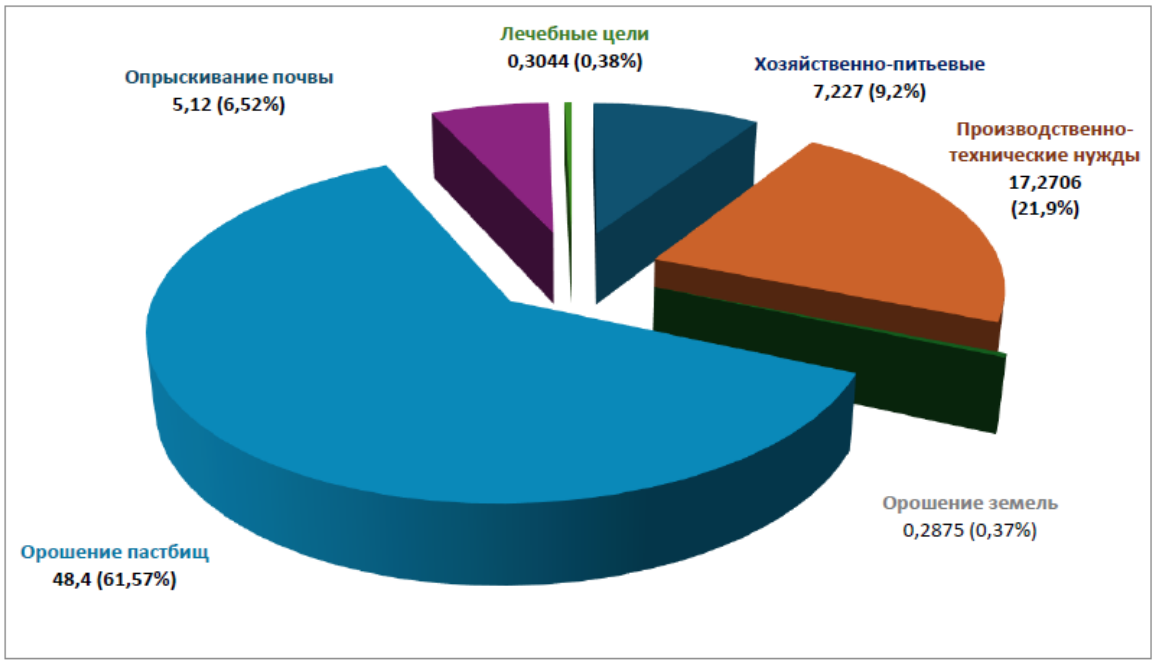


Рисунок 4. Диаграмма распределения действующих эксплуатационных скважин и добываемых с их помощью подземных вод (тыс. м^3/сут/процент)

Распределение (рис. 3-4) эксплуатационных запасов по основным категориям потребления выглядит следующим образом: на хозяйственно-питьевые нужды отбор осуществляется из 187 скважин в объёме 7,227 тыс. м^3/сут ≈ 9,2 % от общего отбора. Данный объём преимущественно формируется за счёт пресных и слабоминерализованных линз четвертичных аллювиальных отложений правобережья и левобережья нижней Амударьи, а также локальных горизонтов с искусственным пополнением. На производственно-технические нужды наиболее значительный по объёму сектор 17,2706 тыс. м^3/сут из 161 скважины ≈ 22,0 % от общего отбора. Воды используются преимущественно для обеспечения объектов газодобычи и коммунальных нужд промышленных зон. На орошение земель составляет 0,2875 тыс. м^3/сут из 11 скважин ≈ 0,4 %. Объём незначителен и ориентирован на локальное орошение приусадебных участков, тепличных хозяйств или небольших массивов солевыносливых культур вблизи водозаборов. На орошение пастбищ **с**амый крупный по объёму сектор 48,41 тыс. м^3/сут из 261 скважины ≈ 61,5 % от общего отбора. Данный показатель отражает критическую роль подземных вод в поддержании животноводства в пустынных и полупустынных территориях Каракалпакстана. На опрыскивание почвы борьба с пыльными бурями, закрепление песков, агролесомелиорацию забирается 5,12 тыс. м^3/сут из 76 скважин ≈ 6,5 %. Воды применяются для увлажнения поверхности почв, подавления соляных и пыльных бурь с высохшего дна Аральского моря, а также в мероприятиях по фитомелиорации и закреплению подвижных песков. На лечебные цели (санаторно-курортные нужды) расходуется примерно в объеме 0,3044 тыс. м^3/сут из 3 скважин ≈ 0,4 %. Задействованы специфические минеральные воды часто термальные или с повышенным содержанием микроэлементов из локальных горизонтов, пригодные для наружного применения или после специальной подготовки.

Анализ химического состава исследуемых скважин (табл.1 и рис.5) представляет нам наглядный пример о минерализации подземных вод исследуемого района. Большинство образцов расположены в нижней части алмаза, ближе к верхней части, где преобладают Ca (кальций) и HCO_3^-/CO_3^{2-} (бикарбонаты/карбонаты), с заметным вкладом $Na^+ + K^+$ и Cl^- в некоторых случаях.

На скважине Караузяк №60 (рис.5а) синий квадрат ближе к центру нижней части, значительный процент Ca^{2+}, а также $Na^{+}+K^{+}$ и HCO_3^{-}, вероятно, смешанный тип Ca^{2+} - Na^{+} - HCO_3^{-}. На скважине Караузяк №88 зеленый треугольник - низкое содержание Ca^{2+}, высокое содержание $Na^{+}+K^{+}$, заметное содержание SO_4^{2-} и HCO_3^{-} ближе к типу Na^{+} -SO_4^{2-} - HCO_3^{-} или смешанному щелочному типу. Скважина Баг-аул показывает высокое содержание Ca^{2+} (приблизительно 80–90 %), низкое содержание других катионов преимущественно кальций - бикарбонатный.

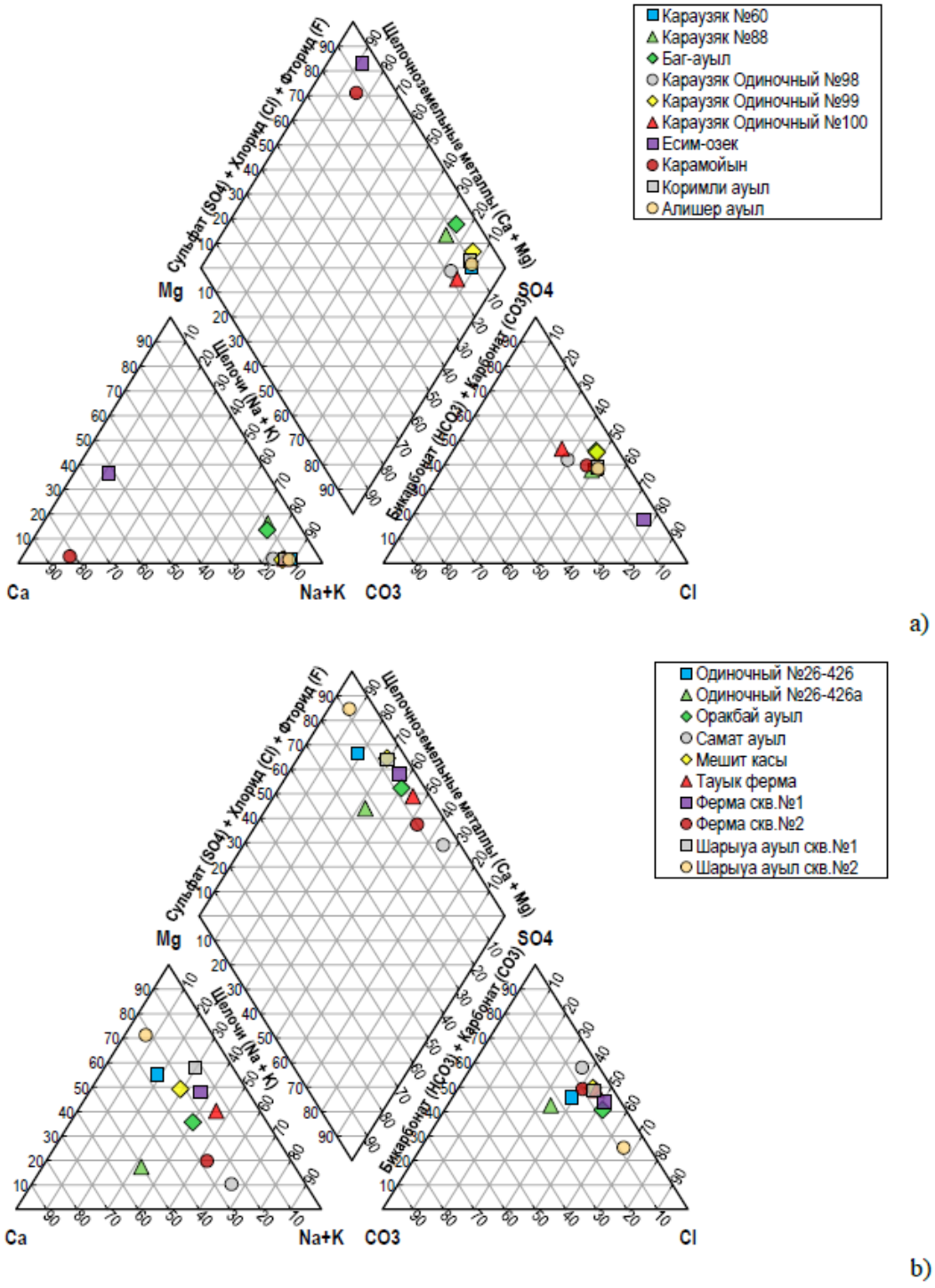


Рисунок 5. Диаграмма Пайпера для грунтовых вод Караузякского района

На скважинах (рис.5. а) Караузяк №60 катионы: Na^++K^+ ≈75–85 %, Ca^{2+} ≈10–15%, Mg^{2+} ≈5–10 %, анионы: HCO_3^- ≈50–60 %, Cl^- ≈30–40 %, SO_4^{2-} ≈5–10 %, тип воды HCO_3^- – Na^+ (с примесью Cl^-), слабо минерализованная. Караузяк №88 катионы: Na^++K^+ ≈70–80 % Ca^{2+} ≈10–20 % Mg^{2+} ≈5–10 %, анионы: HCO_3^- ≈45–55 % Cl^- ≈35–45 % SO_4^{2-} ≈5–10 % более минерализованная, чем в №60 усиливается роль хлоридов. Баг-ауыл катионы: Na^++K^+ ≈60–70 % Ca^{2+} ≈20–25 %, Mg^{2+} ≈10–15 %, анионы: HCO_3^- ≈55–65 %, Cl^- ≈25–30 %, SO_4^{2-} ≈10–15 %. Тип: HCO_3^- -Na^+–Ca^{2+}, переходный тип: меньше натрия → слабее ионный обмен, сильно смещены в сторону Са и HCO_3 кальций-гидрокарбонатные воды. На скважине Карамойин красный круг показывает о низком содержании Ca^{2+}, высокое содержание Na^++K^+ и высокое содержание Cl^-, хлоридно-натриевый тип, солоноватая/минерализованная вода. В пределах исследуемой территории прослеживается направленная трансформация гидрохимического состава подземных вод от гидрокарбонатно-кальциевых к гидрокарбонатно-натриевым и далее к хлоридно-натриевым типам.

Таблица 1. Данные химического анализа подземных вод Караузякского района

№	Название скважин	Запах	Послевкусие	Мутность	Аммоний (NH_4^+), мг-экв/л	(NO_2^-), мг-экв/л	(NO_3^-), мг-экв/л	Окисляемость	Сульфаты (SO_4^{-2}), мг-экв/л	Полная минерализация (сухой остаток)	Общее железо (Fe^{+2} и Fe^{+3}), мг-экв/л	Медь (Cu^{+2}), мг-экв/л	Фтор (F^-), мг-экв/л	Свинец (Pb), мг-экв/л	Марганец (Mn^{+2}), мг-экв/л
1	Баг-ауыл	0	2	1,3	1,27	0,02	0,0	4,1	705,6	2970	0,04	0,04	1,1	0	0
2	Есим-озек	0	2	0,2	0,9	0,0	0,0	2,3	508,8	2190	0,06	0	1,56	0	0
3	Карамойын	2	2	0,5	0,13	0,03	0,0	2,6	537,6	2250	0	0	1,3	0	0
4	Коримли	0	2	0,8	1,1	0,02	0,0	3,4	494,4	2900	0,06	0	1,08	0	0,001
5	Скв№ 60	1	2	0,2	1,0	0,06	2,55	5,5	302,4	2960	0	1,18	1,44	0	0,001
6	Скв№ 26/426	1	2	0,7	1,5	0,0	1,76	3,3	936,0	4800	0,12	5,76	0,70	0	0,003
7	Скв№ 26/426а	1	2	0,0	1,5	0,02	0,79	5,4	724,8	3520	0	3,78	0,48	0	0,001
8	Скв№ 88	2	2	1,1	1,5	0,01	7,04	2,2	432,0	3430	0,12	3,0	0,32	0	0,002
9	Скв№ 98	2	0	2,2	0,02	0,07	5,41	1,1	220,8	1010	0,1	3,44	0,18	0	0
10	Скв№ 99	0	2	0,8	1,5	0,01	1,18	1,6	643,2	3800	0,08	3,20	0,76	0	0,01
11	Скв№ 100	1	2	0,7	1,5	0,01	0,35	1,7	355,2	2240	0,06	0,74	0,48	0	0,001
12	С.Камалов (Алишер ауыл)	0	2	0,3	0,71	0,01	0,0	2,2	499,2	2100	0	0	1,18	0	0

13	С.Камалов (Оракбай ауыл)	1	2	0,2	0,41	0,01	0,0	3,4	460,8	2350	0,04	0	0,94	0	0
14	Самат ауыл	1	2	0,7	1,15	0,02	0,0	3,0	590,4	2350	0,06	0	1,26	0	0
15	Мешит касы	1	1	1,1	1,26	0,0	0,0	3,6	508,8	2580	0,06	0	1,28	0	0
16	Тауык ферма	2	2	0,7	1,1	0,07	0,0	4,0	566,4	3010	0,04	0	1,1	0	0,001
17	Ферма №1	2	1	0,7	0,4	0,01	0,0	2,7	504,0	1980	0,10	0	1,48	0	0
18	Ферма №2	0	1	0,9	0,2	0,01	0,44	3,0	336,0	2120	0,04	0	1,26	0	0,001
19	Шарыуа ауыл №1	0	2	0,9	1,1	0,02	0,0	4,2	480,0	2640	0,04	0,04	1,18	0	0
20	Шарыуа ауыл №2	2	2	1,0	1,26	0,04	0,0	4,4	504,0	2690	0,02	0	1,02	0	0,001

Данная эволюция обусловлена сочетанием процессов ионного обмена и испарительного концентрирования, наиболее выраженных в скважине Есим-озек, характеризующейся максимальной степенью минерализации. Исследуемые (рис. 5- b) воды характеризуются преобладанием хлоридного анионного состава и вариабельным катионным соотношением от кальциево-магниевого до натриевого. Это свидетельствует о сложной гидрогеохимической эволюции, обусловленной сочетанием процессов испарительного концентрирования, ионного обмена и возможного антропогенного воздействия.

Карамойын и некоторые скважины Караузяк № 88, № 60 демонстрируют сдвиг в сторону натриево-хлоридных и смешанных типов более минерализованных, возможно, под влиянием испарения, засоления почвы или древних соляных горизонтов (А. Асаматдинов (а), 2026).

Наличие точек данных с высоким содержанием SO_4 (скважина Есим-озек и некоторые Караузяк) может указывать на влияние сульфатных пород или антропогенного загрязнения (удобрения, дренаж). Такие диаграммы часто используются в исследованиях грунтовых вод в засушливых регионах, включая Республику Каракалпакстан, где наблюдается градиент от пресной воды на аллювиальных конусах до более соленой воды на более низких высотах. Караузяк и окружающие его точки, вероятно, представляют собой разные горизонты или участки одного и того же водоносного комплекса с различной степенью солености (Р. Хожамуратова и др. 2026).

Катионно-анионный анализ подземных вод Караузякского района показал существенную пространственную изменчивость их химического состава. Среди катионов основную роль играют натрий и калий (Na^++K^+), кальций (Ca^{2+}) и магний (Mg^{2+}), тогда как анионный состав формируется преимущественно гидрокарбонатами (HCO_3^-), хлоридами (Cl^-) и сульфатами (SO_4^{2-}). Соотношение этих компонентов определяет гидрохимический тип исследуемых вод и отражает особенности процессов водообмена в водоносных горизонтах.

По результатам интерпретации диаграммы Пайпера установлено, что большинство исследованных проб относятся к гидрокарбонатно-натриевому и гидрокарбонатно-кальциевому типам. Для скважин Караузяк № 60 и Караузяк № 88 характерно преобладание катионов Na^++K^+ (70–85 % эквивалентного содержания), что свидетельствует о развитии процессов катионного обмена между подземными водами и глинистыми минералами водовмещающих пород. В анионном составе данных вод доминируют гидрокарбонаты HCO_3^- при заметном участии хлоридов Cl^-.

Для вод скважины Баг-ауыл характерна повышенная доля кальция Ca^{2+} и гидрокарбонатов HCO_3^-, что позволяет отнести их к кальциево-гидрокарбонатному типу.

Формирование такого состава связано с растворением карбонатных пород и относительно слабым влиянием процессов засоления.

В ряде скважин наблюдается увеличение содержания хлоридов Cl^- и сульфатов SO_4^{2-}, сопровождающееся ростом минерализации. Это указывает на процессы испарительного концентрирования, поступление солей из засоленных пород и вторичное засоление территории. Наиболее минерализованные воды характеризуются переходом от гидрокарбонатного к хлоридно-натриевому типу, что свидетельствует о прогрессирующей гидрогеохимической трансформации водоносной системы.

Таким образом, катионно-анионный анализ показал, что химический состав подземных вод Караузякского района формируется под влиянием процессов растворения минералов, ионного обмена, испарительного концентрирования и антропогенной нагрузки. Выявленная смена гидрохимических типов от гидрокарбонатно-кальциевых к гидрокарбонатно-натриевым и далее к хлоридно-натриевым водам отражает усиление процессов минерализации и засоления в условиях аридного климата Приаралья.

pH водной вытяжки из образцов почвы Р-1 Караузяк составляет от 8,4 до 9,4. При этих показателях почва образцов почвенного профиля оценивается как щелочная (pH 8,5 – 9,0) и сильно щелочная (pH более 9,0, таблица №2). Обычно все микроэлементы хорошо усваиваются растениями при pH менее 8,4, то есть показатель pH почвы в обоих почвенных разрезах, ограничивающий доступность микроэлементов для растений (M. Zakirov et al. 2026).

На рисунке №6 представлена зависимость содержания водорастворимых компонентов в почве от степени засоления, выраженной через показатель $EC_{1:5}$ (dS/m^{-1}) для участка **Р-1 Караузяк**. Анализ демонстрирует выраженную положительную корреляцию между ростом засоления и накоплением основных солевых компонентов (A. Ajiev et al. 2023). Наиболее интенсивное увеличение наблюдается для плотного остатка, который характеризует общую минерализацию почвенного раствора (А. Асаматдинов (б), 2026). Линейная зависимость описывается уравнением, Коэффициент детерминации R2=0,987 свидетельствует о высокой степени достоверности модели и практически линейном характере накопления солей при увеличении $EC_{1:5}$ (dS/m^{-1}). Это указывает на устойчивое возрастание общей минерализации среды по мере усиления процессов засоления (А. Ажиев и др, 2023).

Таблица 2. Результаты измерений pH, электропроводности и определения ионного состава почвы методом водной вытяжки

Горизонты, см	Сумма ток. солей	pH	EC1:5, dS/m	ECe, dS/m	Плотн. остаток, %	Содержание растворимых ионов						
						% к массе						
						HCO_3	$Cl^{'}$	$SO^{''}_4$	$Ca^{..}$	$Mg^{..}$	Na'	K
Р-1 Қораўзак												
0-25	4,990	8,4	11,90	47,60	6,884	0,031	0,718	3,456	0,218	0,118	1,250	0,450
25-50	5,922	8,7	13,24	52,96	8,782	0,033	0,963	4,416	0,238	0,142	1,300	0,870
50-75	2,282	8,7	6,67	26,68	3,376	0,021	0,525	1,536	0,16	0,071	0,550	0,235
75-100	1,754	9,0	5,13	20,52	2,512	0,020	0,385	1,152	0,094	0,056	0,433	0,154
100-125	1,238	9,4	3,62	14,48	1,648	0,017	0,298	0,720	0,048	0,041	0,333	0,063
125-150	0,874	9,4	2,82	11,28	1,164	0,020	0,245	0,418	0,03	0,025	0,250	0,036
150-200	0,875	9,4	2,81	11,24	1,152	0,020	0,224	0,436	0,032	0,025	0,250	0,032
200-250	0,449	9,3	1,45	5,80	0,596	0,020	0,109	0,240	0,020	0,012	0,130	0,015

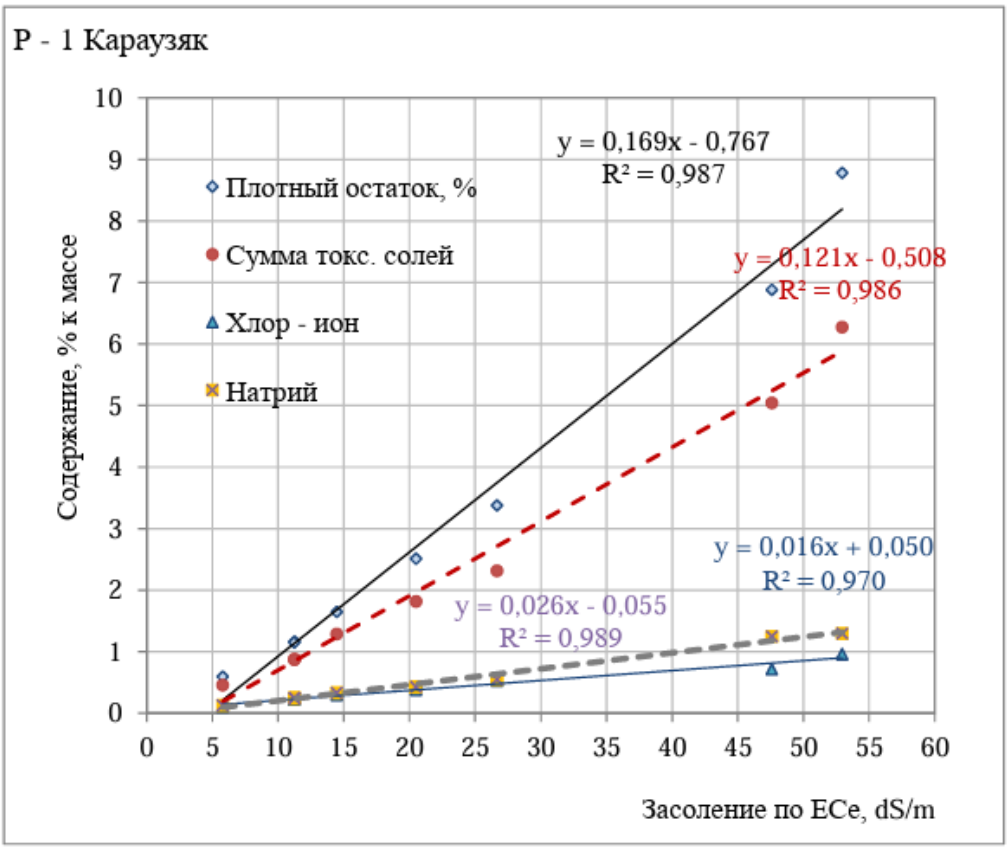


Рисунок 6. Связь между содержанием отдельных показателей засоления почвы с величиной электропроводности насыщенного почвенного экстракта ECe

4. Обсуждение

Ускоренное бурение и отбор приводят к прогрессирующему истощению ресурсов подземных вод. Снижение уровней и напоров в наблюдательных скважинах фиксируется падением уровня на 1,5–5,0 м за 5–10. В артезианских комплексах Южного Приаралья и Устюрта снижение пьезометрических уровней приводит к уменьшению дебитов скважин и риску прекращения самоизлива.

При ухудшении качества воды формируются конусы засоления, минерализация растёт, особенно в периферийных частях линз и при миграции высокоминерализованных вод из глубоких горизонтов. Вторичное засоление усиливается капиллярным поднятием солей при падении уровня.

Сокращение эксплуатационных запасов: Общий отбор подземных вод в Каракалпакстане достигает десятков тысяч м^3/сут (по состоянию на 2025 г. ~78,61 тыс. м^3/сут из 699 скважин), превышая естественное пополнение в аридных условиях. Пресные ресурсы аллювия истощаются быстрее, чем восполняются за счёт фильтрации (A. Asamatdinov et al., 2025) из реки и каналов (которая сама сокращается).

Экологические и социально-экономические риски: угроза безвозвратной потери значительной части пресных запасов в ближайшие десятилетия, усиление деградации пастбищ, снижение продуктивности животноводства, рост затрат на опреснение для питьевых нужд.

По результатам проведенных исследований можно выделить следующие новые гидрохимические закономерности:

1. Установлена последовательность гидрогеохимической трансформации подземных вод Караузякского района. Впервые для исследуемой территории показано, что химический состав подземных вод изменяется по схеме:

$$\mathbf{Ca–HCO_3 \rightarrow Na–HCO_3 \rightarrow Na–Cl}$$

То есть по мере увеличения минерализации происходит уменьшение доли кальция и гидрокарбонатов и увеличение содержания натрия, хлоридов и сульфатов. Это отражает эволюцию вод от относительно пресных к засоленным.

2. Установлена ведущая роль катионного обмена в формировании натриевых вод. Для скважин Караузяк № 60 и № 88 выявлено преобладание $Na^+ + K^+$ (70–85 % эквивалентного состава), что свидетельствует о развитии процессов обмена между подземными водами и глинистыми минералами водовмещающих пород. Ранее для Караузякского района количественная оценка данного процесса не приводилась.

3. Установлена связь между ростом минерализации и изменением анионного состава

Показано, что увеличение общей минерализации сопровождается:

- снижением относительной роли HCO_3^-;
- увеличением содержания Cl^- и SO_4^{2-};
- переходом вод к хлоридно-натриевому типу.

Это свидетельствует об усилении процессов испарительного концентрирования и вторичного засоления в условиях аридного климата Приаралья.

4. Установлена количественная зависимость между ECe и содержанием водорастворимых солей в почвах. Впервые для почв Караузякского района получена высокая корреляция между электропроводностью насыщенной пасты (ECe) и содержанием водорастворимых компонентов:

- коэффициент детерминации $\mathbf{R^2 = 0{,}987}$;
- рост ECe сопровождается практически линейным накоплением солей.

Это позволяет использовать ECe как надежный диагностический показатель степени засоления почв района.

5. Установлена взаимосвязь между гидрохимией подземных вод и почвенным засолением. Показано, что участки с повышенной минерализацией подземных вод характеризуются:

- высокой щелочностью почв (pH 8,4–9,4);
- повышенным содержанием водорастворимых солей;
- усилением процессов вторичного засоления.

Для Караузякского района эта связь рассмотрена комплексно в системе «подземные воды – почва».

5. Заключение

Подземные воды Каракалпакстана остаются критически важным ресурсом в условиях экологического кризиса Приаралья. Однако текущие объёмы отбора уже превышают естественное пополнение в аридных условиях, а интенсивная эксплуатация ускоряет истощение и деградацию качества. Переход к устойчивому управлению требует немедленного внедрения современных технологий мониторинга, защиты и восполнения запасов, а также интеграции климатических сценариев в долгосрочное планирование.

Перспективы дальнейших исследований связаны с углублённым изучением процессов формирования и трансформации химического состава подземных вод Караузякского района в условиях продолжающейся аридизации климата и антропогенной нагрузки. В первую очередь целесообразно расширить сеть наблюдательных скважин и выполнить многолетний мониторинг гидрохимических показателей для выявления сезонной и межгодовой динамики минерализации подземных вод.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация - Ш.М., А.А.; методология - Ш.М.; программное обеспечение - О.К.; валидация - О.К., А.А.; формальный анализ - А.А., О.К.; исследование - А.А., Ш.М., О.К.; ресурсы - А.А.; курирование данных - Ш.М.; написание - подготовка оригинального черновика - А.А.; написание - рецензирование и редактирование - Ш.М.; визуализация - А.А.; руководство - А.А.; администрирование проекта - А.А; получение финансирования - А.А.

8. Информация об авторах

Асаматдинов, Алим – доцент кафедры химии, Нукусский государственный педагогический институт им. Ажинияза, ул. П. Сейтова, б/н, Нукус, Узбекистан, 230100; asamatdinov1973@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-6572-7333

Муродов, Шухрат – профессор, доктор технических наук, Научно-исследовательский институт окружающей среды и природоохранных технологий, Ташкент, Узбекистан, 111104; m.oikos@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9815-7664

Кудияров, Оралбай – независимый соискатель, Среднеобразовательная школа №12 Канлыкульского района, Узбекистан, 230100; kudyarovoralbay33@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-9362-3283

9. Финансирование: Данная статья подготовлена при поддержке совместного проекта «FARM – Содействие устойчивым решениям в области использования подземных вод для сельских фермерских общин в Каракалпакстане, Узбекистан», финансируемого Федеральным министерством исследований и образования Германии (BMBF) и Министерством высшего образования, науки и инноваций Узбекистана (MHESI).

10. Благодарности: Мы выражаем благодарность сотрудникам Приаральской гидрогеологической экспедиции за предоставление данных и техническую помощь.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

12. Список литературы

1. Asamatdinov, A., & Dzhaksymuratov, K. (2025). Hydrogeological conditions of the dried-up bottom of the Aral Sea and adjacent territories of the South Aral Sea artesian basin. *Journal of Science and Education in Karakalpakstan*, 3(2), 114–116.
2. Asamatdinov, A., & Dzhaksymuratov, K. (2025). Prospects for the use of groundwater in the Aral Sea region for the sustainable development of the region. *Journal of Science and Education in Karakalpakstan*, 5(3), 49–55.
3. Bakhiev, Kh. A. (2025). Monitoring of the composition and quality of water resources in Karakalpakstan (Monitoring sostava i kachestva vodnykh resursov v Karakalpakstane in Russian). *Universum: Tekhnicheskie nauki*, 141(12).
4. Bekturganov, Z., Tussupova, K., Berndtsson, R., Sharapatova, N., Aryngazin, K., & Zhanasova, M. (2016). Water related health problems in Central Asia – a review. *Water*, 8(6), 219. https://doi.org/10.3390/w8060219
5. Chembarisov, E. I. (2022). *Features of hydrological and reclamation monitoring of the irrigated territory of the Republic of Karakalpakstan* (Osobennosti gidrologicheskogo i meliorativnogo monitoringa oroshaemoi territorii Respubliki Karakalpakstan in Russian). Lesson Press.
6. Guo, L., Zhou, H., Xia, Z., & Huang, F. (2016). Evolution, opportunity and challenges of transboundary water and energy problems in Central Asia. *SpringerPlus*, 5. https://doi.org/10.1186/s40064-016-3616-0

7. Hamidov, A. (2020). Impact of climate change on groundwater management in the northwestern part of Uzbekistan. *Agronomy*, 10(8), 1173. https://doi.org/10.3390/agronomy10081173
8. Karakalpak State Geophysical Service. (2025). *Report on groundwater monitoring in the Republic of Karakalpakstan for 2022–2025*.
9. Karkra, R., Kumar, P., Bansod, B. K. S., Bagchi, S., Sharma, P., & Krishna, C. R. (2017). Classification of heavy metal ions present in multi-frequency multi-electrode potable water data using evolutionary algorithm. *Applied Water Science*, 7, 3679–3689. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0514-0
10. Leng, P., Zhang, Q., Li, F., Kulmatov, R., Wang, G., Qiao, Y., Wang, J., Peng, Y., Tian, C., Zhu, N., Hirwa, H., & Khasanov, S. (2021). Agricultural impacts drive longitudinal variations of riverine water quality of the Aral Sea basin: Amu Darya and Syr Darya rivers, Central Asia. *Environmental Pollution*, 284, 117405. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117405
11. Lilly, L., Stefan, C., & Asamatdinov, A. (2026). Development of a web-based hydro-environmental atlas for the Republic of Karakalpakstan, Uzbekistan. *Universum Journal*, 3(44).
12. Ososkova, T., Gorelkin, N., & Chub, V. (2000). Water resources of Central Asia and adaptation measures for climate change. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61, 161–166. https://doi.org/10.1023/A:1006394808699
13. Pan, X. (2020). Quantitative detection and attribution of groundwater level variations in the Amu Darya Delta. *Water*, 12(10), 2869. https://doi.org/10.3390/w12102869
14. Qadir, M., Noble, A. D., Qureshi, A. S., Gupta, R. K., Yuldashev, T., & Karimov, A. (2009). Salt-induced land and water degradation in the Aral Sea basin: A challenge to sustainable agriculture in Central Asia. *Natural Resources Forum*, 33(2), 134–149. https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2009.01217.x
15. Rakhmatullaev, Sh. (2012). Groundwater resources of Uzbekistan: an environmental and operational overview. *Central European Journal of Geosciences*, 4(1), 67–80.
16. Ruan, H. W., Yu, J. J., Wang, P., & Wang, T. Y. (2020). Increased crop water requirements have exacerbated water stress in the arid transboundary rivers of Central Asia. *Science of the Total Environment*, 713, 136585. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136585
17. Tlueova, A. (2023). Relation of hydrogeology and contaminant sources to drinking water quality in Southern Kazakhstan. *Water*, 15(24), 4240. https://doi.org/10.3390/w15244240
18. Törnqvist, R., Jarsjö, J., & Karimov, B. (2011). Health risks from large-scale water pollution: Trends in Central Asia. *Environment International*, 37(2), 435–442. https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.11.006
19. Zakirov, M. M., Ochilov, G. E., Djaksimuratov, K. M., Asamatdinov, A. O., & Snow, D. (2026). Key characteristics of the ecological and geodynamic conditions in Southern Karakalpak Ustyurt of Uzbekistan. *Land*, 15, 782. https://doi.org/10.3390/land15050782
20. Khojamuratova, R., Dzhaksymuratov, K., & Asamatdinov, A. (2026). Groundwater monitoring for water supply and land irrigation in the Karauzyak district (Monitoring gruntovykh vod v tselyakh vodosnabzheniya i orosheniya zemel ’v Karauzyakskom raione in Russian). In *Innovative equipment and technologies for agricultural development under climate change and water scarcity in the Aral Sea region* (Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologii dlya razvitiya sel ’skogo khozyaistva v usloviyakh izmeneniya klimata i nekhvatki vody v regione Aral ’skogo moray) (pp. 6–64). Nukus, Uzbekistan.
21. Asamatdinov, A. O. (2026a). Groundwater monitoring of the Karauzyak district (Monitoring gruntovykh vod Karauzyakskogo raiona in Russian). *Universum: Tekhnicheskie nauki*, 3(144), 8–14. https://doi.org/10.32743/UniTech.144.3.22233
22. Asamatdinov, A. O. (2026b). Physicochemical characteristics of Aralkum sands (Fiziko-khimicheskaya kharakteristika peskov Aralkumov in Russian). *Universum: Tekhnicheskie nauki*, 3(144), 22–28. https://doi.org/10.32743/UniTech.2024.144.3.22232

23. Asamatdinov, A. O., Dzhaksymuratov, K. M., & Yessenbaev, G. R. (2025). The study of groundwater in the Karauzyak district for the sustainable development of human settlements. *Science and Education in Karakalpakstan*, 3(1), 31–35.
24. Azhiev, A., Mambetullaeva, S., & Orazbaev, T. (2023). Current state of the soil cover formed on the dried-up bottom of the Aral Sea (Sovremennoe sostoyanie pochvennogo pokrova, obrazovavshegosya na obsokhshem dne Aral'skogo morya in Russian). *Vestnik KKO AN RUz*, 2, 42–49.
25. Ajiev, A., Mambetullaeva, S., & Orazbayev, T. (2023). The current state of the soil cover formed on the dried-up bottom of the Aral Sea. *Lampyrid*, 13, 403–412.

Қарақалпақстан Республикасының жер асты сулары мен топырақтың химиялық қасиеттерін Қараөзек аудандарының мысалында зерттеу

Алим Асаматдинов, Шухрат Муродов, Оралбай Кудияров

Аңдатпа: Бұл мақалада Арал теңізі аймағындағы климаттық құрғақшылық пен су тапшылығының артуы жағдайында Қарақалпақстан Республикасының Қараөзек ауданындағы жер асты сулары мен топырақтарының химиялық қасиеттерін зерттеу нәтижелері ұсынылған. Аймақтың гидрогеологиялық жағдайларына талдау жүргізілді, 20 өндірістік ұңғымадан алынған деректер негізінде жер асты суларының минералдануы мен гидрохимиялық құрамы бағаланды, сондай-ақ тұздану көрсеткіштері мен топырақ профилінің агрохимиялық қасиеттері зерттелді. Гидрохимиялық сипаттамаларды түсіндіру үшін Пайпер диаграммасы қолданылды, бұл жер асты суларының негізгі түрлерін және олардың геохимиялық эволюциясының бағыттарын анықтауға мүмкіндік берді. Ион алмасу, булану концентрациясы және екінші реттік тұздану процестерінен туындаған сулардың химиялық құрамының гидрокарбонат-кальцийден гидрокарбонат-натрийге дейін хлорид-натрийге бірізді түрде өзгеруі анықталды. Зерттелген үлгілердің көпшілігінде натрий мен гидрокарбонат иондарының басым болуы анықталды және жер асты суларының минералдануының артуы мен оның сапасының нашарлауы арасындағы байланыс көрсетілді. Топырақ талдауы сілтілі pH (pH 8,4–9,4), суда еритін тұз мөлшерінің жоғары екенін және қанықкан топырақ сығындысының электр өткізгіштігі мен жалпы тұз мөлшері арасындағы күшті корреляцияны ($R^2 = 0,987$) анықтады. Бұл нәтижелер жер асты суларының гидрогеохимиялық трансформация үдерістері мен топырақтың екінші реттік тұзденуы арасындағы тығыз байланысты көрсетеді. Бұл зерттеудің практикалық маңыздылығы жер асты суларын бақылауды жақсарту, экологиялық тәуекелдерді бағалау және Арал теңізі аймағының экологиялық дағдарысы жағдайында су ресурстарын тұрақты басқару шараларын әзірлеу үшін осы заңдылықтарды пайдалану мүмкіндігінде жатыр.

Түйін сөздер: жер асты сулары; Қараөзек ауданы; Қарақалпақстан Республикасы; гидрохимиялық құрамы; минералдануы; топырақтың тұзденуы; электр өткізгіштігі; Пайпер диаграммасы; гидрогеохимиялық трансформация; Арал теңізі аймағы.

Study of the chemical properties of groundwater and soil in the Republic of Karakalpakstan on the example of the Karauzyak district

Alim Asamatdinov, Shukhrat Murodov, Oralbay Kudiyarov

Abstract: This article presents the results of a study of the chemical properties of groundwater and soils in the Karauzyak district of the Republic of Karakalpakstan under conditions of increasing climatic aridity and water shortages in the Aral Sea region. An analysis of the hydrogeological conditions of the region was conducted, an assessment of the mineralization and hydrochemical composition of groundwater was made based on data from 20 production wells, and salinization indicators and the agrochemical properties of the soil profile were also investigated. A Piper diagram was used to interpret the hydrochemical characteristics, allowing us to identify the main types of groundwater and the directions of their geochemical evolution. A consistent transformation of the chemical composition of the waters from hydrocarbonate-calcium through hydrocarbonate-sodium to chloride-sodium was revealed, caused by the processes of ion exchange, evaporative concentration, and secondary salinization. The predominance of sodium and hydrocarbonate ions was established in most of the studied samples, and a relationship was demonstrated between the increase in groundwater mineralization and the deterioration of its quality. Soil analysis revealed an alkaline pH (pH 8.4–9.4), elevated water-soluble salt content, and a strong correlation between the electrical conductivity of the saturated soil extract and the total salt content ($R^2 = 0.987$). These results demonstrate a close relationship between the processes of hydrogeochemical transformation of groundwater and secondary soil salinization. The practical significance of this study lies in the potential use of these patterns to improve groundwater monitoring, assess environmental risks, and develop measures for sustainable water resource management in the context of the Aral Sea region's environmental crisis.

Keywords: groundwater; Karauzyak district; Republic of Karakalpakstan; hydrochemical composition; mineralization; soil salinization; electrical conductivity; Piper diagram; hydrogeochemical transformation; Aral Sea region.

IRSTI 31.23.01
Chemistry
Article

Comprehensive study of *Achillea millefolium* L. roots using IR spectroscopy, GC–MS, and biological tests

Aizhan Yelshibayeva[1], Zharkyn Zhumagaliyeva[2], Aigul Kaldybayeva[3], Gulim Mukusheva[4], Bernadeth Ticar[5], Roza Jalmakhanbetova[1]*

[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; individ.931@gmail.com, rjalmakhanbetova@gmail.com
[2] Pedagogical Institute, Astana International University, Astana, Kazakhstan; zharkyn.73@mail.ru
[3]Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty, Kazakhstan; aigul_240873@mail.ru
[4] Karaganda National Research University named after Academician E.A. Buketov, Karaganda, Kazakhstan; mukusheva1977@list.ru
[5]Iloilo Science and Technology University, Iloilo City, Philippines; bernadeth.ticar@isatu.edu.ph
*Correspondence: rjalmakhanbetova@gmail.com

Abstract: This paper presents a comprehensive study of the underground organs of *Achillea millefolium* L. using gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS), infrared (IR) spectroscopy, and biological tests. The GC–MS results show that the chemical composition of the ethanol extract includes aliphatic acids and their esters, phenolic compounds, flavonoids, and carbohydrates. The main components are 1,3-dihydroxyacetone, octanoic acid, ethyl ester of hexadecanoic acid, eupatilin, and jaceosidin. The IR spectra confirm the presence of aliphatic, carbonyl, and phenolic functional groups characteristic of lipophilic and polar metabolites. The extract exhibited moderate antimicrobial activity against *Staphylococcus aureus* and *Bacillus subtilis*, which is associated with the presence of phenolic and flavonoid compounds, as well as moderate cytotoxicity in the *Artemia salina* test ($LD_{50} \approx 82$ μg/mL). The results indicate that the underground organs of *A. millefolium* accumulate lipophilic and phenolic metabolites that determine the antimicrobial and cytotoxic activities of the plant. These findings expand our understanding of the metabolism of common yarrow and confirm the potential of its roots as a source of natural biologically active substances.

Keywords: *Achillea millefolium*; GC–MS; IR spectroscopy; component composition; antimicrobial activity; cytotoxicity

Citation: Yelshibayeva, A., Zhumagaliyeva, Z., Kaldybayeva, A, Mukusheva, G., Ticar, B., Jalmakhanbetova, R. (2026). Comprehensive study of Achillea millefolium L. roots using IR spectroscopy, GC–MS, and biological tests. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 155(2), 31-43. https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-31-43

Academic Editor:
E.E. Kopishev

Received: 22.10.2025
Revised: 01.04.2026
Accepted: 22.04.2026
Published: 30.06.2026

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 genus *Achillea* L. (yarrow) comprises about 150 species distributed across the Northern Hemisphere, with the greatest diversity found in Europe, Central Asia, and North America (Ehrendorfer & Guo, 2005; Anderberg et al., 2007). Of these, 14 species and one hybrid are found in Kazakhstan (Kulemin, Y., & Kupriyanov, A., 2023). Scientific studies of the Achillea genus have shown that the chemical composition

of the plant is rich in sesquiterpene lactones, flavonoids, coumarins, phenolic acids, sterols, and saponins, as well as other components with a lower content (Si et al., 2006).

Among the variety of *Achillea* species, *Achillea millefolium* L occupies a special place. It has been widely used to heal wounds and treat inflammatory diseases (Dorjsembe et al., 2017), as well as an infusion for bleeding, stomach pain, and menstrual cramps (European Medicines Agency [EMA], 2020). It is known that common yarrow is used as a medicinal plant raw material that contains a wide range of biologically active compounds: essential oil, the alkaloid achillein, flavonoids, coumarins, bitter and tannic substances, resins, organic acids, ascorbic acid, phylloquinone, carotene, choline, and mineral components (Komarov, 2018; Shatalina et al., 2002; Gawel-Beben et al., 2020). Among the phenolic acids in common yarrow, 3-, 4-, and 5-caffeoylquinic, chlorogenic, coumaric acids, and cynarin are distinguished, and among flavonoids: quercetin, rutin, luteolin, apigenin (Figure 1), and their glycosides. Their content depends significantly on the plant organ (leaves, flowers, roots) and environmental factors (Gharibi et al., 2015; Benedek & Kopp, 2007). These compounds directly influence the biological activity of the extracts.

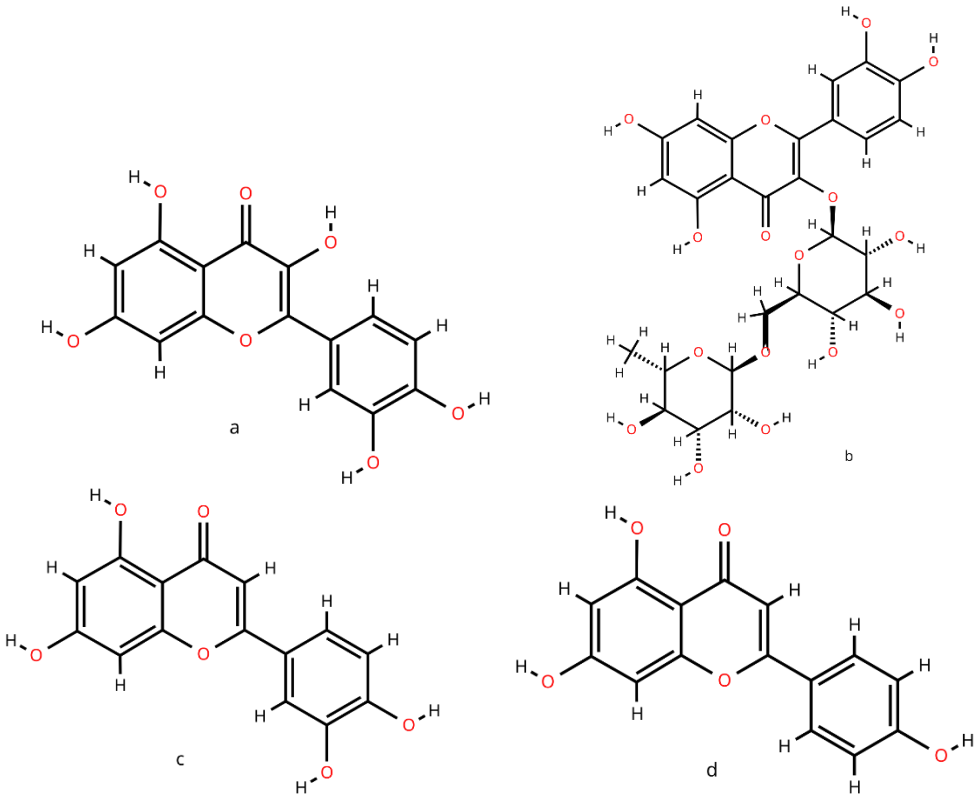


Figure 1. Chemical structures of flavonoids: quercetin (a), rutin (b), luteolin (c), apigenin (d)

Essential oils from the flowers and leaves of common yarrow exhibit antimicrobial and antioxidant activity. It is noteworthy that essential oil obtained from flowers demonstrated more pronounced antimicrobial and antioxidant properties compared to oil from leaves (Ahmadi-Dastgerdi et al., 2017). The ethanol extract of the aerial parts also showed significant antioxidant (Mohamed et al., 2018) and antifungal activity (Ruiz-Navajas et al., 2013). However, it should be noted that the chemical composition of yarrow essential oils varies greatly depending on geographical and environmental conditions. Studies have revealed the existence of different chemotypes, differing in the ratio of the main terpene components, such as camphor, 1,8-cineole, and borneol (Benedek et al., 2007). This highlights the importance of conducting regional studies on the composition and properties of yarrow, including in Kazakhstan. Such geographically determined variability can be traced not only in the composition of essential oils but also in the phenolic content of *A. millefolium*. Recent studies have shown that plants collected in different climatic regions form significantly

different content of phenolic compounds. The differences affect both the qualitative and quantitative composition of phenolic acids and flavonoids, which directly influence the antioxidant activity of extracts. The authors explain these differences by the adaptation of plants to local environmental factors, such as soil type, light intensity, and temperature regime (Radušienė et al., 2023; Asensio et al., 2020). Taken together, these data highlight the need for comprehensive regional studies aimed at investigating the chemical composition and biological activity of yarrow under different growing conditions.

Scientific studies focused on the roots of common yarrow have been less extensively researched. Among them, it is known that lipophilic amides are present in higher concentrations in the roots than in the above-ground parts (Veryser et al., 2016). An early study (Lourenço et al., 1999) showed that the essential oil studied by GC–MS is rich in sesquiterpenes and, unlike the above-ground parts, azulenes and camphor predominate in the roots.

Despite the existence of publications on the chemical composition and biological activity of A. millefolium from Kazakhstan, they mainly cover the above-ground organs during the flowering period. In this regard, this study was the first to investigate the chemical composition using IR spectroscopy and GC–MS methods, as well as the cytotoxic and antimicrobial activities of extracts from the roots (underground parts) of yarrow collected in Kazakhstan.

2. Materials and methods

2.1. Research material

The research material consisted of the roots of *A. millefolium* collected in the outskirts of Astana, Kazakhstan (51.070951° N, 71.334599° E) in June 2023. The sampling site was located in a peripheral green area at a distance from major industrial facilities and high-traffic roads. The underground parts were separated from the above-ground parts and dried in the air at room temperature in the shade until they were air-dry.

2.2. Preparation of the extract

The dried and crushed roots of *A. millefolium* were extracted with ethanol under a reflux condenser. A sample of raw material (20 g) was placed in a 500 ml round-bottom flask, 200 ml of ethanol was added at a ratio of raw material: solvent = 1:10, and heated in a water bath for 2 hours. The extraction was carried out three times. The condensate was returned to the flask through a reflux condenser, ensuring continuous extraction. After cooling, the mixture was filtered, and the filtrate was concentrated on a rotary evaporator at 35–40 °C until a thick extract was obtained. The remaining extract was dried to a constant weight and stored in a sealed container at room temperature until analytical studies were performed.

2.3. GC–MS analysis

Gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) was performed using an Agilent 7890A gas chromatograph with an Agilent 5975C mass-selective detector operating in 70 eV electron impact ionisation mode. The percentage content of the component composition was calculated automatically using the GS-MSDDataAnalysis program, based on the peak areas of the total ion chromatogram. Identification was performed based on mass spectra and retention times using the NIST 08 library.

2.4. IR spectroscopy

The IR spectra of the alcohol extract of common yarrow were recorded on a Bruker Alpha II FTIR spectrometer with an ATR attachment (Platinum Diamond 1 Refl). The measurement range was between 4000 and 400 cm^{-1}.

2.5. Determination of antimicrobial activity

The antimicrobial activity of common yarrow extract was evaluated using standard reference test microorganisms: facultative anaerobic Gram-positive cocci *Staphylococcus aureus* ATCC 6538,

aerobic Gram-positive spore-forming bacilli *Bacillus subtilis* ATCC 6633, Gram-negative facultative anaerobic bacilli *Escherichia coli* ATCC 25922, aerobic Gram-negative rods *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853, as well as the yeast fungus *Candida albicans* ATCC 10231. The study used the serial dilution method with determination of the minimum inhibitory concentration (MIC) (State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan 2015; Mironov A.N. 2012). All test strains were obtained from the American Type Culture Collection. Ceftriaxone (antibacterial control) and nystatin (antimycotic control) were used as reference drugs.

The MIC was determined by serial dilution of ethanol solutions of the test sample in nutrient broth. For the experiment, a suspension of microorganisms with a concentration of 10^6 CFU/ml was prepared from daily cultures grown on skimmed agar at 37 °C (for the yeast fungus *C. albicans*, at 30 °C for 48 hours). The tests were carried out in the concentration range of 1.56–50 μg/ml. 0.1 ml of microbial suspension was added to each test tube with the sample dilution. The control samples contained only microbial suspension and nutrient medium without the addition of the test sample.

Incubation was carried out at 37 °C for 24–48 hours, depending on the type of microorganism. The presence or absence of growth was determined visually by the turbidity of the medium. The minimum concentration of the sample at which no growth was observed (the medium remained clear) was taken as the MIC. To increase the reliability of the results, the values were averaged based on the results of three independent experiments

2.6. Determination of cytotoxicity

The cytotoxic activity of the sample was assessed in a survival test using *Artemia salina* larvae (Sarah et al., 2017). Two-day-old larvae obtained by culturing eggs in artificial seawater for 48 hours at 37 °C were used for the experiments.

The initial sample weighing 2 mg was dissolved in 2 mL of ethanol. Aliquots of 500 μl, 50 μl, and 5 μl (three parallels) were taken from this solution, and after evaporation of the solvent, 5 ml of artificial seawater was added to each. Thus, the final concentrations were 100, 10, and 1 μg/ml, respectively (each in triplicate).

Ten two-day-old *A. salina* larvae were placed in each test tube. Incubation was carried out at room temperature in the light for 24 hours. At the end of the experiment, the number of live and dead larvae was counted. Based on the data on the upper and lower toxic limits, the median toxic dose (LD_{50}) was calculated.

Equivalent volumes of DMSO were used as a negative control, and dactinomycin (actinomycin D), which has pronounced cytotoxic activity, served as a positive control. Statistical processing of the data was performed using the FIN programme. All experiments were carried out in triplicate (n = 3). The results are presented as mean ± standard deviation (SD).

3. Results

Gas chromatographic analysis of the ethanol extract *of A. millefolium* roots revealed 25 volatile and semi-volatile compounds of various chemical natures. Table 1 shows the main components with retention times and relative peak areas.

Table 1. GC–MS results for ethanol extract of *A. millefolium* roots

Peak No	Retention time (RT, min)	Area (%)	Name of compound
1	4.803	5.20	carbonyl sulfide
2	5.177	3.71	dimethyl sulfoxide
3	5.705	22.74	1,3-dihydroxypropan-2-one

4	7.081	4.97	2-fluoro-2-methylpropane
5	9.314	1.02	2-hydroxy-3,4-dimethylcyclopent-2-en-1-one
6	10.051	3.77	chlorocyanide
7	10.733	2.32	2,4-difluorobenzenecarbohydrazide
8	11.811	0.61	benzene-1,3,5-triol (phloroglucinol)
9	12.075	2.14	3-methyl-1,3-thiazolidine
10	12.824	1.04	1-methoxy-2,4-difluorobenzene
11	13.869	3.22	n′-(2-ethoxybenzylidene)-4-methylbenzenesulfonohydrazide
12	15.233	1.15	1-chloro-2-methoxybenzene
13	15.299	2.64	β-d-fructofuranosyl α-d-glucopyranoside (sucrose)
14	15.772	2.95	4-(furan-2-yl) but-3-en-2-one
15	17.411	5.13	3-methyltetrahydrothiophene
16	17.543	3.81	1-o-dodecyl-α-d-ribofuranoside
17	17.609	4.73	octanoic acid
18	17.851	4.03	formohydrazide
19	20.228	0.53	1,1-diphenylethene
20	23.859	1.09	ethyl hexadecanoate
21	24.607	6.04	(e)-2,4-dimethoxy-5-ethoxy-1-ethenyl-3-methylbenzene
22	26.917	4.20	4',5,7-trihydroxy-3',6-dimethoxyflavone (jaceosidin)
23	28.017	7.03	5,7-dihydroxy-3',4',6-trimethoxyflavone (eupatilin)
24	30.856	1.11	1′,4′-dimethoxy-[2,2′]-binaphthalene-1,4-dione
25	31.318	4.80	5,5′-dihydroxy-3,3′-dimethyl-[2,2′]-binaphthalene-1,1′,4,4′-tetrone

According to GC–MS analysis, the chemical profile of *A. millefolium* extract is characterized by the predominance of primary metabolites, including carbohydrates, low-molecular oxygen-containing compounds, fatty acids, and sulfur-containing metabolites. The major primary metabolite was 1,3-dihydroxypropan-2-one (22.74 %), while octanoic acid (4.73 %) and 3-methyltetrahydrothiophene (5.13 %) were also detected in significant amounts.

At the same time, several secondary metabolites were identified, mainly represented by methoxylated flavonoids. Among them, jaceosidin (4.2 %) and eupatilin (7.03 %) were the dominant secondary metabolites (Figure 2). The presence of these flavonoids confirms the contribution of secondary phenolic metabolism to the biological activity of the extract.

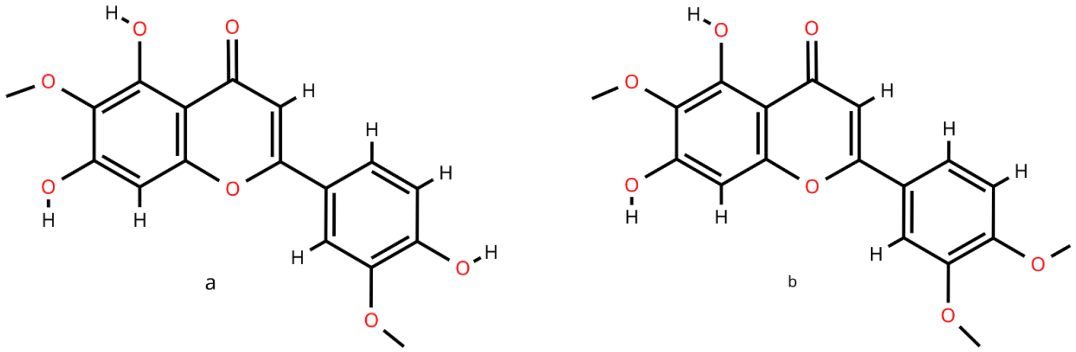


Figure 2. Chemical structures of the secondary metabolites jaceosidin (a) and eupatilin (b)

IR spectroscopic analysis of the *A. millefolium* roots extract revealed a number of characteristic absorption bands reflecting the presence of major classes of organic compounds. An intense broad band at 3286 cm^{-1} corresponds to the stretching vibrations of hydroxyl groups (–OH), indicating a high content of phenolic compounds and alcohols. Peaks in the range 2918–2850 cm^{-1} are attributed to C–H stretching vibrations of methyl and methylene groups characteristic of aliphatic structures, including fatty acids and their esters. A pronounced absorption band at 1712 cm^{-1} corresponds to C=O stretching vibrations, indicating the presence of esters, aldehydes, ketones, and phenolic acids. Bands at 1600 cm^{-1} and in the 1516–1378 cm^{-1} region are associated with aromatic ring vibrations, confirming the presence of flavonoids and other aromatic phenolic compounds. Intense bands at 1251 and 1041 cm^{-1} correspond to C–O stretching vibrations characteristic of alcohols, phenols, and simple esters. Absorptions in the low-frequency region (877–816 and 419 cm^{-1}) are attributed to deformation vibrations of aromatic and aliphatic fragments, indicating structural diversity of the detected metabolites (Figure 3).

Consequently, spectral analysis of the underground part of *A. millefolium* indicates a high content of phenolic compounds, fatty acids and their esters, as well as flavonoid derivatives. These results are consistent with the GC–MS data, which show the predominance of aliphatic acids and flavonoid compounds in the root extract.

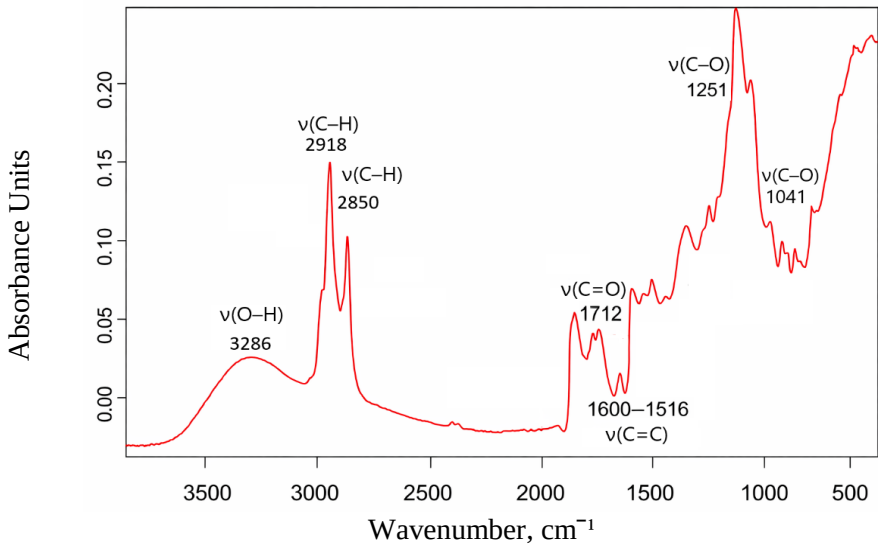


Figure 3. IR spectrum of the extract from the underground part of *A. millefolium*

The antimicrobial activity of the *A. millefolium* plant sample demonstrates selective activity mainly against Gram-positive microorganisms, especially *B. subtilis* (MIC = 12.5 ± 0.1 μg/ml), as well as against *S. aureus* (MIC = 25 ± 0.02 μg/ml). The activity against *E. coli* is weaker (MIC = 50

± 0.25 μg/ml), while there is no activity against *P. aeruginosa* and *C. albicans* (Table 2). In this analysis, the antibacterial drug ceftriaxone and the antifungal drug nystatin were used as comparators.

Table 2. Antimicrobial activity of *A. millefolium* extract expressed as minimum inhibitory concentration (MIC, mg/mL) against reference bacterial and fungal strains

Sample	*Staphylococcus aureus ATCC 6538*	*Bacillus subtilis ATCC 6633*	*Escherichia coli ATCC 25922*	*Pseudomonas aeruginosa ATCC 27853*	*Candida albicans ATCC 10231*
extract	25 ± 0.02	12.5 ± 0.1	50 ± 0.25	-	-
ceftriaxone	6.3 ± 0.05	12.5 ± 0.2	6.3 ± 0.04	12.5 ± 0.16	-
nystatin	-	-	-	-	12.5 ± 0.02

Results of testing the cytotoxic activity of the sample against *A. salina* larvae under *in vitro* cultivation conditions. *A. millefolium* extract demonstrated moderate cytotoxic activity in the *A. salina* larvae test. The LD_{50} value was 82.4 ± 3.3 μg/ml, indicating a pronounced but less potent effect compared to the reference drug dactinomycin (LD_{50} = 45.8 ± 1.2 μg/ml).

4. Discussion

The obtained GC–MS data are consistent with literature reports indicating that the phytochemical composition of A. millefolium is strongly organ-dependent, with different morphological parts accumulating distinct classes of secondary metabolites (Ali et al., 2017; Radušienė et al., 2023). According to Platonov et al. (2020), GC–MS analysis of the n-hexane extract of the aerial part allowed the identification of 110 compounds, with a predominance of hydrocarbons, terpenoids, sterols and other lipophilic constituents, whereas phenolic compounds were present only in trace amounts. In contrast, the present study demonstrates that the root extract is characterized by a higher contribution of fatty acids and their esters, together with phenolic compounds and methoxylated flavonoids. The detection of eupatilin and jaceosidin in underground organs is particularly significant, as these flavonoids exhibit pronounced anticancer and anti-inflammatory activities (Nageen et al., 2021; Mohamed et al., 2018; Lee et al., 2024), and their presence suggests common biosynthetic pathways of phenolic metabolites throughout the plant, confirming the involvement of roots in antioxidant protection. In addition, fatty acids and their esters, including hexadecanoic acid ethyl ester, contribute to membrane stabilization and energy storage, which is typical for underground organs.

A noteworthy feature of the chemical profile is the predominance of 1,3-dihydroxypropan-2-one (22.74 %), together with readily soluble carbohydrates (sucrose and monosaccharides), indicating adaptive metabolic strategies related to energy supply and osmotic regulation under soil-related stress conditions (Ciriminna et al., 2018). Dihydroxyacetone is industrially produced mainly via glycerol fermentation (Zhou et al., 2016); therefore, the relatively high proportion detected in the root extract suggests that A. millefolium underground organs may represent a potential alternative natural source of this compound. However, further quantitative validation and isolation studies are required to confirm its actual content and evaluate its practical feasibility.

To verify the GC–MS identification of the major classes of compounds, the IR spectral data were correlated with the detected metabolites in Table 3.

Table 3. Correlation of IR spectral features with GC–MS-identified compounds in the root extract of *A. millefoilum*

FT-IR absorption band (cm^{-1})	Vibrational assignment	Functional groups	Compound classes identified by GC–MS	Representative compounds (GC–MS)	Interpretative relevance
3286	ν(O–H) stretching	Phenolic and alcoholic hydroxyl groups	Phenolic compounds, flavonoids, polyphenols	Phloroglucinol; jaceosidin; eupatilin	Confirms the presence of phenolic and flavonoid structures
2918, 2850	ν(C–H) stretching	Aliphatic –CH_2 and –CH_3 groups	Fatty acids, esters, lipophilic glycosides	Octanoic acid; ethyl hexadecanoate; ribofuranoside derivatives	Indicates dominance of lipophilic metabolites
1712	ν(C=O) stretching	Carbonyl groups of acids and esters	Fatty acids, esters, ketones, quinones	Octanoic acid; ethyl hexadecanoate; binaphthalene-diones	Supports GC–MS identification of carbonyl-containing compounds
1600–1516	ν(C=C) stretching	Aromatic ring vibrations	Flavonoids and aromatic phenolic compounds	Jaceosidin; eupatilin	Confirms aromatic and polyphenolic structures
1251	ν(C–O) stretching	Phenolic and ether C–O bonds	Methoxylated flavones, phenols, esters	Eupatilin; jaceosidin; dimethoxy aromatic derivatives	Indicates methoxy-substituted phenolic compounds
1041	ν(C–O) stretching	Alcohols and glycosidic bonds	Carbohydrates and glycoside derivatives	Sucrose; ribofuranoside derivatives	Confirms presence of carbohydrate-related components

The consistency between IR absorption bands and GC–MS-identified compounds confirms the predominance of lipophilic and phenolic metabolites in the roots of *A. millefolium*.

The ethanol extract of *A. millefolium* roots showed moderate antimicrobial activity against the Gram-positive bacteria *S. aureus* and *B. subtilis*, while its effect on *E. coli*, *P. aeruginosa*, and *C. albicans* was insignificant. A similar activity ratio was previously observed by Candan et al. (2003) for methanol and ethanol extracts of the aerial parts of *A. millefolium*. The predominant sensitivity of Gram-positive strains is explained by the structure of their cell wall and greater accessibility of targets for phenolic and flavonoid compounds. According to the literature (Lee et al., 2023), the flavones eupalatin and jaceozidin, as well as phenolic acids characteristic of the genus *Achillea*, have a membrane-tropic effect, causing destabilisation of the lipid layer of *S. aureus* cell membranes. This is consistent with the results of GC–MS analysis of the roots, where these compounds were identified.

The absence of antimicrobial activity against *E. coli* and *P. aeruginosa* correlates with the high resistance of Gram-negative bacteria to lipophilic metabolites (Özkan et al., 2016). The results

obtained confirm that the biological activity of the root extract of *A. millefolium* is mainly due to the presence of flavonoids and phenolic compounds that act on Gram-positive microorganisms.

In a toxicity test with *A. salina* crustaceans, *A. millefolium* root extract showed moderate toxicity: the LD_{50} value was approximately 82 μg/ml. This indicates significant biological activity, but not pronounced toxicity. Similar results have been reported by other authors: methanol and ethanol extracts of *A. millefolium* showed toxicity in the range of 50–100 μg/ml, which is associated with the presence of phenolic and flavonoid compounds (García-Risco et al., 2017).

Phenolic compounds and flavones can disrupt cell membranes, cause oxidative stress, and thus exhibit moderate cytotoxicity. According to GC–MS data, eupalatine and jaceosidin, flavones known as active components of the Artemisia and *Achillea* genera, were found in the composition of common yarrow extract (Lee et al., 2023). These compounds have been shown in cell models to induce apoptosis and inhibit tumour cell growth (Nageen et al., 2021). Therefore, it can be assumed that they contribute to the observed toxicity in the *A. salina* test.

5. Conclusion

This study is the first to examine the underground parts of *A. millefolium* collected in Astana (Kazakhstan). Gas chromatography and IR spectroscopy analysis of the ethanol extract of the roots showed that its composition consists of aliphatic acids, their esters, phenolic compounds, and flavonoids. The main components are 1,3-dihydroxyacetone, octanoic acid, ethyl ester of hexadecanoic acid, eupatilin, and jaceosidin. The identified phenolic and flavonoid metabolites provide antimicrobial activity, mainly against Gram-positive bacteria. The extract showed moderate cytotoxicity ($LD_{50} \approx 82$ μg/mL), indicating the presence of biologically active but non-toxic compounds. The obtained data indicate that the underground organs of *A. millefolium* are a source of lipophilic and phenolic metabolites that determine the antimicrobial and cytotoxic activities of the extract and are of interest for further pharmacological studies.

6. Supplementary Materials: No supplementary material.

7. Author Contributions

Conceptualization – Y.A., R.J.; methodology – Y.A., R.J.; software – Y.A.; validation – R.J., G.M.; formal analysis – Y.A.; investigation – Y.A., R.J., G.M., Zh.Zh., A.K.; resources – Y.A., R.J.; data curation – R.J., G.M., B.T; writing - original draft preparation – Y.A.; writing - review and editing – R.J., G.M., B.T., Zh.Zh., A.K.; visualisation – Y.A. R.J.; supervision – R.J. G.M., B.T; project administration – R.J., G.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information

Yelshibayeva, Aizhan – PhD student of the educational program: "D089-Chemistry", L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; individ.931@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0830-2946

Zhumagaliyeva, Zharkyn – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Astana International University, Kabanbay Batyr Avenue, 8, Astana, Kazakhstan, 010000; zharkyn.73@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-0993-008X

Kaldybayeva, Aigul - Candidate of Chemical Sciences, Professor, Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Tole bi st., 94, Almaty, Kazakhstan, 050000; aigul_240873@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9328-457X

Mukusheva, Gulim – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, E.A. Buketov Karaganda National Research University, Mukanov st., 41, Karaganda, Kazakhstan, 100024; mukusheva1977@list.ru, https://orcid.org/0000-0001-6706-4816

Ticar, Bernadeth – PhD, Professor, Iloilo Science and Technology University, Burgos St, La Paz, Iloilo City, Philippines, 5000; bernadeth.ticar@isatu.edu.ph, https://orcid.org/0000-0001-7151-9107

Jalmakhanbetova, Roza – Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; rjalmakhanbetova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9937-275X

9. Funding: This research received no external funding

10. Acknowledgments: None.

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

12. References

1. Ahmadi-Dastgerdi, A., Ezzatpanah, H., Asgari, S., Dohani, S., & Rahimi, E. (2017). Phytochemical, antioxidant and antimicrobial activity of essential oil from flowers and leaves of common yarrow (*Achillea millefolium* subsp. *millefolium). Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 20(2), 395–409. https://doi.org/10.1080/0972060X.2017.1280419
2. Ali, S. I., Gopalakrishnan, B., & Venkatesalu, V. (2017). Pharmacognosy, phytochemistry and pharmacological properties of *Achillea millefolium* L.: A review. *Phytotherapy Research*, 31(8), 1140–1161. https://doi.org/10.1002/ptr.5840
3. Anderberg, A. A., Baldwi, B. G., Bayer, R. G., Breitwieser, J., Jeffrey, C., Dillon, M. O., Eldenäs, P., Funk V., Gar-cia-Jacas, N., Hind, D. J. N., Karis, P. O., Lack, H. W., Nesom, G., Nordenstam, B., Oberprieler, Ch., Panero, J. L., Puttock, C., Robinson, H., Stuessy, T. F., Susanna, A., Urtubey, E., Vogt, R., Ward, J., & Watson, L. E. (2007). Flowering Plants: Eudicots - Asterales. In *Compositae. The families and genera of vascular plants. Vol. VIII. Flowering plants. Eudicots. Asterales* (Vol. 8, pp. 61–558). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-31051-8_7
4. Asensio, E., Vitales, D., Pérez, I., Peralba, L., Viruel, J., Montaner, C., Vallès, J., Garnatje, T., & Sales, E. (2020). Phenolic compounds content and genetic diversity at population level across the natural distribution range of bearberry (Arctostaphylos uva-ursi, Ericaceae) in the Iberian Peninsula. *Plants*, 9(9), 1250. https://doi.org/10.3390/plants9091250
5. Benedek, B., & Kopp, B. (2007). *Achillea millefolium* L. s.l. revisited: Recent findings confirm the traditional use. *Wiener Medizinische Wochenschrift,* 157(13–14), 312–314. https://doi.org/10.1007/s10354-007-0431-9
6. Candan, F., Unlu, M., Tepe, B., Daferera, D., Polissiou, M., Sökmen, A., & Akpulat, H. (2003). Antioxidant and antimicrobial activity of the essential oil and methanol extracts of *Achillea millefolium* subsp. millefolium Afan. (Asteraceae). *Journal of Ethnopharmacology*, 87(2–3), 215–220. https://doi.org/10.1016/s0378-8741(03)00149-1
7. Ciriminna, R., Fidalgo, A., Ilharco, L. M., & Pagliaro, M. (2018). Dihydroxyacetone: an updated insight into an important bioproduct. *ChemistryOpen*, 7(3), 233–236. https://doi.org/10.1002/open.201700201
8. Dorjsembe, B., Lee, H. J., Kim, M., Dulamjav, B., Jigjid, T., & Nho, C. W. (2017). *Achillea asiatica* extract and its active compounds induce cutaneous wound healing. *Journal of Ethnopharmacology*, 206, 306–314. https://doi.org/10.1016/j.jep.2017.06.006
9. Ehrendorfer, F., & Guo, Y. P. (2005). Changes in the circumscription of the genus Achillea (Compositae-Anthemideae) and its subdivision. *Willdenowia*, 35(1), 49-54. https://doi.org/10.3372/wi.35.35102
10. European Medicines Agency. (2020). *European Union herbal monograph on Achillea millefolium L., herba (Revision 1) (EMA/HMPC/376415/2019).* https://www.ema.europa.eu/en/medicines/herbal/millefolii-herba#documents

11. García-Risco, M. R., Mouhid, L., Salas-Pérez, L., López-Padilla, A., Santoyo, S., Jaime, L., Ramírez de Molina, A., Reglero, G., & Fornari, T. (2017). Biological activities of Asteraceae (*Achillea millefolium* and *Calendula officinalis*) and Lamiaceae (*Melissa officinalis* and *Origanum majorana*) Plant Extracts. *Plant foods for human nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 72(1), 96–102. https://doi.org/10.1007/s11130-016-0596-8
12. Gawel-Beben, K., Strzemska-Gomulka, M., Chop, M., Sakipova, Z., Glowniak, K., & Kukula-Koch, W. (2020). *Achillea millefolium* L. and *Achillea biebersteinii* Afan. hydro-glycolic extracts - bioactive ingredients for cosmetic applications. *Molecules*, 25(15), 3368. https://doi.org/10.3390/molecules25153368
13. Gharibi, S., Tabatabaei, B. E. S., Saeidi, G., Goli, S. A. H., & Talebi, M. (2013). Total phenolic content and antioxidant activity of three Iranian endemic Achillea species. *Industrial Crops and Products*, 50, 154–158. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.038
14. Komarov, B. A. (2018). The elemental composition of yarrow (Elementnyi sostav tysyachelistnika in Russian). *Drug development & registration*, 3, 158–161.
15. Konarska, A., Weryszko-Chmielewska, E., Materska, M., Sulborska-Różycka, A., Dmitruk, M., & Chilczuk, B. (2025). Phenolic compounds in flowers and herb of *Achillea millefolium* L.: histochemical and phytochemical studies. *Molecules*, 30(9), 2084. https://doi.org/10.3390/molecules30092084
16. Kulemin, Y., & Kupriyanov, A. (2023). Botanical-geographical analysis of yarrows (*Achillea L. - Asteraceae*) of Siberia and Kazakhstan (Botaniko-geograficheskiy analiz tysyachelistnika (*Achillea L. - Asteraceae*) Sibiri i Kazakhstana in Russian). *Natural and Technical Sciences*, 12(187). https://doi.org/10.25633/etn.2023.12.09
17. Lee, B. E., Park, S. J., Kim, G. H., Joo, D. C., & Lee, M. W. (2024). Anti-inflammatory effects of eupatilin on *Helicobacter pylori* CagA-induced gastric inflammation. *PLoS ONE*, 19(11). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313251
18. Lee, S., Won, H. J., Ban, S., Park, Y. J., Kim, S. M., Kim, H. S., Choi, J., Kim, H., Lee, J. H., & Jung, J. H. (2023). Integrative analysis of metabolite and transcriptome reveals biosynthetic pathway and candidate genes for eupatilin and jaceosidin biosynthesis in *Artemisia argyi*. *Frontiers in Plant Science*, 14. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1186023
19. Lourenço, P., Figueiredo, A., Barroso, J., Pedro, L., Oliveira, M., Deans, S., & Scheffer, J. (1999). Essential oils from hairy root cultures and from plant roots of *Achillea millefolium*. *Phytochemistry*, 51(5), 637–642. https://doi.org/10.1016/s0031-9422(99)00083-7
20. Mironov, A. N., & Bunatyan, N. D. (2012). Guidelines for conducting preclinical studies of drugs - Part 1 (Rukovodstvo po provedeniyu doklinicheskikh issledovaniy lekarstvennykh sredstv. Chast' pervaya). *GRIF-K: Moscow, Russia*, 510.
21. Mohamed, D. A., Hanfy, E. A., & Fouda, K. (2018). Evaluation of antioxidant, anti-inflammatory and anti-arthritic activities of yarrow (*Achillea millefolium*). *Journal of Biological Sciences*, 18(7), 317–328. https://doi.org/10.3923/jbs.2018.317.328
22. Mostafa, S., Wang, Y., Zeng, W., & Jin, B. (2022). Floral scents and fruit aromas: functions, compositions, biosynthesis, and regulation. *Frontiers in Plant Science*, 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.860157
23. Nageen, B., Rasul, A., Hussain, G., Shah, M. A., Anwar, H., Hussain, S. M., Uddin, M. S., Sarfraz, I., Riaz, A., & Selamoglu, Z. (2021). Jaceosidin: a natural flavone with versatile pharmacological and biological activities. *Current pharmaceutical design*, 27(4), 456–466. https://doi.org/10.2174/1381612826666200429095101
24. Platonov V.V., Dunaev V.A., Sukhikh G.T., Volochaeva M.V., Frankevich V.E., Datieva F.S. (2020). Chromato-Mass-Spectrometry of hexane extract of common yarrow (*Achillea millefolium* l., Asteraceae family - Asterace) *(Khromato-mass-spektrometriya geksanovogo ekstrakta tysyachelistnika obyknovennogo (Achillea millefolium L., semeystvo astro-vye - asterace) (soobshchenie I)). Journal of New Medical Technologies*, 27(4), 82-86.

25. Radušienė, J., Karpavičienė, B., Raudone, L., Vilkickyte, G., Çırak, C., Seyis, F., Yayla, F., Marksa, M., Rimkienė, L., & Ivanauskas, L. (2023). Trends in phenolic profiles of *Achillea millefolium* from different geographical gradients. *Plants*, 12(4), 746. https://doi.org/10.3390/plants12040746
26. Ruiz-Navajas, Y., Viuda-Martos, M., Sendra, E., Perez-Alvarez, J. A., & Fernández-López, J. (2013). In vitro antioxidant and antifungal properties of essential oils obtained from aromatic herbs endemic to the Southeast of Spain. *Journal of Food Protection*, 76(7), 1218–1225. https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-12-554
27. Sarah, Q. S., Anny, F. C., & Misbahuddin, M. (2017). Brine shrimp lethality assay. *Bangladesh Journal of Pharmacology*, 12(2). https://doi.org/10.3329/bjp.v12i2.32796
28. Shatalina, N. V., Pervishina, G. G., Efremov, A. A., Gordienko G.P., Agafonova E.A., & Goncharov D.V. (2002). Content of some biologically active substances in common yarrow herb (*Achillea millefolium*) growing in Krasnoyarsk region (Soderzhanie nekotorykh biologicheski aktivnykh veshchestv v trave tysyachelistnika obyknovennogo *(Achillea millefolium)*, proizrastayushchego v Krasnoyarskom krae in Russian). *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 3, 13–16.
29. Si, X., Zhang, M., Shi, Q., & Kiyota, H. (2006). Chemical constituents of the plants in the genus *Achillea*. *Chemistry & Biodiversity*, 3(11), 1163–1180. https://doi.org/10.1002/cbdv.200690119
30. *State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan* (Gosudarstvennaya farmakopeya Respubliki Kazakhstan in Russian). (2015). In publishing House "*Zhibek Zholy*" (2nd ed., Vol. 1, p. 720).
31. Veryser, L., Taevernier, L., Wynendaele, E., Verheust, Y., Dumoulin, A., & De Spiegeleer, B. (2016). N-alkylamide profiling of *Achillea ptarmica* and *Achillea millefolium* extracts by liquid and gas chromatography–mass spectrometry. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 7(1), 34–47. https://doi.org/10.1016/j.jpha.2016.09.005
32. Zhou, X., Zhou, X., Xu, Y., & Yu, S. (2016). Improving the production yield and productivity of 1,3-dihydroxyacetone from glycerol fermentation using Gluconobacter oxydans NL71 in a compressed oxygen supply-sealed and stirred tank reactor (COS-SSTR). *Bioprocess and biosystems engineering*, 39(8), 1315–1318. https://doi.org/10.1007/s00449-016-1595-8

Achillea millefolium L. тамырларын ИҚ–спектроскопиясы, ГХ–МС және биологиялық сынақтар арқылы кешенді зерттеу

Айжан Елшібаева, Жарқын Жұмағалиева, Айгуль Калдыбаева, Гулим Мукушева, Бернадет Тикар, Роза Джалмаханбетова

Аңдатпа: Берілген жұмыста *Achillea millefolium* L. өсімдігінің жер асты бөліктері газды хромато-масс-спектрометриясы (ГХ–МС), инфрақызыл (ИҚ) спектроскопия және биологиялық сынақтар әдістерімен кешенді түрде зерттелді. ГХ–МС нәтижелері бойынша этанолдық экстрактың химиялық құрамы алифаттық қышқылдар мен олардың эфирлерін, фенолды қосылыстарды, флавоноидтарды және көмірсуларды қамтитыны анықталды. Негізгі компоненттер ретінде 1,3-дигидроксиацетон, октан қышқылы, гексадекан қышқылының этил эфирі, эупатилин және яцеозидин табылды. ИҚ–спектрлер липофильді және полярлы метаболиттерге тән алифаттық, карбонилді және фенолдық функционалды топтардың бар екенін растады. Экстракт құрамында фенолдық және флавоноидтық қосылыстардың бар болуына байланысты *Staphylococcus aureus* және *Bacillus subtilis* бактерияларына қарсы орташа антимикробтық белсенділік көрсетті. Сонымен қатар, *Artemia salina* асшаяндарымен жүргізілген тест нәтижесі бойынша орташа цитоуыттылық (LD_{50} ≈ 82 мкг/мл) байқалды. Алынған деректер *A. millefolium* өсімдігінің жер асты бөліктері антимикробтық және

цитоуыттылық қасиеттерін айқындайтын липофильді және фенолдық метаболиттерді жинақтайтынын дәлелдейді. Нәтижелер мыңжапырақтың метаболизмін тереңірек түсінуге мүмкіндік беріп, оның тамырларын табиғи биологиялық белсенді заттардың көзі ретінде қолданудың болашағын көрсетеді.

Түйін сөздер: *Achillea millefolium*; ГХ–МС; ИҚ–спектроскопиясы; компоненттік құрамы; микробқа қарсы белсенділік; цитоуыттылық.

Комплексное исследование корней *Achillea millefolium* L. методами ИК–спектроскопии, ГХ–МС и биологических тестов

Айжан Елшібаева, Жаркын Жумагалиева, Айгуль Калдыбаева, Гулим Мукушева, Бернадет Тикар, Роза Джалмаханбетова

Аннотация: В данной работе представлено комплексное исследование подземных органов *Achillea millefolium* L. с использованием газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ–МС), инфракрасной (ИК) спектроскопии и биологических тестов. Результаты ГХ–МС показывают, что химический состав этанольного экстракта включает алифатические кислоты и их эфиры, фенольные соединения, флавоноиды и углеводы. Основными компонентами являются 1,3-дигидроксиацетон, октановая кислота, этиловый эфир гексадекановой кислоты, эупатилин и джацеозидин. ИК-спектры подтверждают наличие алифатических, карбонильных и фенольных функциональных групп, характерных для липофильных и полярных метаболитов. Экстракт проявил умеренную антимикробную активность в отношении золотистого стафилококка (*Staphylococcus aureus*) и сенной палочки (*Bacillus subtilis*), что связано с наличием фенольных и флавоноидных соединений, а также умеренную цитотоксичность в тесте с *Artemia salina* (LD_{50} ≈ 82 мкг/мл). Результаты показывают, что подземные органы *A. millefolium* накапливают липофильные и фенольные метаболиты, определяющие антимикробную и цитотоксическую активность растения. Полученные данные расширяют наши представления о метаболизме тысячелистника обыкновенного и подтверждают потенциал его корней как источника природных биологически активных веществ.

Ключевые слова: *Achillea millefolium;* ГХ–МС; ИК–спектроскопия; компонентный состав; антимикробная активность; цитотоксичность.

IRSTI 61.31.55
Chemistry
Review

Application of Fenton-like systems for wastewater detoxification

Dilnaz Zhenisova, Gulshod Allambergenova, Yerlan Baikenov, Ruslan Safarov*

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; dilnazzhenisova88@gmail.com, gulsodallambergenova@gmail.com, baikenov_yea_1@enu.kz, safarov_rz@enu.kz
*Correspondence: safarov_rz@enu.kz

Abstract: Industrialization has led to severe environmental challenges, primarily the contamination of water bodies with persistent organic pollutants (POPs) such as pharmaceuticals, synthetic dyes, and toxic organic compounds. Conventional treatment methods, including biological processes and coagulation, often prove insufficient for the complete degradation of these chemically stable substances. This review systematically examines the application of Fenton-like systems as a promising advanced oxidation process (AOP) for industrial wastewater detoxification. Specifically, the review aims to compare degradation efficiencies across three priority pollutant classes – toxic organic compounds, synthetic dyes, and pharmaceutical residues – identify the catalytic and operational factors governing process performance, and evaluate techno-economic constraints relevant to industrial scaling. The operational principles and catalytic cycles involving reactive hydroxyl radicals (•OH) are detailed, highlighting the transition from classical homogeneous reactions to more versatile heterogeneous systems. Recent advances demonstrate that utilizing transition metals (Cu, Mn, Ni) and novel materials like metal-organic frameworks (MOFs) and bimetallic oxides allows these processes to operate effectively at near-neutral pH, overcoming the strict acidic limitations of traditional Fenton chemistry. Furthermore, the integration of physical stimuli – such as ultraviolet radiation (photo-Fenton), electricity (electro-Fenton), and ultrasound (sono-Fenton) – is shown to significantly enhance radical generation and mineralization rates for complex molecules. The review provides a comparative analysis of treatment efficiencies, achieving removal rates often exceeding 95 % for various toxic groups. Finally, technical and economic constraints, including sludge formation and energy intensity, are discussed alongside prospects for scaling these technologies for sustainable industrial application.

Keywords: Fenton-like systems; advanced oxidation processes; wastewater treatment; heterogeneous catalysis; organic pollutants; synthetic dyes; pharmaceuticals

Citation: Zhenisova, D., Allambergenova, G., Baikenov, Ye., Safarov, R. (2026). Application of Fenton-like systems for wastewater detoxification. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 155(2), 44-67. https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-44-67

Academic Editor:
E.E. Kopishev

Received: 25.02.2026
Revised: 30.03.2026
Accepted: 17.04.2026
Published: 30.06.2026

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

1.1 Relevance of the problem of pollution and toxic substances in industrial wastewater

Industrialization has become a turning point in human history, providing a powerful impetus for economic growth and technological advancement. However, alongside these positive changes, it has triggered a series of severe environmental consequences. One of the most pressing issues is the environmental pollution caused by industrial effluents. Wastewater generated at industrial facilities, containing pharmaceuticals, toxic organic compounds, and synthetic dyes, poses a substantial threat to both natural ecosystems and human health. Despite the implementation of treatment technologies, toxic compounds frequently continue to enter water bodies, accumulating in the environment and intensifying the ecological burden.

According to a large-scale international study published in 2022 covering 258 rivers across 104 countries, the concentration of at least one active pharmaceutical ingredient (API) exceeded safe levels for aquatic organisms in 25.7 % of the samples (Wilkinson et al., 2022). The most contaminated sites were recorded in regions with low wastewater treatment efficiency and high concentrations of pharmaceutical manufacturing, including South Asia, South America, and parts of Africa (Waleng & Nomngongo, 2022).

As a result of intensive pharmaceutical production and consumption, substances such as antibiotics, hormones, and anti-inflammatory drugs are increasingly detected in modern industrial wastewater (Lykov et al., 2020). In Europe, according to the European Environment Agency, approximately 30 % of water bodies contain pharmaceutical pollutants, which have already led to serious disruptions in biodiversity and a deterioration of drinking water quality (Samal et al., 2022).

These compounds are detected in surface and drinking waters at concentrations ranging from nanograms to micrograms; however, they exhibit hormone-like, mutagenic, and toxic effects on aquatic organisms and humans (Samal et al., 2022). The consequences of such exposure include endocrine system disruptions and genetic defects.

In addition to pharmaceutical residues, effluents contain toxic organic compounds used in the chemical industry and solvent production, which volatilize easily and contaminate both the atmosphere and water sources (Wołowicz & Munir, 2025). For instance, China generates approximately 3.12×10^8 m^3 of coking wastewater annually, containing 558 different organic compounds. This wastewater contributes to increasing concentrations of toxic organic matter in the environment, posing a significant risk to public health, particularly in countries with developing industries (Wołowicz & Munir, 2025; Andreeva, 2021). Of particular concern are recalcitrant and toxic pollutants that persist even after conventional wastewater treatment methods (Burkhardt-Holm, 2010).

Toxic organic substances accumulate in trophic chains, leading to bioaccumulation and biomagnification, thereby exacerbating the pressure on ecosystems (Titchou et al., 2021). VOCs, such as benzene, toluene, xylenes, chlorine-based compounds, hydrocarbons, and phenols, possess carcinogenic and mutagenic activity, exerting a negative impact on human health and ecosystems.

The problem of industrial wastewater pollution by dyes, alongside other toxic substances, remains one of the most acute environmental threats today (Kant, 2012). For example, the textile industry alone produces about 70 million tons of various dyes annually, of which more than 10,000 tons are utilized in fabric dyeing processes (Slama et al., 2021).

However, inefficient dyeing technologies result in 15 % to 50 % of these dyes failing to bind to fibers and being discharged into wastewater, subsequently contaminating water bodies (Ramamurthy et al., 2024). Textile effluents contain not only dyes but also a wide range of toxic substances, including heavy metals, phthalates, phenols, and other organic compounds (Kant, 2012). Thus, industrialization, along with economic development and scientific progress, has led to a series of inevitable environmental issues, such as the contamination of wastewater with pharmaceuticals and toxic compounds. The emerging challenges of wastewater pollution necessitate the development of advanced treatment methods tailored to chemically resistant pollutants (Y. Liu et al., 2024).

1.2. Limitations of conventional treatment and detoxification methods

Conventional treatment methods, including mechanical filtration, sedimentation, coagulation, and biological treatment, are effective in removing suspended solids, organic matter, and pathogens (Y. Liu et al., 2024). However, they demonstrate low efficiency in eliminating persistent organic pollutants (POPs), synthetic dyes, pharmaceutical compounds, hormones, and pesticides (Andreeva, 2021). Mechanical filtration, utilized during the primary treatment stage via screens, meshes, or sand filters, removes large suspended solids such as debris and grit. Nevertheless, dissolved organic compounds and microbes cannot be captured at this stage. Similarly, sedimentation only facilitates the removal of large particles that settle under gravity. While water is retained in settling tanks for a specific duration to allow particle precipitation, this method does not involve the cleavage of chemical bonds in toxic organic compounds, synthetic dyes, or pharmaceutical pollutants; thus, it cannot be employed for wastewater detoxification.

Coagulation and flocculation are widely used wastewater treatment techniques, the efficacy of which depends on the precise selection and dosage of reagents. Incorrect selection or improper dosing leads to incomplete pollutant removal or excessive sludge formation (Kyuregyan et al., 2022). These processes are highly sensitive to fluctuations in pH, temperature, and wastewater composition, including the presence of inhibitory substances, necessitating constant monitoring and adjustments. Even with optimal dosing, the chemistry of coagulation often fails to address specific contaminants such as POPs, synthetic dyes, or pharmaceuticals. Consequently, coagulation-based methods alone are insufficient for treating wastewater containing these persistent pollutants (Kachalova, 2019).

Biological treatment methods, such as activated sludge, perform poorly in removing both organic pollutants and stable pharmaceutical compounds. This inefficiency is attributed to the high stability and low biodegradability of these substances, rendering biological treatment generally ineffective (Tiwari et al., 2017). Furthermore, certain pharmaceuticals can inhibit microbial activity, further reducing treatment efficiency (Ostaschenko et al., 2023). Removal efficiency depends on the chemical properties of the substances – such as water solubility, stability, biodegradability, and molecular weight – as well as process conditions, including temperature, pH, contact time, dissolved oxygen levels, and the composition of the microbial community (Ignatenko, 2022). Readily biodegradable drugs (e.g., ibuprofen) are removed at rates of 60–100 %, whereas recalcitrant ones (e.g., carbamazepine) persist (Ostaschenko et al., 2023). Even when removal efficiency is high, residual concentrations of pharmaceutical substances in treated water pose significant ecological and sanitary risks. Thus, conventional treatment methods do not ensure sufficient efficacy in removing persistent and toxic pollutants, as these compounds often retain their toxicity and chemical stability even after standard treatment procedures.

This underscores the urgent need to develop and implement advanced treatment methods capable not only of separating pollutants from the medium but also of degrading them into harmless components, thereby minimizing environmental risks and ensuring a higher degree of purification.

1.3. Prospects for the application of Fenton-like processes for industrial wastewater treatment from toxic organic pollutants

The Fenton process, developed in the late 19th century by the British chemist Henry John Horstman Fenton, is an oxidation process in which hydrogen peroxide (H_2O_2) in the presence of ferrous ions (Fe^{2+}) generates highly reactive hydroxyl radicals. These radicals possess the capability to degrade a wide range of organic pollutants, including persistent and toxic compounds (Parmar, 2015). Although the method was initially applied in laboratory settings, its efficiency has, over time, been recognized across various industries, particularly in the field of wastewater treatment (Vasilieva et al., 2019).

Modern research demonstrates the high efficiency of the Fenton process in removing organic pollutants from wastewater. For instance, laboratory experiments have shown that implementing the Fenton method with aeration increases treatment efficiency from 72.2 % to 96.8 % (Vasilieva et al., 2019). Furthermore, the acetaldehyde content in treated samples decreased nearly 40-fold compared

to initial values (Trapido et al., 2009). These results confirm the potential of the Fenton method in ensuring a high level of wastewater purification from toxic organic compounds.

The Fenton-like oxidation method, a modification of the classical approach, expands the possibilities for oxidative degradation by utilizing various catalysts and reaction conditions. For example, patent RU2303572C2 describes the application of the Fenton reagent in combination with micellar sludge treatment methods, which allows for an average increase in organic matter decomposition by 5–30 % (Fleri, 2007). Such approaches demonstrate the promising nature of Fenton-like oxidation in various fields, including industrial wastewater treatment and sludge processing.

Figure 1 presents a chart showing the number of publications dedicated to the application of Fenton-like processes from 2010 to 2024. The data were retrieved from the Scopus scientific database. The chart clearly illustrates a growing trend in research interest regarding this subject.

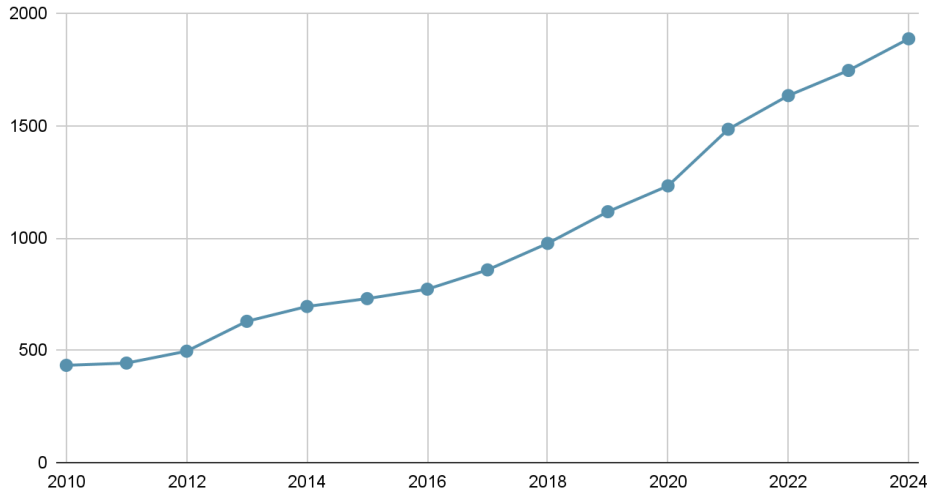


Figure 1. A chart showing the number of publications dedicated to the study of Fenton-like catalytic systems from 2010 to 2024, based on Scopus database data

Therefore, the objective of this article is to conduct a systematic review of contemporary scientific research dedicated to the application of Fenton-like systems for the detoxification of industrial wastewater containing toxic organic compounds, synthetic dyes, and pharmaceuticals. To achieve this objective, the following research tasks were established:

- To characterize the operational principle of Fenton-like processes;
- To examine the industrial application areas of Fenton-like processes;
- To evaluate their efficiency in removing toxic organic compounds, dyes, and pharmaceutical pollutants from wastewater;
- To identify the most promising approaches for implementing Fenton-like catalytic degradation of persistent organic pollutants based on the analysis of literature data.

Unlike previously published reviews that typically focus on either a single pollutant class or a specific catalyst type, the present work provides a cross-class comparative analysis spanning toxic organic compounds, synthetic dyes, and pharmaceutical residues within a unified analytical framework. Particular emphasis is placed on the evolution from classical homogeneous iron-based systems toward heterogeneous and bimetallic catalysts capable of operating at near-neutral pH – a transition that is critical for industrial applicability yet rarely discussed in terms of quantitative performance metrics across pollutant categories. Furthermore, this review systematically addresses hybrid activation strategies (photo-, electro-, and sono-Fenton) and evaluates their contribution to mineralization depth, alongside techno-economic constraints that condition the scalability of these processes.

2. Methods

The present review is based on a comprehensive analysis of peer-reviewed literature indexed in major scientific databases, including Scopus, Web of Science, and Google Scholar. The search strategy was designed to identify relevant studies published between 2010 and 2026, focusing on the development and application of advanced oxidation processes and Fenton-like systems. The primary search queries involved combinations of terms such as "Fenton-like systems," "heterogeneous catalysis," "industrial wastewater treatment," and specific pollutant categories including pharmaceuticals and synthetic dyes.

The selection of sources was conducted based on several fundamental scientific criteria. Priority was given to research introducing novel catalytic materials, such as metal-organic frameworks, bimetallic oxides, and nanostructured composites, as well as studies demonstrating significant advancements in expanding the operational pH range. Furthermore, the analysis included only those articles that provided comprehensive experimental data, including precise reaction conditions and quantitative metrics for pollutant removal and mineralization rates.

3. Current advances in the application of Fenton-like systems for wastewater treatment processes

3.1. The operational principle of Fenton-like systems

The Fenton process is a prominent type of Advanced Oxidation Processes (AOPs) that is currently under intensive research and is likely to be implemented in industrial applications in the near future. This process is fundamentally based on the reaction (1):

$$Fe^{2+} + H_2O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + H_2O + {}^{\bullet}OH \quad (1)$$

The hydroxyl radical formed in the reaction promotes the degradation of organic pollutants into simpler components. A simplified scheme of the oxidation mechanism in the Fenton process is shown in Figure 2.

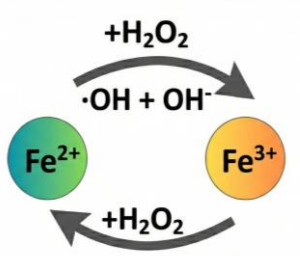


Figure 2. Schematic representation of the catalytic cycle and the generation of reactive oxygen species (ROS) in Fenton systems

According to published studies, more than 20 different reactions occur during the process (Moorjani & Gohil, 2021), of which the following are key to Fenton chemistry:

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + {}^{\bullet}OH \quad (2)$$

$${}^{\bullet}OH + Fe^{2+} \rightarrow OH^- + Fe^{3+} \quad (3)$$

$$Fe^{3+} + H_2O_2 \leftrightarrow Fe^{2+} + {}^{\bullet}O_2H + H^+ \quad (4)$$

$$Fe^{3+} + {}^{\bullet}O_2H \rightarrow Fe^{3+} + HO^{2-} \quad (5)$$

$$Fe^{3+} + {}^{\bullet}O_2H \rightarrow Fe^{2+} + O_2 + H^+ \quad (6)$$

$$^{\bullet}OH+H_2O_2 \rightarrow H_2O+^{\bullet}O_2H \quad (7)$$

$$^{\bullet}OH+O_2H \rightarrow H_2O+O_2 \quad (8)$$

$$^{\bullet}OH+^{\bullet}OH \rightarrow H_2O_2 \quad (9)$$

$$^{\bullet}O_2H+^{\bullet}O_2H \rightarrow H_2O_2+O_2 \quad (10)$$

The chain reaction of hydrogen peroxide decomposition involving iron ions consists of several key stages. In reaction (2), the chain initiation occurs: Fe^{2+} interacts with H_2O_2 to form hydroxyl radicals ($^{\bullet}OH$), which are highly reactive species capable of oxidizing a wide range of organic compounds. Reaction (3) represents a chain termination step due to the interaction of $^{\bullet}OH$ with Fe^{2+}. In reaction (4), Fenton-like processes are realized – the reduction of Fe^{3+} to Fe^{2+} in the presence of H_2O_2, accompanied by the formation of hydroperoxyl radicals ($^{\bullet}OOH$). Reactions (5) and (6) describe the subsequent transformations of Fe^{3+} and radical species, thereby maintaining the catalytic cycle.

It is specifically reactions (3)–(6) that constitute the rate-limiting steps, as these stages involve relatively slow electron transfer processes between iron ions and radicals. These steps determine the overall rate of hydrogen peroxide decomposition and the efficiency of active oxidant generation within the Fenton system (Moorjani & Gohil, 2021).

3.2. Classification of Fenton-like processes

The classification of the diverse range of Fenton-like processes is presented in Figure 3.

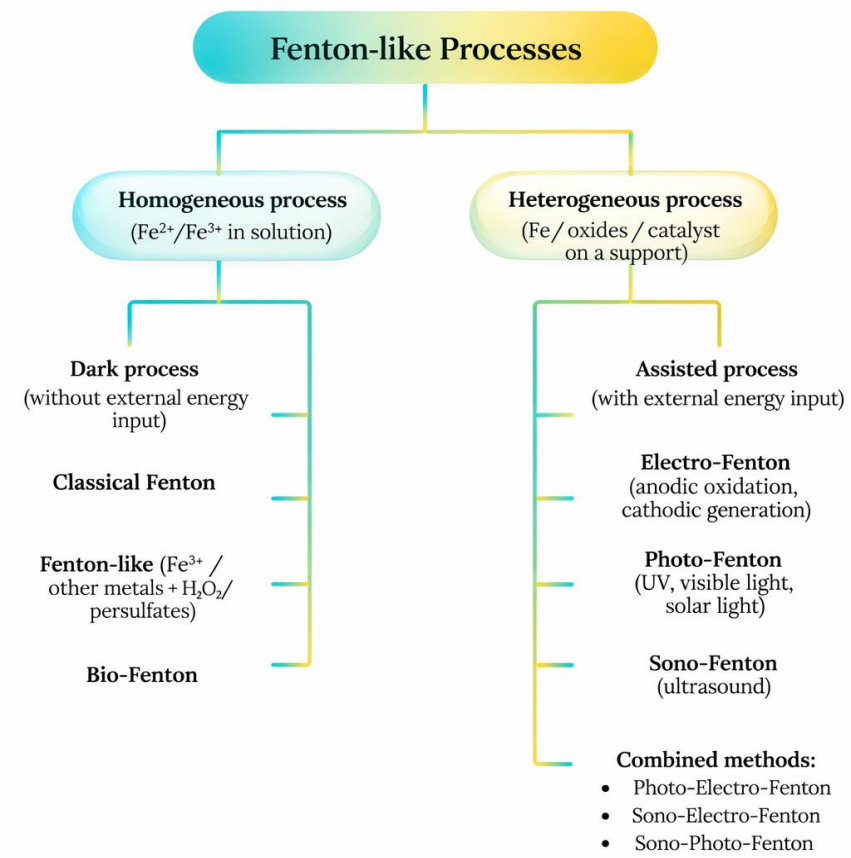


Figure 3. Classification of Fenton-like systems based on the catalyst phase state and process activation methods

The efficiency of Fenton-like processes is determined by numerous factors, primarily the nature of the catalyst used. Depending on the phase state, a distinction is made between homogeneous and heterogeneous systems: in the former, the catalyst (most commonly Fe^{2+}) is dissolved in the aqueous phase, while in the latter, it exists in the solid phase, for instance, on the surface of iron oxides.

In addition to traditional iron, ions of other transition metals–such as Mn^{2+}, Cu^{2+}, or Ni^{2+}– can be used as catalysts, as they possess the ability to activate hydrogen peroxide (H_2O_2) to form hydroxyl radicals ($^{\bullet}OH$). For instance, manganese-based systems, especially in the form of MnO_2 or Mn_3O_4, demonstrate high activity at neutral and slightly acidic pH. Furthermore, in electrochemically activated variants, such as Electro-Fenton with Mn^{2+}, a high degree of organic pollutant removal is observed (Omarov et al., 2022).

Copper-based catalysts deserve special attention, where the cycling between Cu^{2+}/Cu^{+} states promotes effective H_2O_2 activation even at neutral pH. Although nickel is less active compared to iron or copper, it is also employed in certain systems, particularly under conditions of precisely controlled electric current (Hussain et al., 2021).

Alongside the choice of catalyst, external physical influences play a crucial role. The development of modifications, such as processes utilizing additional energy, has significantly expanded the application range of Fenton-like methods. Physical stimuli–light radiation, electricity, and ultrasound–facilitate enhanced radical generation and increase the degree of pollutant mineralization (Arefieva et al., 2020). For example, in systems implementing a mechanism analogous to Photo-Fenton, irradiation with ultraviolet or visible light reduces Fe^{3+} to Fe^{2+}, thereby accelerating the oxidation reaction. In practice, this is achieved using UV radiation sources ($\lambda < 390$ nm), such as xenon lamps or LED lights, as well as through the utilization of visible light, which is particularly effective in treatment systems with minimal energy consumption.

Ultrasonic technologies implemented within Sono-Fenton processes promote cavitation, improve the dispersion of reagents, and ensure the intensive formation of reactive oxygen species. When combined with electrochemical action, as seen in Sono-Electro-Fenton systems, a synergistic effect occurs, allowing for a high degree of degradation even for persistent compounds. Similarly, the simultaneous application of light and electricity in the Photo-Electro-Fenton configuration results in accelerated metal ion reduction and intensification of $^{\bullet}OH$ radical formation. In hybrid systems that combine ultrasound and photochemistry, such as Sono-Photo-Fenton, maximum destruction of organic pollutants is achieved through multi-stage H_2O_2 activation.

The most important parameters determining the performance of such processes also include temperature and electrical voltage. For instance, an optimal temperature of around 60 °C promotes maximum H_2O_2 decomposition to form $^{\bullet}OH$ radicals; however, an excessive increase may lead to premature peroxide decomposition without radical formation, reducing process efficiency. Voltage, in turn, determines the rate of H_2O_2 generation and catalyst recovery, especially under Electro-Fenton conditions or its analogs, where iron is replaced by Cu^{2+} or Ni^{2+}. With a properly selected voltage, a high degradation rate for substances such as 2-phenylphenol is ensured.

Additional efficiency is provided by integration with biological systems. In the microbially-activated Fenton process, microorganisms either participate in the regeneration of active iron ions or perform the preliminary breakdown of complex organic compounds, facilitating the subsequent oxidative attack by radicals. The diversity of approaches, from the classical Fenton process to hybrid schemes including Sono-Photo-Fenton or Photo-Electro-Fenton, allows for the adaptation of technologies to specific conditions, pollutant types, and desired treatment rates. Advanced and combined methods are particularly promising for the elimination of persistent and hard-to-oxidize compounds, providing more complete and rapid destruction compared to conventional approaches. Optimization of parameters–the nature of the catalyst, type of physical action, temperature, and voltage–opens wide possibilities for creating efficient and environmentally sustainable wastewater treatment systems.

3.3. Application of Fenton-like processes for the degradation of various pollutant groups

3.3.1. Detoxification of toxic organic compounds using Fenton-like processes

The scientific literature presents numerous studies dedicated to the removal of toxic organic compounds and persistent pollutants, such as pharmaceuticals and synthetic dyes, from aqueous systems. Fenton-like oxidation processes are considered among the most effective and versatile methods for addressing this challenge. Results from various studies confirm the successful application of these processes for treating wastewater, industrial effluents, and other contaminated media, highlighting their significance in the modern development of environmental technologies.

In a study conducted by Gaoyuan Liu et al. (2017), the treatment of wastewater contaminated with benzene was investigated. Iron sulfate was used as the catalyst, and hydrogen peroxide served as the oxidant. A key feature of the method was the step-by-step introduction of H_2O_2 into an aerated reactor, which achieved 85 % benzene removal, whereas a single addition of the same volume of hydrogen peroxide did not lead to significant purification. Furthermore, a nearly three-fold increase in CO_2 formation was observed with an absence of harmful by-products in the gas phase, indicating the complete decomposition of benzene and emphasizing the environmental safety and efficiency of this approach.

Durai et al. (2020) investigated the treatment of stabilized landfill leachate, which represents a recalcitrant pollutant with a low BOD/COD ratio (0.045). For the detoxification of toxic organic compounds in this pollutant, Fenton-like oxidation was applied using iron sulfate ($FeSO_4$) as the catalyst and hydrogen peroxide (H_2O_2) as the oxidant. Optimization of the process parameters using the central composite design (CCD) method allowed for maximum organic matter removal at a $FeSO_4$ concentration of 14.44 mM, pH 3.0, and an H_2O_2 dose of 29.12 mM.

The research results showed a significant reduction in chemical oxygen demand (COD) and total organic carbon (TOC), which was confirmed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis. Thus, the proposed approach demonstrated high efficiency and environmental safety in the treatment of stabilized landfill leachate–a serious pollutant that poses a significant environmental problem.

In researches (Shokri & Fard, 2022; Tian et al., 2024), the treatment of persistent organic pollutants, such as 1,4-dioxane, was studied, which poses a severe threat to aquatic ecosystems and human health. The heterogeneous Fenton-like oxidation method was used for the detoxification of these toxic organic compounds.

The catalyst used was Fe-ZSM-5 zeolite with various Si/Al ratios, which activated hydrogen peroxide (H_2O_2), leading to the generation of reactive oxygen species–hydroxyl radicals ($^{\bullet}OH$) and singlet oxygen ($^1O_2$). The results showed the high efficiency of Fe-ZSM-5 in removing 1,4-dioxane from aqueous solutions, ensuring significant mineralization of the pollutants. Consequently, the proposed method represents a promising and environmentally safe way to combat the problem of persistent organic matter pollution in aquatic environments.

In a study by Tokumura et al. (2012), an effective methodology for the detoxification of toxic organic compounds using photo-Fenton-like oxidation was developed. Volatile organic compounds (VOCs), such as toluene, were used as the substrate. The iron ion (Fe^{2+}) served as the catalyst, and hydrogen peroxide (H_2O_2) was used as the oxidant. The method involved a wet scrubber combined with a photo-Fenton-like reaction, in which UV irradiation activated H_2O_2 in the presence of Fe^{2+} to generate hydroxyl radicals ($^{\bullet}OH$). The results showed high efficiency in VOC removal without the formation of gas-phase by-products. Thus, the proposed approach demonstrates high efficiency and environmental friendliness in the oxidative detoxification of TOCs.

The article by Vasilieva et al. (2019) examined the treatment of wastewater containing toxic organic compounds that pose a serious threat to aquatic ecosystems and human health. The organic compounds present in the wastewater were successfully removed using the Fenton reaction. The ferrous ion (Fe^{2+}) served as the catalyst, and hydrogen peroxide (H_2O_2) was used as the oxidant. The Fenton reaction effectively degraded the organic pollutants, leading to a significant reduction in TOC concentration in the wastewater. The authors demonstrated the high efficiency of the Fenton reaction for wastewater treatment.

In conclusion, Fenton-like oxidation is an effective, versatile, and environmentally safe method for removing toxic organic compounds from various aqueous and gaseous media. The reviewed studies demonstrate the broad possibilities of this approach for solving urgent environmental problems, such as the removal of benzene, persistent organic pollutants (e.g., 1,4-dioxane), and volatile organic compounds. These results confirm that Fenton-like oxidation has high potential for practical application in treatment systems for wastewater, industrial discharges, and other contaminated environments, making a significant contribution to the development of sustainable environmental technologies.

3.3.2. Degradation of synthetic dyes using Fenton-like processes

The degradation of synthetic dyes is one of the key tasks of modern chemical technology in wastewater treatment, as these compounds account for a significant portion of organic pollutants in industrial effluents. Synthetic dyes are widely used in the textile, leather, paper, and plastic industries; however, their high chemical stability, resistance to photolysis, and biological degradation make them some of the most difficult pollutants to remove from the aquatic environment. Conventional treatment methods, such as sedimentation, coagulation, or biological treatment, often prove insufficient for their complete removal. Consequently, particular attention is paid to Fenton-like and Advanced Oxidation Processes (AOPs) based on the generation of highly reactive hydroxyl radicals (•OH), which are capable of deeply oxidizing organic compounds into safe products such as CO_2 and H_2O.

In a study by Aneggi et al. (2024), the degradation of synthetic organic dyes–methylene blue (MB), rhodamine B (RhB), and malachite green (MG), which belong to the class of cationic and azo dyes–was investigated. Mono- and bimetallic oxide systems based on transition metals (Mn–Fe, Co–Fe, Cu–Mn, etc.), synthesized via the hydrothermal method, were used as catalysts. The process was conducted according to the mechanism of heterogeneous Fenton-like oxidation using hydrogen peroxide (H_2O_2) as an oxidant at pH ≈ 3–5 and a temperature of 25 °C. Optimal conditions ensured almost complete degradation of the pollutants: 99 % removal of MB and MG within 5 minutes and 95 % of RhB within 30 minutes. The catalysts demonstrated high catalytic activity and stability, maintaining over 95 % efficiency after several application cycles, indicating their potential for industrial use in wastewater treatment systems.

Moving from oxide systems to magnetic catalysts, the study by Ribeiro et al. (2024) is of interest, where the degradation of azo dyes–Acid Red 18 (AR18), Acid Red 66 (AR66), and Orange II (OR2) – was carried out via the photo-Fenton-like oxidation mechanism using magnetite nanoparticles (Fe_3O_4). These compounds are anionic dyes with high resistance to biological degradation. The Fe_3O_4 catalyst was obtained by the hydrothermal method, and hydrogen peroxide (H_2O_2) at a concentration of 60 mg/L served as the oxidant. The reaction was performed at pH ≈ 3 and a temperature of 25 °C under UV irradiation. As a result, removal efficiencies reached 62.3 % for AR18, 79.6 % for AR66, and 83.8 % for OR2 within 180 minutes. The catalyst maintained high activity after six application cycles, demonstrating its stability and practical suitability for the advanced treatment of textile effluents.

Hameed & Salman (2024) investigated the efficiency of methyl orange (MO) removal from aqueous solutions using three-dimensional electro-Fenton (3D EF) in a batch reactor with a porous graphite anode and a copper foam cathode in the presence of granular activated carbon (GAC) as a third electrode. To optimize the process conditions, response surface methodology (RSM) in conjunction with the Box-Behnken design (BBD) was applied, studying the effects of current density (3–8 mA/cm²), electrolysis time (10–20 min), and GAC mass (1–3 g) on removal efficiency, as well as their interactions. The model showed high reliability ($R^2 > 0.98$), with current density having the greatest influence. The highest MO removal efficiency (95.62%) at pH = 3 was achieved at a current density of 5.12 mA/cm², a GAC mass of 3 g, and a time of 20 min, with low concentrations of Fe^{2+} (0.124 mM) and Na_2SO_4 (0.02 M); the average energy consumption was 6.22 kWh/kg MO. The effect of ultrasonic exposure in Sono-Electro-Fenton (SEF) was also examined, showing a slight improvement compared to minimum EF conditions (50.51% vs. 49.24%). The use of copper foam as

a cathode and granular carbon provided high catalytic activity, simplicity, speed, and environmental friendliness, making the method promising for the industrial removal of dyes from wastewater.

In the study by Ismail & Sakai (2025), the efficiency of Fenton-like processes for the removal of textile dyes Direct Red 28 (DR28), Reactive Blue 19 (RB19), and Reactive Black 5 (RBk 5) from wastewater was investigated using various combinations of catalysts and active radicals. Copper ions (Cu^{2+}) and peroxydisulfate ($S_2O_8^{2-}$) were used as catalysts, activating the formation of hydroxyl ($^{\bullet}OH$) and sulfate ($SO_4^{\bullet-}$) radicals, which provided a high oxidative capacity for the system. Optimization of reaction conditions took into account catalyst concentration, pH, and treatment time, allowing for complete decolorization and a 98.5% reduction in total organic carbon (TOC) for RBk5. Mechanistic analysis showed that the synergistic interaction between copper and peroxydisulfate enhances radical formation and accelerates dye degradation. The results confirm that the proper selection of catalysts and radicals in Fenton-like systems ensures high efficiency in synthetic dye removal and can be applied for the industrial treatment of textile wastewater.

Meurs et al. (2024) considered the use of a Fenton-like process for the decolorization of reactive-dyed cotton waste as a pretreatment before textile recycling. Pre-moistened dark (black and blue) knitted samples with an area of 300 cm² were treated in 1200 ml of Fenton solution containing 14 mM Fe^{2+} and 280 mM H_2O_2 at 40 °C. Characterization of the fabrics before and after treatment was performed using UV-visible spectroscopy to measure color strength, as well as microscopy, IR spectroscopy, thermal analysis, and tensile testing to measure strength and elongation. Subsequently, the cotton was mechanically shredded for a qualitative analysis of recyclability. Color strength measurements for black and blue cotton showed decolorization efficiencies of 61.5 % and 72.9 %, respectively. The results provide proof-of-concept for an alternative color removal method using a Fenton-like process as a pretreatment before textile recycling.

Papadopoulou et al. (2025) examined homogeneous and heterogeneous photocatalytic methods based on the photo-Fenton reaction for the degradation of Nile Blue dye. Within the scope of homogeneous photocatalysis, the classical photo-Fenton ($UV/Fe^{2+}/H_2O_2$) and a modified photo-Fenton-like system ($UV/Fe^{2+}/ S_2O_8^{2-}$) were studied. For heterogeneous photocatalysis, a commercial MOF catalyst (Basolite F300) and the natural iron-containing mineral goethite were used. The results showed that modification with peroxydisulfate ($S_2O_8^{2-}$) increases degradation efficiency compared to the traditional H_2O_2 system, especially in the homogeneous phase. Heterogeneous systems based on goethite (α-FeO(OH)) and Basolite F300 also demonstrated high efficiency, with goethite showing better stability across a wide pH range (3–7). This study highlights the promise of using modified photo-Fenton-like systems for the effective removal of synthetic dyes from wastewater.

Fenton-like processes have demonstrated high efficiency in the degradation of specific synthetic dyes from wastewater, including methylene blue (MB), rhodamine B (RhB), malachite green (MG), Acid Red 18 (AR18), Acid Red 66 (AR66), Orange II (OR2), Direct Red 28 (DR28), Reactive Blue 19 (RB19), Reactive Black 5 (RBk5), and Nile Blue. The use of various catalysts–transition metal oxide systems, magnetic Fe_3O_4 nanoparticles, goethite, and MOF catalysts–ensured a high degree of degradation, stability, and recyclability. Modern methods, including three-dimensional electro-Fenton, Sono-Electro-Fenton, and photo-Fenton with peroxydisulfate, increase degradation rates and reduce total organic carbon (TOC). These results confirm the potential of Fenton-like processes as an effective and environmentally safe method for industrial wastewater treatment.

3.3.3. Degradation of pharmaceutical compounds

Currently, increasing attention is being paid to the development of effective methods for the degradation of pharmaceutical compounds (PCs), which are among the priority and most persistent pollutants in the aquatic environment. The application of photocatalysis, advanced oxidation processes (AOPs), and bioremediation is considered one of the most promising directions for treating wastewater containing such substances. These technologies ensure the deep destruction of hard-to-

decompose compounds, including antibiotics, analgesics, cytostatics, hormones, and other pharmaceutical drugs characterized by high chemical stability and biological activity.

Special research focus is directed toward studying the degradation mechanisms of these compounds and optimizing conditions to ensure their complete decomposition and toxicity reduction. According to Höler et al. (2023), the main substrates in such studies are antibiotics, analgesics, and hormonal drugs that are resistant to conventional wastewater treatment methods. For their destruction, photocatalysts based on TiO_2 and its modifications, activated by ultraviolet or visible radiation, are most widely used. Such systems implement advanced oxidation processes (AOPs), where hydroxyl radicals ($^{\bullet}OH$) and reactive oxygen species serve as the key oxidants. Consequently, partial or complete mineralization of the initial compounds and a significant reduction in their toxicity are achieved, making this approach highly effective and environmentally justified.

In a study by Zhuo et al. (2025) on water treatment from pharmaceutical pollutants, the decomposition of the antibiotic ciprofloxacin with an initial concentration of 10.0 mg/L was investigated using a heterogeneous Fenton-like process with peroxymonosulfate activation. A Co/GO heterostructure with a cobalt content of 12.3 wt.% and a specific surface area of 385 m^2/g was used as the catalyst. Under optimal conditions–catalyst dose of 0.20 g/L, PMS concentration of 0.50 g/L, temperature of 25.0 °C, and initial pH of 5.5–the system demonstrated exceptional efficiency: 98.7 % decomposition of ciprofloxacin within 20.0 minutes with a rate constant of 1.456 min^{-1} and an activation energy of 42.8 kJ/mol. The catalyst remained stable over 5 cycles with minimal loss of activity (efficiency decreased to 95.2 %), while the degree of mineralization reached 78.3 % in 60 minutes, and the hydroxyl radical formation rate was 1.84 μM/min, confirming the promise of this technology for treating aqueous media containing persistent pharmaceutical pollutants.

Trench et al. (2025) studied the degradation of methylparaben–a typical pharmaceutical preservative–using electro- and photo-electro-Fenton processes in a carbon felt-BDD cell. Soluble iron ions (Fe^{2+}) were used as the catalyst, and hydrogen peroxide (H_2O_2) generated in situ at the cathode served as the oxidant. The photo-variant of the process was activated by UV radiation, which enhanced the formation of hydroxyl radicals ($^{\bullet}OH$) and accelerated the destruction of the target compound. A key feature of the methodology was the comparison of three oxidation systems–anodic oxidation, electro-Fenton, and photo-electro-Fenton–at identical initial methylparaben concentrations. Optimal conditions (pH ≈ 3, current = 200 mA, $[Fe^{2+}]$ = 0.1 mM) ensured up to 98 % degradation of methylparaben within 60 minutes in the photo-electro-Fenton modification, whereas electro-Fenton and anodic oxidation reached 86 % and 73 %, respectively. A reduction in COD of more than 90 % was observed, and the oxidation products were completely mineralized to CO_2 and H_2O, confirming the high efficiency and environmental cleanliness of the developed approach.

The following example in the article by Kayani (2025) examines the removal of pharmaceutical pollutants, such as diclofenac and carbamazepine, from aqueous solutions using bimetallic metal-organic frameworks (BMOFs) as catalysts for a Fenton-like process. The method is based on chemical oxidation with the generation of reactive oxygen species (ROS) without the use of external UV radiation, which increases energy efficiency. BMOF catalysts based on combinations of Fe–Co and Cu–Zn ions demonstrate a synergistic effect, promoting the rapid decomposition of pharmaceutical compounds. As a result of applying this system, it was possible to achieve up to 97 % destruction of diclofenac and carbamazepine within 45 minutes under moderate conditions (pH ≈ 6, T = 30 °C), highlighting the high potential of multifunctional metal-organic structures for wastewater treatment.

Another approach to the chemical destruction of pharmaceutical compounds is based on combined photochemical systems. Tarigan & Effendi (2024) demonstrated the effectiveness of ozone-based advanced oxidation (O_3/H_2O_2/UV) in the destruction of paracetamol in an aqueous medium. The use of a three-component scheme achieved 92 % degradation within 40 minutes at pH 7 and a temperature of 25 °C. During the process, the formation of hydroxyl and peroxyl radicals was observed, ensuring deep oxidation of the paracetamol molecule down to CO_2. The authors noted that

the synergy of ozone, hydrogen peroxide, and ultraviolet radiation makes the method resistant to pH fluctuations and effective at low substrate concentrations.

Developments in chemical destruction are also reflected in the work of Kanakaraju et al. (2025), where recent advances in advanced oxidation processes (AOPs) for the removal of various pharmaceutical pollutants are systematically reviewed. Particular attention is paid to a comparative analysis of photocatalytic, Fenton-like, and ozone systems, as well as the influence of environmental parameters on degradation kinetics. The authors conclude that hybrid schemes–combining the photo-Fenton reaction with TiO_2 catalysis and controlled H_2O_2 introduction–demonstrate the highest efficiency, providing complete mineralization of compounds in a relatively short time with minimal formation of by-products.

Thus, the analysis of the presented studies shows that chemical methods based on advanced oxidation processes (AOPs), including photo- and electro-Fenton systems, ozone and photocatalytic oxidation, as well as the use of new catalysts based on metal-organic structures, ensure the effective destruction of pharmaceutical pollutants. The refinement of these technologies allows for almost complete mineralization of target compounds, reducing their toxicity and persistence in the aquatic environment. Hybrid approaches combining several types of AOP mechanisms are of particular significance, as they provide high reaction rates, catalyst stability, and environmental safety of the processes. All of this confirms the potential of modern chemical methods as a key tool in wastewater treatment for pharmaceutical compounds and the protection of aquatic ecosystems.

4. Discussion

4.1. Comparative analysis of the efficiency of Fenton-like systems for various pollutant groups

Summarized data on the degradation efficiency of various pollutant groups are presented in Table 1. An analysis of published experimental data reveals key technological trends in the development of Fenton-like processes. A comparative assessment of the destruction efficiency for different classes of compounds–ranging from simple aromatic hydrocarbons to complex pharmaceutical molecules–indicates a direct correlation between the mineralization rate and the type of catalytic system and energy input employed.

Table 1. Summary of contemporary research on the application of modified Fenton processes for industrial wastewater detoxification

Toxic Organic Compounds					
Pollutant	**Method**	**Catalyst**	**Conditions**	**Efficiency**	**Reference**
Benzene	Periodic injection of H_2O_2 into an aerated reactor	Fe^{2+} (ferrous sulphate)	pH ≈ 3.0; T ≈ 25 °C; [H_2O_2] 4 mmol; [Fe^{2+}] 1 mmol; (fractional injection, 4 cycles); aeration (25 ppm)	≈85% (benzene degradation, 60-90 min, H_2O_2 intermittent dosing)	(G. Liu et al., 2017)
Landfill leachate	Heterogeneous Fenton-like process	Copper Catalyst on ZrO_2 (Cu/ZrO_2)	pH ≈ 3; BOD/COD = 0.045; optimized dosage of reactants and Cu/ZrO_2 catalyst	97.83% (destruction of organic substances according to COD, optimal conditions: pH 3; H_2O_2 29.12	(Durai et al., 2020)

				mM; $FeSO_4$ 14.44 mM)	
1,4-Dioxane	Heterogeneous (non-radical) Fenton process	Zeolite Fe-ZSM-5 ratio Si/Al = 25, 100, 300 + H_2O_2	[Fe - ZSM - 5] = 0.8 g/l; H_2O_2 = 10 mmol/l; pH 3.0–11.0 (optimal alkaline); tads ≈ 10 min	93.5% (destruction of 1,4-DX, 24 h, Fe-ZSM-5(25) + 10 mM H_2O_2 + 0.80 g/L catalyst)	(Tian et al., 2024)
Toluene (VOC in the gas phase)	Photo-Fenton reaction	Iron(II) sulfate heptahydrate ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)	[Fe^{2+}] = 20 mg/l; [H_2O_2] = 630 mg/l; Gas flow: 700 ml/min, reaction time: t = 17 s	60% (COD removal, 1 min	(Tokumura et al., 2012)
Synthetic Dyes					
Pollutant	**Method**	**Catalyst**	**Conditions**	**Efficiency**	**Reference**
Methylene Blue (MB), Rhodamine B (RhB), Malachite Green (MG)	Heterogeneous Fenton-like oxidation	Mono- and bimetallic oxides (Mn-Fe, Co-Fe, Cu-Mn)	pH 3.0–5.0; T = 25°C; [H_2O_2] – stoichiometric excess	99% MB & MG in 5 min, 95% RhB in 30 min	(Aneggi et al., 2024)
Acid Red 18 (AR18), Acid Red 66 (AR66), Orange II (OR2) Acid Red 18 (Ponceau 4R), Acid Red 66, Orange II (Acid Orange 7)	Photo-Fenton-like oxidation	Magnetite nanoparticles (Fe_3O_4)	pH = 3.0; T = 25°C, UV irradiation; [H_2O_2] = 60 mg/l; [Fe_3O_4] (nanoparticles)	62.3% AR18, 79.6% AR66, 83.8% OR2 for 180 min	(Ribeiro et al., 2024)
Methyl Orange (MO)	3D Electro-Fenton	Copper Foam + Granular Carbon	pH = 3.0; Current density j = 5.12 mA/cm²; t = 20 min; 3g GAC catalytic load	95.62% MO Removal	(Hameed & Salman, 2024)
Direct Red 28, Reactive Blue 19, Reactive Black 5	Fenton-like oxidation	Copper ions (Cu^{2+}) + peroxodisulfate	Optimized pH and [Cu^{2+}]/[$S_2O_8^{2-}$] for maximum degradation	98.5% reduction in TOC for RBk5	(Ismail & Sakai, 2025)

Reactive-dyed cotton	Fenton-like process	Fe^{2+} ions	T = 40°C; $[Fe^{2+}]$ = 14 mM; $[H_2O_2]$ = 280 mM; pre-moistening the fabric	61.5% (Black), 72.9% (Blue) Discoloration	(Meurs et al., 2024)
Nile Blue	Photo-Fenton Systems	Goethite, Basolite F300, $Fe^{2+}/S_2O_8^{2-}$	pH 3.0–7.0; UV irradiation; $Fe^{2+}/S_2O_8^{2-}$	High efficiency, stability over a wide pH range	(Papadopoulou et al., 2025)
Pharmaceutical compunds					
Pollutant	**Method**	**Catalyst**	**Conditions**	**Efficiency**	**Reference**
Ciprofloxacin	Heterogeneous Phentone-Like Process with Peroxymonosulfate Activation	Co/GO (12.3% Co, 385 m^2/g)	pH = 5.5; T= 25°C; [PMS] = 0.5 g/l; [catalyst] = 0.2 g/l	98.7% in 20 min, k = 1.456 min^{-1}, mineralization 78.3% in 60 min	(Zhuo et al., 2025)
Methylparaben	Photoelectro-Fenton Process	Fe^{2+} ions, BDD anode	pH = 3; current I = 200 mA; $[Fe^{2+}]$ = 0.1 mM; UV irradiation (photoelectro-Fenton)	98% in 60 min, COD reduction >90%	(Trench et al., 2025)
Diclofenac, carbamazepine	Fenton-like process	BMOF (Fe-Co, Cu-Zn)	pH = 6.0; T = 30°C; UV radiation, reagent-free activation of the BMOF catalyst	Up to 97% in 45 min	(Kayani, 2025)
Paracetamol	$O_3/H_2O_2/UV$		pH = 7; T = 25°C; combined $O_3/H_2O_2/UV$ system	92% in 40min	(Tarigan & Effendi, 2024)
Various Pharmaceutical Compounds	Hybrid AOP Systems	TiO_2, H_2O_2	Combined conditions	Complete mineralization in a short time	(Kanakaraju et al., 2025)
Antibiotics, analgesics, hormones	Photocatalysis	TiO_2 and modifications	UV/visible radiation; modified TiO_2 catalyst	High efficiency, reduced toxicity	(Höler et al., 2023)

4.1.1. Detoxification of toxic organic compounds (TOCs)

Studies on the removal of benzene and toluene (G. Liu et al., 2017; Tokumura et al., 2012) demonstrate the high efficiency of photo-Fenton processes. The application of UV irradiation allows for 85 % benzene removal due to the intensification of hydroxyl radical generation. Notably, for the degradation of 1,4-dioxane, the use of zeolites (Fe-ZSM-5) yielded the best results when varying the Si/Al ratio (Tian et al., 2024).

This confirms the hypothesis that for small organic molecules, the decisive role is played not only by radical activity but also by the adsorption capacity of the catalyst surface, which ensures effective phase contact.

4.1.2. Degradation of synthetic dyes

A review of recent studies (Aneggi et al., 2024; Ribeiro et al., 2024) indicates that dyes (such as methylene blue and rhodamine B) are the most "accessible" targets for Fenton-like systems. Their removal efficiency frequently reaches 95–99 % within record-breaking timeframes (5–30 minutes).

Hybrid methods are of particular interest. For instance, the application of 3D electro-Fenton using copper foam and activated carbon (Hameed & Salman, 2024) demonstrated an efficiency of 95.62 % for methyl orange. This highlights the advantages of multidimensional electrodes, which increase the working surface area and facilitate the rapid regeneration of copper ions (Cu^{2+}/Cu^{+}), analogous to the classical iron cycle.

4.1.3. Degradation of pharmaceutical compounds

Pharmaceutical drugs, such as ciprofloxacin, diclofenac, and paracetamol, are considered among the most persistent pollutants due to their complex chemical structures. Contemporary studies (Kayani, 2025; Zhuo et al., 2025) indicate that the classical Fenton method is no longer always sufficient for such tasks. Consequently, researchers are transitioning toward more efficient systems based on peroxymonosulfate (PMS) and bimetallic metal-organic frameworks (BMOFs).

A major feature of these systems is the metal synergy effect. The use of iron-cobalt (Fe–Co) or copper-zinc (Cu–Zn) combinations within catalysts allows for the degradation of up to 97 % of diclofenac. This significantly outperforms results obtained with conventional single-active-metal catalysts, as the dual system creates a more potent mechanism for initiating the oxidation process.

Furthermore, the depth of treatment is critically important when removing pharmaceuticals from water. Unlike dyes, which often only require decolorization, pharmaceutical compounds necessitate complete mineralization–that is, degradation into the simplest safe components. For example, the application of combined schemes involving ozone, hydrogen peroxide, and ultraviolet radiation ($O_3/H_2O_2/UV$) enables the removal of up to 92 % of paracetamol. This approach (Tarigan & Effendi, 2024) not only purifies the effluent but also prevents the formation of hazardous secondary reaction by-products, which can be more toxic than the drugs themselves.

4.1.4. Cross-class quantitative analysis

A quantitative cross-class comparison based on the data in Table 1 reveals several analytically significant trends. Removal efficiencies for synthetic dyes span the widest range (61.5–99 %), reflecting both the structural diversity of target molecules and the sensitivity of decolorization metrics to incomplete mineralization. For toxic organic compounds, values ranged from 60% (toluene, photo-Fenton) to 97.8 % (landfill leachate, optimized heterogeneous process), with performance strongly dependent on molecular complexity and degree of catalyst optimization. Notably, pharmaceutical compounds – despite their structural complexity – achieved the highest and most consistent efficiency range (92–98.7 %) across the reviewed studies, a result attributable to the exclusive use of advanced activation strategies for this pollutant class: peroxymonosulfate activation, photo-electro-Fenton, and bimetallic MOF catalysts. This pattern indicates that matching the complexity of the catalytic system to the persistence of the target pollutant is a more decisive determinant of mineralization depth than the intrinsic chemical stability of the compound itself.

4.2. Influence of reaction conditions on pollutant degradation efficiency

An analysis of the experimental data summarized in Table 1 allows for the identification of key factors that determine the performance of Fenton-like systems. Among these, the most critical are the pH value of the medium, the phase state of the catalyst, and the presence of external energy input.

4.2.1. pH value and the phase state of the system

Traditionally, the classical Fenton process is strictly limited to a narrow pH range (2.8–3.2). This is corroborated by results from homogeneous oxidation studies (Trench et al., 2025), where a

shift toward neutral conditions leads to a sharp decline in efficiency due to the precipitation of iron ions as hydroxides and a reduced yield of hydroxyl radicals (•OH).

However, contemporary research demonstrates a successful departure from this limitation. The use of heterogeneous catalysts based on iron oxides and minerals, such as goethite and magnetite (Papadopoulou et al., 2025), allows the reaction to proceed within a pH range of 3.0 to 7.0. In heterogeneous systems, radical generation occurs at the phase interface, which prevents the deactivation of active sites even in near-neutral media. From an industrial perspective, this is of decisive importance: operating at a neutral pH eliminates costly stages of effluent pre-acidification and subsequent neutralization before discharge. Furthermore, this almost entirely resolves the problem of "iron sludge" formation – a secondary waste whose disposal significantly increases the cost of the classical technology.

4.2.2. Synergy of bimetallic systems and external activation

Another critical factor identified during the review is the transition from monometallic to bimetallic catalysts (e.g., Fe–Co, Cu–Zn, Mn–Fe). The data presented in the table indicate that the introduction of a second promoter metal creates a synergistic effect. Electronic interactions between different metals within the catalyst structure or the active sites of BMOF frameworks accelerate the regeneration of the primary metal ions (e.g., the $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ transition), which is the "bottleneck" in classical Fenton chemistry. This allows for a significant reduction in catalyst dosage and hydrogen peroxide consumption without compromising the degradation rate.

4.2.3. The role of energy activation

Furthermore, the efficiency of the process directly correlates with the activation method. The application of photochemical irradiation (UV or visible light) and electrochemical action (Electro-Fenton) allows not only for the generation of additional radicals but also for maintaining the catalyst in an active state in situ. As demonstrated by studies on the degradation of pharmaceutical products (Zhuo et al., 2025), the combination of bimetallic catalysts with photo-activation ensures almost complete mineralization of complex molecules–an outcome that is extremely difficult to achieve through simple chemical oxidation.

Consequently, the most promising direction for the development of wastewater treatment technologies is the creation of highly stable bimetallic heterogeneous catalysts adapted for operation across a wide pH range. When combined with photo- or electrochemical intensification, such systems provide the maximum degradation rate of toxic compounds with minimal operational costs and high environmental safety.

4.2.4. Catalyst stability and reusability under real wastewater conditions

The recyclability data reported in the reviewed studies provide initial evidence of the operational durability of bimetallic and composite catalysts. Bimetallic oxide systems (Mn–Fe, Co–Fe) retained over 95 % degradation efficiency across multiple consecutive cycles (Aneggi et al., 2024), magnetite-based catalysts maintained comparable activity after six reuse cycles (Ribeiro et al., 2024), and Co/GO composites exhibited only marginal activity loss (98.7 % → 95.2 %) over five cycles under peroxymonosulfate activation (Zhuo et al., 2025). These results indicate that structural integrity of the active phase is largely preserved under the tested conditions.

However, a critical limitation of the majority of reviewed studies is that stability testing was conducted in model single-pollutant solutions prepared with distilled or deionised water. Real industrial effluents contain competing inorganic anions – chlorides, sulfates, carbonates, and phosphates – as well as natural organic matter and varying ionic strength, all of which can suppress radical generation through scavenging reactions or promote metal leaching from the catalyst surface (Hussain et al., 2021). The extent to which the reported reusability data translate to actual wastewater matrices therefore remains largely unvalidated. Systematic investigation of catalyst performance under conditions representative of target industrial effluents, including multi-cycle testing in real

wastewater streams, constitutes a key requirement for advancing these materials toward practical application. A notable exception is provided by Zhao et al. (2024), who tested a bimetallic FeCu-MOF-derived catalyst in real urban wastewater under electro-Fenton conditions. The catalyst retained high activity over multiple reuse cycles with minimal iron leaching, demonstrating that carefully engineered bimetallic frameworks can maintain their performance advantage outside idealized model systems. Such studies remain rare, and systematic investigation of catalyst behaviour in complex wastewater matrices constitutes a priority for future research.

4.3. Development prospects and techno-economic limitations of Fenton-like systems

Fenton-like processes are among the most effective tools for the degradation of persistent organic pollutants. The current research vector in this field is directed toward overcoming technological barriers that limit the transition of the method from laboratory settings to industrial operation (Moorjani & Gohil, 2021).

Traditional Fenton systems demonstrate maximum reactivity within a narrow pH range of 2.8–3.2 (Trench et al., 2025). The application of heterogeneous catalysts based on transition metal oxides and their composites allows this range to be extended to neutral values. In particular, the use of catalysts based on copper (Cu-Fenton) and nickel ensures high activity at pH levels from 3 to 9, simplifying the treatment of real wastewater without the need for preliminary acidification (Hameed & Salman, 2024; Hussain et al., 2021). Increasing the stability of catalytic systems is achieved by creating nanostructured composites, such as bimetallic systems and metal-organic frameworks (BMOFs) (Aneggi et al., 2024; Kayani, 2025). Such structures minimize the leaching of the active metal into the solution. The use of magnetic catalysts based on magnetite (Fe_3O_4) addresses the separation issue: the application of an external magnetic field allows for the easy recovery of particles from the treated medium for their reuse, thereby reducing operational costs (Ribeiro et al., 2024).

A promising direction is the intensification of processes by combining Fenton systems with ultrasonic treatment (sono-Fenton), photocatalysis, and electrochemical action (Hameed & Salman, 2024). Ultrasonic cavitation and UV irradiation accelerate metal ion regeneration and peroxide homolysis, ensuring the deep mineralization of pharmaceuticals and dyes into safe compounds (Tarigan & Effendi, 2024; Papadopoulou et al., 2025).

Despite high efficiency, the widespread implementation of these technologies is constrained by several factors (Y. Liu et al., 2024; Samal et al., 2022):

- the necessity of separating and disposing of iron hydroxides in homogeneous systems.
- high energy consumption for operating UV emitters and ultrasonic units in hybrid schemes.
- the presence of inorganic scavenging anions in real waters, which reduce the concentration of active radicals (Hussain et al., 2021).

Thus, the development of heterogeneous catalytic systems and hybrid treatment methods creates the foundation for scaling Fenton-like technologies. Addressing material stability issues and reducing energy consumption will allow these processes to become a global standard in the field of industrial effluent detoxification.

4.4. Research Gaps and Future Directions

Despite the considerable progress documented in this review, several gaps constrain the transition of Fenton-like technologies from laboratory research to industrial deployment. The most critical concerns the representativeness of experimental conditions: the overwhelming majority of reviewed studies were conducted in model solutions using a single target compound dissolved in distilled or deionised water under controlled pH and temperature. Real industrial effluents contain complex matrices with competing organic and inorganic species, suspended solids, natural organic matter, and variable ionic strength. The presence of inorganic scavenging anions – including chloride, sulfate, carbonate, and phosphate – reduces hydroxyl radical availability through competitive reactions, substantially lowering apparent degradation efficiency relative to model system results (Hussain et al., 2021; Satyam & Patra, 2025).

A second unresolved issue is the treatment of pollutant mixtures. Industrial effluents rarely contain a single contaminant; competitive adsorption onto catalyst surfaces and radical scavenging in multi-component systems can substantially alter degradation kinetics relative to single-compound experiments. Emerging evidence from photocatalytic studies of micropollutant mixtures indicates that co-occurring pollutants may either inhibit or enhance the degradation of individual compounds depending on the specific molecular combination (Paiu et al., 2025), a phenomenon that has not been systematically investigated in Fenton-like systems.

Standardized benchmarking represents another critical gap. A direct quantitative comparison across the studies in Table 1 is limited by the diversity of reported metrics – decolorization, COD reduction, TOC mineralization – and differences in reactor geometry, H_2O_2 dosing, and light source parameters. The absence of unified reporting standards impedes cross-study comparisons and the identification of optimal systems for specific applications. Zong et al. (2025) demonstrated the feasibility of life-cycle assessment-integrated benchmarking for AOPs applied to tetracycline degradation; extending such frameworks to Fenton-like systems across pollutant classes would substantially improve the comparability of published data.

Finally, the techno-economic and environmental footprint of scaling Fenton-like processes remains insufficiently characterized. Life cycle assessment data at pilot or industrial scale are sparse, and existing economic analyses predominantly address single-pollutant scenarios under idealized conditions (Alanis et al., 2025). Systematic pilot-scale studies in real wastewater streams, combined with standardized LCA frameworks, constitute the most critical next steps toward the practical deployment of these technologies.

5. Conclusion

In the context of intensive industrialization, the contamination of the hydrosphere by persistent organic pollutants, such as pharmaceuticals, synthetic dyes, and pesticides, represents a global environmental challenge. Conventional biological and physicochemical treatment technologies demonstrate limited efficiency toward these compounds, creating an urgent need for the implementation of Advanced Oxidation Processes (AOPs).

The conducted review confirms that Fenton-like systems are among the most promising directions in the field of wastewater detoxification. Due to the high reactivity of the generated hydroxyl radicals ($^{\bullet}OH$), these methods provide not only decolorization or partial degradation but also deep mineralization of a wide range of ecotoxicants.

The following key conclusions were identified during the study:

1. There is a distinct transition from classical homogeneous systems to heterogeneous catalysis. The development of new materials based on metal-organic frameworks (MOFs), nanocomposites, and bimetallic systems allows for overcoming the technology's "bottleneck" – the strict pH limitation. Expanding the operating range to neutral and slightly alkaline values (pH 6.0–9.0) makes the method versatile for treating real industrial effluents without a pre-acidification stage.

2. The application of magnetic heterogeneous catalysts addresses the issue of separating the active phase from the treated water and eliminates the formation of secondary iron sludge. High catalytic stability and the possibility of multiple material recoveries significantly enhance the economic attractiveness of the method.

3. The integration of Fenton-like processes with photochemical, electrochemical, and ultrasonic activation allows for a manifold increase in pollutant degradation rates and a reduction in specific energy consumption. Combined with biological treatment (as a pre-treatment stage), it opens pathways for creating high-performance integrated treatment systems.

Thus, Fenton-like technologies possess high potential for implementation in the textile, chemical, and pharmaceutical industries. The capability of these systems to operate effectively under fluctuating effluent compositions and to ensure compliance with strict environmental safety standards makes them a strategic tool in realizing the concept of sustainable development and minimizing anthropogenic impact on the environment.

6. Supplementary Materials: No supplementary material.

7. Author Contributions

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

8. Author Information

Zhenisova, Dilnaz – student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; dilnazzhenisova88@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-2578-331X

Allambergenova, Gulshod – student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; gulsodallambergenova@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-5774-8938

Baikenov, Yerlan – Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; baikenov_yea_1@enu.kz, https://orcid.org/0009-0003-4582-111X

Safarov, Ruslan – Lecturer-Researcher, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; safarov_rz@enu.kz, https://orcid.org/0000-0003-2158-6330

9. Funding: The given research was carried out within the framework of a project funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23488858).

10. Acknowledgements: The authors express their gratitude to the L.N. Gumilyov Eurasian National University for providing laboratory facilities and research infrastructure. The authors also thank the anonymous reviewers for their valuable comments and constructive suggestions, which helped improve the quality of this manuscript.

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

12. References

1. Alanis, C., Padilla-Rivera, A., Romero, R., Ramírez-Serrano, A., & Natividad, R. (2025). Life cycle assessment of a cu/fe-pillared clay catalyzed photo-Fenton process for paracetamol removal. *Processes*, 13(10), 3165. https://doi.org/10.3390/pr13103165
2. Andreeva, S. A. (2021). Improving the efficiency of technological processes of purification from organic components in highly concentrated wastewater. *Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Structures. Technologies*, 3(19), 77–88. https://doi.org/10.25686/2542-114X.2021.3.77
3. Aneggi, E., Hussain, S., Baratta, W., Zuccaccia, D., & Goi, D. (2024). Enhanced heterogeneous Fenton degradation of organic dyes by bimetallic zirconia-based catalysts. *Molecules*, 29(9), 2074. https://doi.org/10.3390/molecules29092074
4. Arefieva, O. D., Samus', M. A., Pisartseva, A. I., Krasitskaya, S. G., Vasylieva, M. S., & Maslova, N. V. (2020). Photo-Fenton degradation of methyl orange using heterogeneous catalysts based on polyphenylferrosiloxane. *Chemical Safety Science*, 4(2), 117–130. https://doi.org/10.25514/CHS.2020.2.18008

5. Burkhardt-Holm, P. (2010). Endocrine disruptors and water quality: a state-of-the-art review. *International Journal of Water Resources Development*, 26(3), 477–493. https://doi.org/10.1080/07900627.2010.489298
6. Durai, N. J., Gopalakrishna, G. V. T., Padmanaban, V. C., & Selvaraju, N. (2020). Oxidative removal of stabilized landfill leachate by Fenton's process: process modeling, optimization & analysis of degraded products. *RSC Advances*, 10, 3916-3925 https://doi.org/10.1039/C9RA09415F
7. Fleri, S. (2007). *Micellar method for mud treatment in sewage disposal plant* (Patent No. RU2303572C2). https://patents.google.com/patent/RU2303572C2/en
8. Hameed, Z. M., & Salman, R. H. (2024). Elimination of methyl orange dye with three dimensional electro-Fenton and sono-electro-Fenton systems utilizing copper foam and activated carbon. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(10), 44–59. https://doi.org/10.12912/27197050/191199
9. Höler, S., Degreif, D., Stix, F., Yang, S., Gao, S., Nagel, G., Moroni, A., Thiel, G., Bertl, A., & Rauh, O. (2023). Tailoring baker's yeast Saccharomyces cerevisiae for functional testing of channelrhodopsin. *PLOS ONE*, 18(4), e0280711. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280711
10. Hussain, S., Aneggi, E., & Goi, D. (2021). Catalytic activity of metals in heterogeneous Fenton-like oxidation of wastewater contaminants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2405–2424. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01185-z
11. Ignatenko, A. V. (2022). Analysis of waste waters toxicity and detoxication during their biological treatment. *Chemical Safety Science*, 6(1), 21–46. https://doi.org/10.25514/CHS.2022.1.21002
12. Ismail, G. A., & Sakai, H. (2025). Radical and catalyst effect on Fenton-like textile dyes' degradation process and techno-economical consideration. *Textiles*, 5(3), 37. https://doi.org/10.3390/textiles5030037
13. Kachalova, G. S. (2019). Coagulation and sorption treatment of wastewater. *Water and Ecology*, 2(78), 32–39. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.2.32-39
14. Kanakaraju, D., Glass, B. D., & Goh, P. S. (2025). Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: a review of recent advances. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(24), 14316–14350. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36547-5
15. Kant, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. *Natural Science*, 04(01), 22–26. https://doi.org/10.4236/ns.2012.41004
16. Kayani, K. F. (2025). Removal of pharmaceutical residues from aquatic systems using bimetallic metal–organic frameworks (BMOFs): a critical review. *RSC Advances*, 15(25), 20168–20182. https://doi.org/10.1039/D5RA03056K
17. Kyuregyan, G. P., Komarov, A. V., & Kyuregyan, O. D. (2022). Wastewater treatment methods. A review. *Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Fats*, 1-2, 70–72. https://doi.org/10.25812/VNIIG.2022.61.83.014
18. Liu, G., Huang, H., Xie, R., Feng, Q., Fang, R., Shu, Y., Zhan, Y., Ye, X., & Zhong, C. (2017). Enhanced degradation of gaseous benzene by a Fenton reaction. *RSC Advances*, 7(1), 71–76. https://doi.org/10.1039/C6RA26016K
19. Liu, Y., Chen, J., Duan, D., Zhang, Z., Liu, C., Cai, W., & Zhao, Z. (2024). Environmental impacts and biological technologies toward sustainable treatment of textile dyeing wastewater: a review. *Sustainability*, 16(24), Article 24. https://doi.org/10.3390/su162410867
20. Lykov, I. N., Kusacheva, S. A., Safronova, M. E., & Loginova, A. Yu. (2020). Environmental pollution by pharmaceuticals. *Ecology and Industry of Russia*, 24(8), 51–55. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-8-51-55
21. Meurs, E., Morshed, M. N., Kahoush, M., & Kadi, N. (2024). Study on Fenton-based discoloration of reactive-dyed waste cotton prior to textile recycling. *Scientific Reports*, 14(1), 24536. https://doi.org/10.1038/s41598-024-75450-w

22. Moorjani, B. T., & Gohil, K. (2021). A review of Fenton process for organic wastewater treatment. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 08(09), 1720–1737.
23. Omarov, Kh. B., Absat, Z. B., Aldabergenova, S. K., & Kulumbetova, I. K. (2022). Thermodynamic analysis of Mn, As-containing systems based on e-ph diagrams and partial pressures. *Vestnik KazUTB*, 3(16), 24–29. https://doi.org/10.58805/kazutb.v.3.16-26
24. Ostaschenko, T. M., Komarovska-Porokhnyavets, O. Z., & Lubebets, V. I. (2023). Antimicrobial activity of a pharmaceutical composition depending on the manufacturing technology. *Ukrainian Journal of Military Medicine*, 4(3), 148–152. https://doi.org/10.46847/ujmm.2023.3(4)-148
25. Paiu, M., Favier, L., & Gavrilescu, M. (2025). Photocatalytic approaches to treating mixtures of emerging organic pollutants in aquatic environments. *Environmental Engineering and Management Journal*, 24(4), 745–791. https://doi.org/10.30638/eemj.2025.058
26. Papadopoulou, G., Evgenidou, E., & Lambropoulou, D. (2025). Homogeneous and heterogeneous photo-Fenton-based photocatalytic techniques for the degradation of nile blue dye. *Applied Sciences*, 15(14), 7917. https://doi.org/10.3390/app15147917
27. Parmar, A. (2015). Fenton process: a case study for treatment of industrial waste water. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 1(2), 23–30.
28. Ramamurthy, K., Priya, P. S., Murugan, R., & Arockiaraj, J. (2024). Hues of risk: investigating genotoxicity and environmental impacts of azo textile dyes. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(23), 33190–33211. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33444-1
29. Ribeiro, J. A. S., Alves, J. F., Salgado, B. C. B., Oliveira, A. C., Araújo, R. S., & Rodríguez-Castellón, E. (2024). Heterogeneous photo-Fenton degradation of azo dyes over a magnetite-based catalyst: kinetic and thermodynamic studies. *Catalysts*, 14(9), 591. https://doi.org/10.3390/catal14090591
30. Samal, K., Mahapatra, S., & Hibzur Ali, M. (2022). Pharmaceutical wastewater as emerging contaminants (EC): treatment technologies, impact on environment and human health. *Energy Nexus*, 6, 100076. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100076
31. Satyam, S., & Patra, S. (2025). The evolving landscape of advanced oxidation processes in wastewater treatment: challenges and recent innovations. *Processes*, 13(4), 987. https://doi.org/10.3390/pr13040987
32. Shokri, A., & Fard, M. S. (2022). A critical review in Fenton-like approach for the removal of pollutants in the aqueous environment. *Environmental Challenges*, 7, 100534. https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100534
33. Slama, H. B., Chenari Bouket, A., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., Oszako, T., Luptakova, L., Golińska, P., & Belbahri, L. (2021). Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255. https://doi.org/10.3390/app11146255
34. Tarigan, A. Y., & Effendi, A. J. (2024). Kinetic study of paracetamol degradation with advanced oxidation process (AOP) combination of ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet (O_3/H_2O_2/UV). *Jurnal Multidisiplin Madani*, 4(4), 518–527. https://doi.org/10.55927/mudima.v4i4.8612
35. Tian, K., Pan, J., Liu, Y., Wang, P., Zhong, M., Dong, Y., & Wang, M. (2024). Fe-ZSM-5 zeolite catalyst for heterogeneous Fenton oxidation of 1,4-dioxane: effect of Si/Al ratios and contributions of reactive oxygen species. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(13), 19738–19752. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32287-0
36. Titchou, F. E., Zazou, H., Afanga, H., El Gaayda, J., Akbour, R. A., & Hamdani, M. (2021). Removal of persistent organic pollutants (POPs) from water and wastewater by adsorption and electrocoagulation process. *Groundwater for Sustainable Development*, 13, 100575. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100575

37. Tiwari, B., Sellamuthu, B., Ouarda, Y., Drogui, P., Tyagi, R. D., & Buelna, G. (2017). Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach. *Bioresource Technology*, 224, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.042
38. Tokumura, M., Wada, Y., Usami, Y., Yamaki, T., Mizukoshi, A., Noguchi, M., & Yanagisawa, Y. (2012). Method of removal of volatile organic compounds by using wet scrubber coupled with photo-Fenton reaction - preventing emission of by-products. *Chemosphere*, 89(10), 1238–1242. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.07.018
39. Trapido, M., Kulik, N., Goi, A., Veressinina, Y., & Munter, R. (2009). Fenton treatment efficacy for the purification of different kinds of wastewater. *Water Science and Technology*, 60(7), 1795–1801. https://doi.org/10.2166/wst.2009.585
40. Trench, A. B., Oturan, N., Demir, A., Moura, J. P. C., Trellu, C., Santos, M. C., & Oturan, M. A. (2025). Degradation of methylparaben by anodic oxidation, electro-Fenton, and photoelectro-Fenton using carbon felt-BDD cell. *Separation and Purification Technology*, 371, 133335. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133335
41. Vasilieva, I. A., Gustyleva, L. K., Samchenko, N. A., Ukolov, A. I., & Savelieva, E. I. (2019). Wastewater treatment by oxidative destruction of organic compounds using fenton's reagent. *Chemical Safety Science*, 3(2), 183–193. https://doi.org/10.25514/CHS.2019.2.16014
42. Waleng, N. J., & Nomngongo, P. N. (2022). Occurrence of pharmaceuticals in the environmental waters: African and Asian perspectives. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 4, 50–66. https://doi.org/10.1016/j.enceco.2021.11.002
43. Wilkinson, J. L., Boxall, A. B. A., Kolpin, D. W., Leung, K. M. Y., Lai, R. W. S., Galbán-Malagón, C., Adell, A. D., Mondon, J., Metian, M., Marchant, R. A., Bouzas-Monroy, A., Cuni-Sanchez, A., Coors, A., Carriquiriborde, P., Rojo, M., Gordon, C., Cara, M., Moermond, M., Luarte, T., Petrosyan, V., Perikhanyan, Y., Mahon, C. S., McGurk, C. J., Hofmann, T., Kormoker, T., Iniguez, V., Guzman-Otazo, J., Tavares, J. L., Gildasio De Figueiredo, F., Razzolini, M. T. P., Dougnon, V., Gbaguidi, G., Traoré, O., Blais, J. M., Kimpe, L. E., Wong, M., Wong, D., Ntchantcho, R., Pizarro, J., Ying, G.-G., Chen, C.-E., Páez, M., Martínez-Lara, J., Otamonga, J.-P., Poté, J., Ifo, S. A., Wilson, P., Echeverría-Sáenz, S., Udikovic-Kolic, N., Milakovic, M., Fatta-Kassinos, D., Ioannou-Ttofa, L., Belušová, V., Vymazal, J., Cárdenas-Bustamante, M., Kassa, B. A., Garric, J., Chaumot, A., Gibba, P., Kunchulia, I., Seidensticker, S., Lyberatos, G., Halldórsson, H. P., Melling, M., Shashidhar, T., Lamba, M., Nastiti, A., Supriatin, A., Pourang, N., Abedini, A., Abdullah, O., Gharbia, S. S., Pilla, F., Chefetz, B., Topaz, T., Yao, K. M., Aubakirova, B., Beisenova, R., Olaka, L., Mulu, J. K., Chatanga, P., Ntuli, V., Blama, N. T., Sherif, S., Aris, A. Z., Looi, L. J., Niang, M., Traore, S. T., Oldenkamp, R., Ogunbanwo, O., Ashfaq, M., Iqbal, M., Abdeen, Z., O'Dea, A., Morales-Saldaña, J. M., Custodio, M., De La Cruz, H., Navarrete, I., Carvalho, F., Gogra, A. B., Koroma, B. M., Cerkvenik-Flajs, V., Gombač, M., Thwala, M., Choi, K., Kang, H., Ladu, J. L. C., Rico, A., Amerasinghe, P., Sobek, A., Horlitz, G., Zenker, A. K., King, A. C., Jiang, J.-J., Kariuki, R., Tumbo, M., Tezel, U., Onay, T. T., Lejju, J. B., Vystavna, Y., Vergeles, Y., Heinzen, H., Pérez-Parada, A., Sims, D. B., Figy, M., Good, D., & Teta, C. (2022). Pharmaceutical pollution of the world's rivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(8), e2113947119. https://doi.org/10.1073/pnas.2113947119
44. Wołowicz, A., & Munir, H. M. S. (2025). Emerging organic micropollutants as serious environmental problem: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 958, 177948. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177948
45. Zhao, L., Murrieta, M. F., Padilla, J. A., Lanzalaco, S., Cabot, P. L., & Sirés, I. (2024). Bimetallic FeCu-MOF derivatives as heterogeneous catalysts with enhanced stability for electro-Fenton degradation of lisinopril. *Science of The Total Environment*, 953, 176110. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176110

46. Zhuo, Y., Meng, H., Zhang, Y., Chen, Y., & Cui, J. (2025). Peroxymonosulfate activation by fe/c composites for paracetamol degradation: performance evaluation and mechanism insight. *Catalysts*, 15(3), 217. https://doi.org/10.3390/catal15030217
47. Zong, Z., Huang, Y., Kwan, J., & Hankins, N. P. (2025). Standardized benchmarking of advanced oxidation processes for tetracycline degradation with life cycle assessment and economic evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 525, 170664. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170664

Ағын суларды детоксикациялау үшін Фентон тәрізді жүйелерді қолдану

Дильназ Женисова, Гульшод Алламбергенова, Ерлан Байкенов, Руслан Сафаров

Аңдатпа: Индустрияландыру қоршаған орта үшін күрделі мәселелерге, ең алдымен, су нысандарының фармацевтикалық препараттар, синтетикалық бояғыштар және уытты органикалық қосылыстар сияқты тұрақты органикалық ластағыштармен (ТОЛ) ластануына әкелді. Тазартудың дәстүрлі әдістері, соның ішінде биологиялық процестер мен коагуляция, бұл химиялық тұрақты заттардың толық ыдырауы үшін жиі жеткіліксіз болып шығады. Бұл шолуда өнеркәсіптік ағын суларды детоксикациялауға арналған тотығудың перспективалы озық процесі (АОР) ретінде Фентон тәрізді жүйелерді қолдану жүйелі түрде қарастырылады. Атап айтқанда, шолу үш басым ластаушы класс – уытты органикалық қосылыстар, синтетикалық бояғыштар және фармацевтикалық қалдықтар – бойынша деградация тиімділігін салыстыруды, процестің жұмысын анықтайтын каталитикалық және операциялық факторларды белгілеуді және өнеркәсіптік деңгейде масштабтауға қатысты технологиялық-экономикалық шектеулерді бағалауды мақсат етеді. Белсенді гидроксил радикалдарының (•OH) қатысуымен жүретін жұмыс принциптері мен каталитикалық циклдер егжей-тегжейлі сипатталған, бұл ретте классикалық гомогенді реакциялардан неғұрлым әмбебап гетерогенді жүйелерге көшуге баса назар аударылады. Қазіргі жетістіктер өтпелі металдарды (Cu, Mn, Ni) және металл-органикалық қаңқалар (MOF) мен биметалдық оксидтер сияқты жаңа материалдарды пайдалану бұл процестердің бейтарапқа жақын pH жағдайында тиімді жұмыс істеуіне мүмкіндік беретінін көрсетіп, дәстүрлі Фентон химиясының қышқылдығы бойынша қатаң шектеулерді еңсереді. Сонымен қатар, ультракүлгін сәулелену (фото-Фентон), электр энергиясы (электро-Фентон) және ультрадыбыс (соно-Фентон) сияқты физикалық стимулдарды біріктіру радикалдардың түзілуін және күрделі молекулалардың минералдану жылдамдығын айтарлықтай арттыратыны көрсетілген. Шолуда тазарту тиімділігіне салыстырмалы талдау берілген, онда әртүрлі уытты топтарды жою дәрежесі жиі 95 %-дан асады. Соңында, шламның түзілуі мен энергия сыйымдылығын қоса алғанда, техникалық және экономикалық шектеулер, сондай-ақ бұл технологияларды тұрақты өнеркәсіптік қолдану үшін масштабтау перспективалары талқыланады.

Түйін сөздер: Фентон тәрізді жүйелер; тотығудың озық процестері; ағын суларды тазарту; гетерогенді катализ; органикалық ластағыштар; синтетикалық бояғыштар; фармацевтикалық препараттар.

Применение Фентон-подобных систем для детоксикации сточных вод

Дильназ Женисова, Гульшод Алламбергенова, Ерлан Байкенов, Руслан Сафаров

Аннотация: Индустриализация привела к серьезным экологическим вызовам, прежде всего к загрязнению водных объектов стойкими органическими загрязнителями (СОЗ), такими как фармацевтические препараты, синтетические красители и токсичные органические соединения. Традиционные методы очистки, включая биологические процессы и коагуляцию, часто оказываются недостаточными для полной деградации этих химически стабильных веществ. В данном обзоре систематически рассматривается применение Фентон-подобных систем как перспективного процесса глубокого окисления (AOP) для детоксикации промышленных сточных вод. В частности, цель обзора заключается в сравнении эффективности деградации трёх приоритетных классов загрязнителей – токсичных органических соединений, синтетических красителей и фармацевтических остатков – и определении каталитических и эксплуатационных факторов, влияющих на работу процесса, а также оценке технико-экономических ограничений, связанных с промышленным масштабированием. Подробно описаны принципы работы и каталитические циклы с участием активных гидроксильных радикалов (•OH), при этом особое внимание уделяется переходу от классических гомогенных реакций к более универсальным гетерогенным системам. Современные достижения демонстрируют, что использование переходных металлов (Cu, Mn, Ni) и новых материалов, таких как металлоорганические каркасы (MOF) и биметаллические оксиды, позволяет этим процессам эффективно работать при pH, близком к нейтральному, преодолевая строгие ограничения по кислотности традиционной химии Фентона. Кроме того, показано, что интеграция физических стимулов, таких как ультрафиолетовое излучение (фото-Фентон), электричество (электро-Фентон) и ультразвук (соно-Фентон), значительно повышает генерацию радикалов и скорость минерализации сложных молекул. В обзоре приводится сравнительный анализ эффективности очистки, при которой степень удаления различных групп токсичных веществ часто превышает 95 %. Наконец, обсуждаются технические и экономические ограничения, включая шламообразование и энергоемкость, наряду с перспективами масштабирования этих технологий для устойчивого промышленного применения.

Ключевые слова: Фентон-подобные системы; процессы глубокого окисления; очистка сточных вод; гетерогенный катализ; органические загрязнители; синтетические красители; фармацевтические препараты.

ХҒТАР 06.81.23
Химия
Шолу

MXene синтезіндегі заманауи жетістіктер: катализ және тұрақты энергия сақтау саласындағы қолданылуы

Сейтхан Азат[1], Жадыра Асенгали[1], Инабат Сапаргали[1], Қайнаубек Тоштай[2]*

[1]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан; s.azat@satbayev.university, sapargali.i@mail.ru, zhadyraassengali@gmail.com
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; kainaubek.toshtay@kaznu.kz
*Корреспонденция: kainaubek.toshtay@kaznu.kz

Аңдатпа. Екіөлшемді (2D) MXene материалдар- ауыспалы металдардың карбидтері, нитридтері және карбонитридтерінен тұратын, соңғы жылдары қарқынды дамып келе жатқан функционалдық материалдар класы. MAX-фазалардан селективті химиялық жою арқылы алынатын MXендер жоғары электрөткізгіштік, реттелетін беткі химия, гидрофильділік және қабатты архитектура сияқты бірегей қасиеттер кешенімен ерекшеленеді. Бұл сипаттамалар MXендерді графен мен ауыспалы металдар сияқты дәстүрлі 2D материалдармен салыстырғанда энергия тасымалы мен беткі өзара әрекеттесуді қажет ететін қолданбалар үшін аса тартымды етеді. Осы шолу мақалада MXene синтездеудегі соңғы жетістіктер қарастырылады, дәстүрлі әдістермен қатар, әсіресе фторсыз және фторы аз маршруттарға, соның ішінде электрохимиялық әдіс және еріген тұздармен өңдеу синтез әдістеріне басымдық беріледі. Бұл тәсілдердің беттік функционалдық топтардың табиғатына, құрылымдық тұрақтылыққа және материал қасиеттеріне әсері жүйелі түрде талданады. Сонымен қатар, деламинация, гетероатомдармен легирлеу және гибридтеу стратегиялары MXендердің функционалдық тиімділігін арттырудың негізгі жолдары ретінде талқыланады. MXендердің катализ, энергияны сақтау және түрлендіру салаларындағы кеңейіп келе жатқан қолданбалары құрылым–қасиет–тиімділік байланыстары тұрғысынан қарастырылады. Энергия сақтау құрылғыларында MXene материалдары литий-ионды және мырыш-ионды батареялар мен суперконденсаторларда жоғары сыйымдылық, ұзақ циклдық тұрақтылық және иондардың жылдам тасымалын қамтамасыз етеді. MXene және олардың гибридтік туындылары фотокатализ, электркатализ және көмірқышқыл газын (CO_2) гидрлеу жүйелерінде жоғары тиімділік, тұрақтылық және икемділікті қамтамасыз ететін перспективалы материалдар болып табылады. Бұл шолу MXендерді ұтымды жобалауға арналған біртұтас ғылыми негіз қалыптастырып, орнықты әрі қолданбалы MXene-негізіндегі технологияларды дамытуға бағытталған болашақ зерттеулерге жол ашады.

Түйін сөздер: MAX фаза; Mxene; синтез әдістері; катализ; энергия сақтау

Дәйексөз: Азат, С., Асенгали, Ж., Сапаргали, И., Тоштай, Қ. (2026). MXene синтезіндегі заманауи жетістіктер: катализ және тұрақты энергия сақтау саласындағы қолданылуы. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 155(2), 68-102. https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-68-102

Академиялық редакторлар:
Э.Е. Копишев,
С.С. Досмағамбетова

Редакцияға түсті: 20.02.2026
Түзетілді: 17.07.2026
Қабылданды: 20.07.2026
Басылымға шықты: 31.07.2026

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

1. Кіріспе

Жетілдірілген функционалдық материалдардың қарқынды дамуы энергияның тұрақтылығын қамтамасыз ету, қоршаған ортаны қорғау және химиялық түрлену үдерістерінің тиімділігін арттыру сияқты мәселелерді шешуде маңызды рөл атқарады. Перспективалы материалдық платформалардың ішінде екіөлшемді (2D) материалдар жоғары бет/көлем қатынасы, электрондық құрылымының реттелгіштігі және бірегей беттік қасиеттері арқасында ерекше назарға ие болды. Графен мен ауыспалы металдардың дихалькогенидтері бастапқы зерттеулерде жетекші орын алғанымен, олардың ішкі шектеулері атап айтқанда, электрондық тыйым салынған аймақтың болмауы немесе электрөткізгіштіктің салыстырмалы түрде төмендігі, баламалы 2D жүйелерді іздеуге түрткі болды. Осы тұрғыда ауыспалы металдардың карбидтері, нитридтері және карбонитридтерінен тұратын 2D материалдар тобы MXene, жоғары әмбебаптығымен және қарқынды дамуымен ерекшеленетін жаңа буын материалдары ретінде қалыптасты (Ahmed, Anjum, Gogotsi, & Alshareef, 2017; Urbankowski et al., 2016; Er, Shenoy, & Barsoum, 2023)

MXene алғаш рет 2011 жылы Ti_3AlC_2 MAX фазаларынан алюминий қабаттарын селективті түрде (etching) алу нәтижесінде, $Ti_2C_2T_x$ наноқабатшалары түрінде синтезделді (Alhabeb et al., 2017). Осы іргелі жаңалықтан кейін, оған қатысты зерттеулер қарқынды түрде дамып, эксперименттік жолмен алынған ондаған құрамдар және теориялық тұрғыда болжанған одан да көп құрылымдар ұсынылды. Көптеген дәстүрлі 2D материалдармен салыстырғанда, MXene металл тәрізді жоғары электрөткізгіштік, гидрофильді беттер, механикалық беріктік және химиялық тұрғыдан белсенді интерфейстер сияқты сирек кездесетін қасиеттер кешенін көрсетеді (Zhao, Que, Chen, & Yang, 2020). Бұл ерекшеліктер MXендерді тиімді заряд тасымалын және берік беткі өзара әрекеттесуді талап ететін қолданбалар үшін, айрықша тартымды материалдарға айналдырады (Sahith et al., 2025).

MXene ауыспалы металдардың карбидтері, нитридтері немесе карбонитридтерінен тұрады. Құрылымдық тұрғыдан, MXene әдетте $M_{n+1}X_nT_x$ жалпы формуласы арқылы беріледі, мұндағы M - бастапқы ауыспалы металл, X - көміртек немесе азот, ал T_x -синтез барысында енгізілетін –OH, –O және –F сияқты беттік функционалдық топтарын білдіреді. n мәні көбіне 1-ден 3-ке дейін өзгеріп, құрылымдық конфигурациялардың кең ауқымын қалыптастырады, ал –Cl немесе –S топтары пассивті қалдықтар емес, керісінше MXендердің электрондық құрылымына, беткі белсенділігіне, қабатаралық қашықтыққа және қоршаған орта тұрақтылығына шешуші әсер ететін маңызды құрамдас бөліктер болып табылады (Kang et al., 2017; Ding et al., 2017). MXендер үшөлшемді (3D) прекурсорлық материалдар-MAX фазаларынан ($M_{n+1}AX_n$) синтезделеді, мұнда A атомдары IIIA немесе IVA топтарына жататын элементтер болып табылады. Бұл синтез стратегиясының негізінде MAX фазаларындағы әртүрлі химиялық байланыстардың беріктік айырмашылығы жатыр: атап айтқанда, M-A байланыстары M-X байланыстарына қарағанда термодинамикалық және химиялық тұрғыдан әлсіз болып келеді. Осы айырмашылықты пайдалана отырып, қышқылдық немесе басқа да белсенді реагенттер көмегімен A қабаты селективті түрде алынып тасталады. Нәтижесінде ауыспалы металл мен көміртек/азот атомдарынан тұратын M-X қаңқасы бұзылмай сақталып, 2D MXene құрылымы түзіледі, бұл материалдың бірегей физика-химиялық қасиеттерінің қалыптасуына негіз болады (Rana, Raza, Anwar, & Nazar, 2025; Elsa et al., 2025). Сондықтан MXene статикалық 2D кристаллдар ретінде қарастыруға болмайды; олар химиялық тұрғыдан бағдарланатын материалдар болып табылады. Олардың қасиеттері синтез және қосымша өңдеу шарттарын ақылмен басқару арқылы бапталуы мүмкін.

MXендерді синтездеудегі соңғы жетістіктер бұл материалдардың құрамдық әртүрлілігін, құрылымдық реттелгіштігін және функционалдық тиімділігін едәуір кеңейтті. Дәстүрлі синтез тәсілдері MAX фазаларынан A-қабат элементтерін селективті түрде алып тастау үшін фторсутек қышқылына (HF) негізделген үдеріске сүйенеді. Алайда, жоғары тиімділігіне қарамастан, HF қолданылатын әдістер қауіпсіздік, қоршаған ортаға әсері және өндірістік

ауқымда жүзеге асыру мүмкіндігі тұрғысынан елеулі мәселелер туындатады. Осыған байланысты соңғы жылдары балама стратегияларды әзірлеуге бағытталған зерттеулер қарқынды дамуда, олардың қатарына HF-тің in situ түзілуі, балқытылған тұздармен жою, электрохимиялық әдістер, сондай-ақ фторсыз немесе фторы аз маршруттар жатады. Бұл жаңа тәсілдер қауіпті химиялық реагенттерді пайдалануды азайтып қана қоймай, беттік химиясын және ақаулардың түзілуін дәлірек басқаруға мүмкіндік береді, сол арқылы қолданысқа бейімделген МХендерді жобалауға жаңа мүмкіндіктер ашады (Li et al., 2017; Naguib et al., 2011; Zhang et al., 2017).

MXene-дердің әлеуетін ашуда деламинация және құрылымдық инженерия саласында айтарлықтай ілгерілеу байқалды. Интеркаляцияға негізделген эксфолиация бірқабатты және азқабатты MXene наноқабаттарын жоғары беттік аудан мен қолжетімді белсенді орталықтарымен алуға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, ақауларды инженериялау, гетероатомдармен легирлеу және металдар, оксидтер немесе көміртек материалдарымен гибридтеу электрондық қасиеттерді реттеу және функционалдық тиімділікті арттыруға бағытталған (Antony Jose et al., 2025; Liu et al., 2021; Younis et al., 2025). Осы жетістіктер MXene-дерді зертханалық қызығушылық нысанынан күрделі химиялық және электрохимиялық үдерістерді шешуге қабілетті инженерлік платформалар деңгейіне көтерді.

МХендердің қолдану аясының кеңеюі әсіресе катализ, энергетика және экологиялық технологияларда айқын көрінеді. Каталитикалық жүйелерде олар белсенді катализатор, тасымалдағыш және электрондық промотор ретінде сутек бөлінуі, оттек реакциялары, CO_2 түрленуі және көмірсутектер риформингінде жоғары тиімділік көрсетеді. Реттелетін беттік функциялары мен жоғары электрөткізгіштігі адсорбция энергиясы мен реакция жолдарын басқаруға мүмкіндік береді, ал металл–тасымалдағыш өзара әрекеттесуі дара атомдар мен ультрақысқа кластерлерді тұрақтандырады. Осыған байланысты МХендер гетерогенді катализде дәстүрлі тіректерге тиімді балама болып саналады (Mussa, Askaruly, Bexeitova, Azat, & Toshtay, 2025; Pandit et al., 2025; Sidorowicz et al., 2025).

Энергияны сақтау және түрлендіру саласында МХендер әртүрлі ионды аккумуляторларда, суперконденсаторлар мен гибридті құрылғыларда жоғары тиімділік көрсетуде. Қабатты құрылымы иондардың жылдам диффузиясын қамтамасыз етіп, жоғары электрөткізгіштік ішкі кедергіні төмендетеді. Сонымен қатар, беттік химия мен қабатаралық қашықтықты басқару сыйымдылықты, жылдамдықты және циклдік тұрақтылықты арттырады. Бұл МХендерді жоғары өнімді әрі сенімді жаңа буын энергетикалық материалдар қатарына қосады (Jussambayev et al., 2025; Mendhe et al., 2026; Mehrpooya, Eivari, Ganjali, & Lee, 2026).

МХендер экологиялық технологиялар саласында да, соның ішінде суды тазалау, ауыр металдарды адсорбциялау, газдарды бөлу және электромагниттік кедергілерден қорғау бағыттарында артып келе жатқан қызығушылыққа ие. МХен беттерінің металл иондары мен органикалық ластағыштарға жоғары бейімділігі, олардың құрылымдық реттелгіштігімен үйлескенде, тиімді әрі селективті тазалау үдерістерін жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, олардың электрөткізгіштігі мен тотығу-тотықсыздану белсенділігі электрохимиялық су тазалау және ластағыштарды ыдырату үдерістерінде табысты пайдаланылып, МХендердің экологиялық қоршаған ортаны қалпына келтіруде, көпфункционалды табиғатын айқындайды (Dhas, Pansare, & Katariya, 2026; Ding et al., 2025).

Осы елеулі жетістіктерге қарамастан, МХендердің кең ауқымда қолданылуын шектейтін бірқатар мәселелер әлі де сақталуда. Негізгі мәселелердің бірі - олардың әсіресе атмосфералық немесе сулы орта жағдайларында тотығуға және құрылымдық деградацияға бейімділігі. Сонымен қатар, синтездің стандартталған протоколдарының болмауы және беттік функционалдық топтарының бірізді емес сипатталуы әртүрлі зерттеулер арасындағы нәтижелерді салыстыруды қиындатып, әмбебап «құрылым–қасиет» байланыстарын қалыптастыруға кедергі келтіреді. Бұған қоса, соңғы жұмыстардың көпшілігі жаңа синтез маршруттары мен қолданбаларға басымдық бергенімен, синтез химиясы мен функционалдық

тиімділік арасындағы байланыстарды түсіндіретін біртұтас механизмдік түсінік әлі де жеткілікті деңгейде дамымаған.

Осы саладағы зерттеулердің қарқынды дамуын ескере отырып, МХендерді синтездеу мен қолданудағы соңғы жетістіктерге жаңартылған әрі сыни тұрғыдан бағаланған шолу жасау аса өзекті болып табылады. Әсіресе сипаттамалық қорытындылармен шектелмей, синтез стратегиялары, беткі химия және каталитикалық, энергетикалық әрі экологиялық жүйелердегі тиімділік арасындағы өзара байланыстарды терең талдайтын шолуларға сұраныс артып келеді.

Осы шолуда біз МХендерді синтездеудегі соңғы жетістіктерді жан-жақты қарастырып, балама жою стратегияларына, фторсыз маршруттарға және құрылымдық инженерия тәсілдеріне ерекше назар аударылады. Сонымен қатар, бұл дамулардың беттік химияға, электрондық құрылымға және материал тұрақтылығына әсерін талданады. Бұдан бөлек, МХендердің катализ, энергияны сақтау және түрлендіру, сондай-ақ экологиялық технологиялар салаларындағы кеңейіп келе жатқан қолданбаларын негізгі тиімділік сипаттамалары мен шешілмеген мәселелерді атап көрсете отырып талқылаймыз. Синтез, құрылым және функционалдық қасиеттер арасындағы өзара тәуелділікті айқындау арқылы, бұл шолу МХендерді ұтымды жобалауға арналған біртұтас негіз қалыптастыруды және болашақ зерттеулерді ауқымды әрі орнықты МХенге негізделген технологиялар бағытына бағдарлауды мақсат етеді.

2. MAX фаза және MXeпдердің кристалдық құрылымы мен химиясы

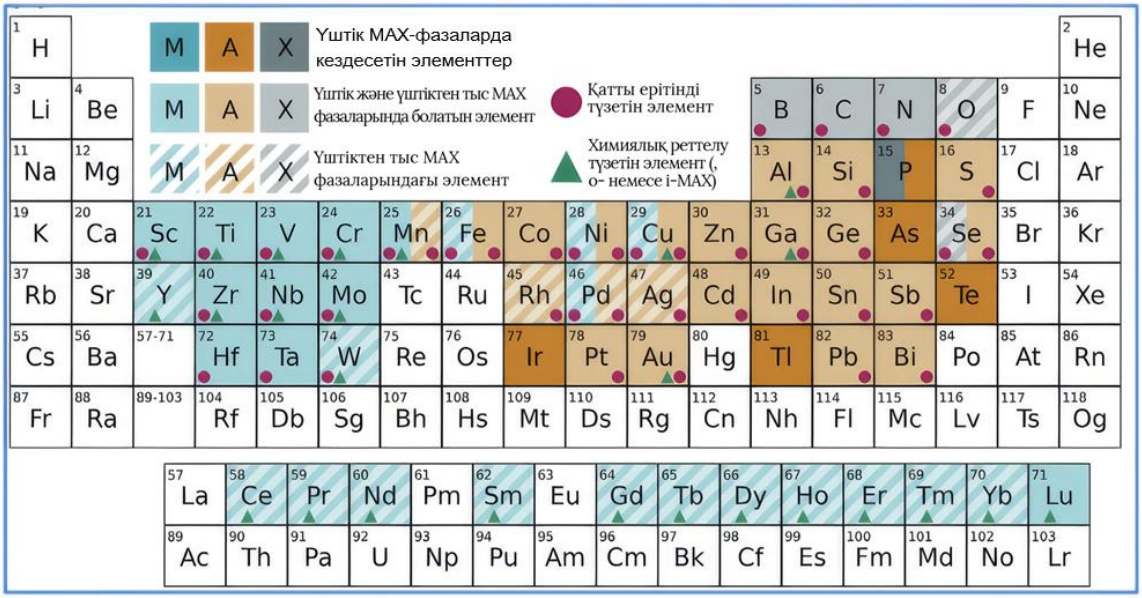
MAX-фазалар класын сипаттайтын жалпылама құрылымдық формуланы $M_{n+1}AX_n$ ретінде тұжырымдады. Мұнда n мәні 1-ден 3-ке дейін өзгеріп, материалдың стехиометриялық және кристаллохимиялық ерекшеліктерін анықтайды. Аталған параметрге сәйкес MAX-фазалар 211 (n=1), 312 (n=2) және 413 (n=3) типті жүйелерге жіктеледі (Barsoum, 2000). Бұл жіктеу қабаттардың қайталану реттілігін көрсетіп қана қоймай, олардың құрылымдық анизотропиясы мен қасиеттерінің қалыптасуында шешуші рөл атқарады. MAX-фазалардың M компоненті периодтық жүйенің ауыспалы металдары қатарынан таңдалады және негізінен 3-топ (Sc), 4-топ (Ti, Zr, Hf), 5-топ (V, Nb, Ta) және 6-топ (Cr, Mo) элементтерін қамтиды. Бұл металдар MAX-фазаларға жоғары балқу температурасы, механикалық төзімділік және жақсы электрлік әрі жылулық өткізгіштік сияқты металдық қасиеттер береді. A элементі периодтық жүйенің 12-16 топтарына жататын p-блок элементтері ұсынылады (Al, Ga, In, Si, Ge, Sn, P, As, S және т.б.). Аталған атомдар құрылымда салыстырмалы түрде әлсіз байланысқан қабаттар түзеді, бұл MAX-фазалардың ерекше өңделгіштігін қамтамасыз етіп, селективті химиялық еріту арқылы екіөлшемді MXene материалдарын алудың теориялық және практикалық негізін қалайды. Ал X позициясын көміртек немесе азот атомдары иеленеді. Бұл элементтер M–X арасында берік ковалентті байланыстар түзіп, MAX-фазалардың химиялық және термиялық тұрақтылығын, сондай-ақ құрылымдық тұтастығын қамтамасыз етеді. Осы кристалдық құрылымның көрнекі бейнесі 1-суретте көрсетілген.

Ғылыми дереккөздерде 340-тан астам MAX-фаза сипатталған және бұл материалдар класының ауқымы үздіксіз кеңеюде. Қазіргі уақытта жүргізілген жүйелі эксперименттік зерттеулердің нәтижесінде $M_{n+1}AX_n$ типіне жататын 70-тен астам дербес MAX-фаза сенімді түрде синтезделіп, олардың кристалдық құрылымы мен негізгі қасиеттері жан-жақты сипатталған (Dahlqvist, Barsoum, & Rosen, 2024; Zeng et al., 2024). Бұл материалдар тобына құрылымдық және химиялық тұрғыдан әртүрлі қосылыстар кіреді, олардың ішінде ең көп зерттелгендері ретінде Ti_2AlC, Ti_2AlN, V_2AlC, Nb_2AlC, Ti_3AlC_2, Ti_3SiC_2, Zr_3AlC_2, Ti_4AlN_3, V_4AlC_3, Nb_4AlC_3 және Ta_4AlC_3 сияқты фазаларды атап өтуге болады. Аталған MAX-фазалар жоғары термиялық тұрақтылық, жақсы электр және жылуөткізгіштік, сондай-ақ механикалық беріктік сияқты қасиеттердің үйлесімімен сипатталады.

Бұл MAX-фазалардың маңызды артықшылықтарының бірі - олардың 2D MXene материалдарын алу үшін тиімді бастапқы прекурсорлар ретінде қолданылу мүмкіндігі. Соңғы жылдары жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, жоғарыда аталған бірқатар MAX-фазалар

селективті химиялық жою және кейінгі қабаттарды ажырату (exfoliation) үдерістері арқылы, сәтті түрде 2D құрылымдарға түрлендірілген. Нәтижесінде Ti_2AlC және Ti_2AlN фазаларынан тиісінше Ti_2C және Ti_2N, V_2AlC және Nb_2AlC қосылыстарынан V_2C және Nb_2C, ал Ti_3AlC_2 және Zr_3AlC_2 фазаларынан Ti_3C_2 және Zr_3C_2 MXene материалдары алынғаны көрсетілген (Pietzka & Schuster, 1994; Ding et al., 2023).

Сонымен қатар, *n* мәні жоғары MAX-фазалар да MXene синтезі тұрғысынан ерекше қызығушылық тудырады. Мысалы, Ti_4AlN_3, V_4AlC_3, Nb_4AlC_3 және Ta_4AlC_3 фазалары негізінде Ti_4C_3, V_4C_3, Nb_4C_3 және Ta_4C_3 типті көпқабатты MXene құрылымдары табысты түрде алынған (Jeitschko, Nowotny, & Benesovsky, 1964; Etzkorn, Ade, & Hillebrecht, 2007). Жалпы алғанда, эксперименттік түрде синтезделген MAX-фазалардың алуантүрлілігі мен олардың MXene материалдарына тиімді түрде түрлену мүмкіндігі, бұл материалдар класын қазіргі заманғы материалтанудың қарқынды дамып келе жатқан бағыттарының бірі ретінде айқындайды.

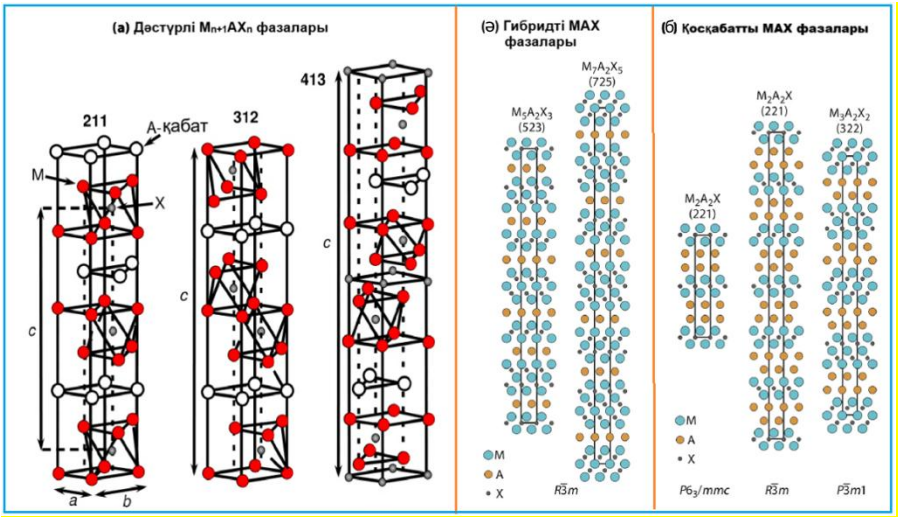


Сурет 1. Периодтық кесетеде MAX-фазалар құрамындағы элементтер: M элементтері – көк, A – қызғылт сары, X – сұр түспен белгіленген. үштік MAX-фазаларда кездесетін элементтер қою түспен, ал жолақты түстер үштік емес MAX-фазаларға тән элементтерді білдіреді. Күлгін шеңберлер қатты ерітінді түзетін элементтерді, ал қою көк үшбұрыштар M-, A- немесе X-орындарындағы химиялық реттелуді көрсетеді (Dahlqvist, Barsoum, & Rosen, 2024)

MAX-фаза - наноқабатты үшкомпонентті материалдар класына жататын, гексагональды кристалдық торға ие қосылыс болып табылады. Ол $P6_3/mmc$ кеңістік тобында кристалданады және құрылымында A-топ атомдарының октаэдрлік қабаттардың аралас немесе қабаттасып орналасуы типті құрылымға ие, [M–X] октаэдрлері арасында кезектесіп орналасады. Аталған кристалдық архитектураның көрнекі бейнесі 2-суретте берілді. 2a-суретте көрсетілгендей, MAX-фазалар белгілі бір стехиометриялық заңдылыққа сәйкес қалыптасатын материалдар тобы болып табылады. Мысалы, M_2AX (211) типті MAX-фаза құрылымында екі ауыспалы металл қабаты (M), бір A-топ элементінің қабаты (A) және бір көміртек немесе азот қабаты (X) кезектесіп орналасқан. Бұл қабатты құрылым материалдың анизотропты физика-химиялық қасиеттерінің қалыптасуына негіз болады. Ал M_4AX_3 (413) стехиометриясына ие MAX-фазалар төрт ауыспалы металл қабатын, бір A-топ элементінің қабатын және үш көміртек немесе азот қабатын қамтиды. Осыған ұқсас түрде, *n* мәні жоғарылаған сайын қабаттар саны да артады. Мысалы M_5AX_4 формуласына сәйкес MAX-фазалар бес ауыспалы металл қабатынан, бір A-топ элементінен және төрт көміртек немесе азот қабатынан тұрады.

Одан әрі, M_6AX_5 типті MAX-фазалар алты ауыспалы металл қабатын, бір A-топ элементінің қабатын және бес X-қабатын (C немесе N) қамтитын қайталанатын қабатты

құрылыммен сипатталады. Мұндай көпқабатты архитектурада ауыспалы металл қабаттары А-топ элементінің қабаттарымен және көміртек/азот қабаттарымен жүйелі түрде алмасып орналасады (Nick et al., 2021; Lin et al., 2006). Осылайша, MAX-фазалардың қабатты кристалдық құрылымы олардың бір мезгілде металдық (электр және жылуөткізгіштік, механикалық беріктік) және керамикалық (жоғары температураға, тотығуға және химиялық әсерлерге төзімділік) қасиеттерді көрсетуіне мүмкіндік береді. Бұл ерекшелік MAX-фазаларды заманауи материалтану, энергия сақтау және катализ салалары үшін аса перспективті функционалдық материалдар қатарына жатқызады.



Сурет 2. Әртүрлі MAX-фазалардың кристалдық құрылымдарыры: а – Дәстурлі MAX фазалары; ә – гибридті MAX фазалары; б – қосқабатты MAX фазалары (Magnuson & Mattesini, 2017; Ding et al., 2025)

Өзара біріккен MAX-фазалар – әртүрлі $M_{n+1}AX_n$ блоктарының қабаттасып өсуі нәтижесінде түзілетін күрделі кристалдық құрылымдарға ие. MAX-материалдар жүйесіндегі күрделенген кристаллохимиялық архитектурасымен ерекшеленетін дербес бағыт ретінде қарастырылады. Бұл материалдарда бірдей емес $M_{n+1}AXn$ құрылымдық блоктары (*n* мәндері әртүрлі) бір кристалдық тор ішінде ретті түрде алмасып қабаттасады, нәтижесінде қабаттардың қалыңдығы мен қайталану периодтары классикалық MAX-фазалардан түбегейлі өзгеше болады. Осындай көпдеңгейлі қабатты құрылым 2б-суретте бейнеленген. Зерттеулер гибридті MAX-фазалардың ең жиі кездесетін конфигурациялары 523 және 725 типтері екенін көрсетеді. 523 құрылымы 211 және 312 MAX-фазаларының бір кристалда өзара бірігуі нәтижесінде қалыптасса, 725 жүйесі 312 және 413 құрылымдық блоктарының кезектесуі арқылы түзіледі (Högberg et al., 2005).

Титан негізді жүйелер гибридті MAX-фазалардың қалыптасуын айқын мысалмен көрсетеді. Атап айтқанда, Ti_3SiC_2 фазасымен қатар $Ti_5Si_2C_3$ және $Ti_7Si_2C_5$ тәрізді күрделі қабатты фазалардың түзілуі байқалады, олар негізгі фазаның құрылымдық жалғасы ретінде қарастырылады (Palmquist et al., 2004). Сол сияқты, Ti_2AlC материалын термиялық өңдеу барысында $Ti_5Al_2C_3$ фазасының пайда болуы гибридті құрылымдардың жоғары температурада термодинамикалық тұрғыдан тұрақты бола алатынын дәлелдейді (Lane et al., 2012).

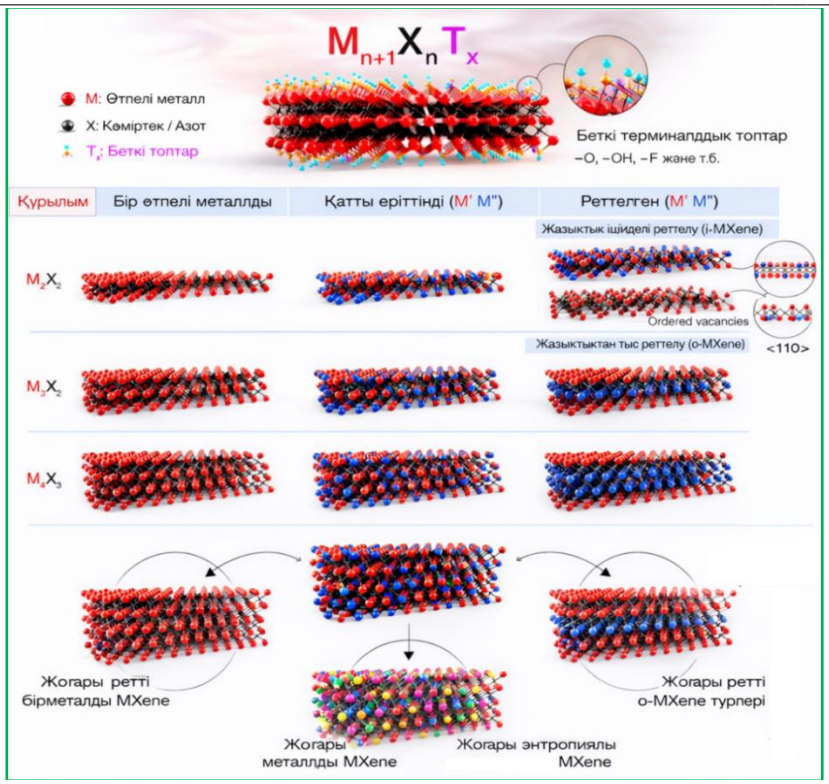
Германийлі жүйелерде де осындай құбылыстар анықталған: $Ti_{n+1}GeC_n$ жұқа қабықшаларында $Ti_5Ge_2C_3$ және $Ti_7Ge_2C_5$ фазалары түзіліп, олардың қабаттары әртүрлі қалыңдықтағы MAX-блоктардың жүйелі түрде қабаттасуынан құралғаны көрсетілген (Högberg et al., 2005). Бұл нәтижелер гибридті MAX-фазалардың тек көлемдік материалдарда ғана емес, сонымен қатар жұқа қабықшаларда да түзіле алатынын айқындайды.

Маңыздысы, мұндай гибридті MAX-фазалар классикалық $M_{n+1}AX_n$ жүйелерінен симметриясының төмендеуімен ерекшеленеді. Қабаттардың әркелкі қалыңдығы мен күрделі

қабаттасу реттілігі, олардың $R\bar{3}m$ кеңістік тобында кристалдануына алып келеді, бұл олардың физикалық және электрондық қасиеттеріне тікелей әсер етеді. Сонымен қатар, құрылымдық әртүрліліктің тағы бір мысалы ретінде қос А-қабатты МАХ-фазаларды атауға болады. Қазіргі таңда белгілі мұндай фазалардың ішінде Mo_2Ga_2C ғана $P6_3$ /mmc симметриясын сақтай отырып, төменнен-жоғары (bottom-up) синтез әдісімен алынған бірегей материал ретінде ерекшеленеді (2б-сурет) (Hu et al., 2015; Lai et al., 2015). Жалпы алғанда, гибридті МАХ-фазалардың дамуы МАХ-материалдар тұжырымдамасын жаңа деңгейге көтеріп, қабатты құрылымды мақсатты басқару арқылы реттелген қасиеттерге ие жаңа функционалдық материалдарды жобалауға кең мүмкіндіктер ашады.

MXene материалдары ауыспалы металдардың карбидтері, нитридтері және карбонитридтері қатарына жататын екіөлшемді материалдардың жаңа буынын құрайды. Бұл материалдардың бастапқы прекурсорлары МАХ-фазалар болып табылады және олар $M_{n+1}AX_n$ жалпы формуласымен сипатталады, мұнда n мәні 1, 2 немесе 3 болуы мүмкін. Аталған құрылымда А элементі периодтық жүйенің 13 немесе 14 топтарына жататын элементтермен (Al, Ga, In, Si, Ge, As, Sn, Pb және т.б.) ұсынылады, М ретінде ерте ауыспалы металдар (Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Ta және басқалары) қолданылады, ал X позициясын көміртек немесе азот атомдары иеленеді.

MXene материалдарының кристалдық құрылымы көп жағдайда өздерінің бастапқы прекурсоры болып табылатын МАХ-фазалардың симметриясын сақтайды және $P6_3/mmc$ кеңістік тобына жатады. Бұл симметрия гексагональды кристалдық торға тән және MXene-дердің негізгі құрылымдық қаңқасын анықтайды. MXene материалдарын алу МАХ-фазалардың А-қабаттарын селективті химиялық жою негізінде жүзеге асырылады (Bibi et al., 2024). Бұл үдеріс нәтижесінде қабатты құрылым сақталып, 2D M–X қабаттары бөлініп шығады. MXene құрылымында M–X байланысы айқын коваленттік, металдық және иондық сипаттардың үйлесімімен ерекшеленеді, ал M–A байланысына тән металдық сипат жойылады (Chhowalla et al., 2013). Осы 2D материалдардың құрылымдық ұқсастығын ескере отырып, олар графенге ұқсас жаңа материалдар тобы ретінде «MXene» атауын иеленді. MXene материалдарының ($M_{n+1}X_nT_x$) құрылымдық әртүрлілігі мен атомдық реттелуінің сызбанұсқалық көрінісі 3-суретте көрсетілді. Мұнда M – ауыспалы металл, X – көміртек немесе азот, ал T_x – беттік функционалдық топтар (–O, –OH, –F). Суретте бірметалды MXene, қатты ерітінді түріндегі және реттелген көпметалды MXene құрылымдары көрсетілген. Сонымен қатар, металл атомдарының жазықтық ішіндегі (i-MXene) және жазықтықтан тыс (o-MXene) реттелуі, реттелген вакансиялардың түзілуі, жоғары ретті және жоғары энтропиялы көпэлементті MXene жүйелері бейнеленген. Бұл құрылымдық әртүрлілік MXene материалдарының физика-химиялық қасиеттерін мақсатты түрде реттеуге мүмкіндік береді.



Сурет 3. MXene-нің кристалдық құрылымы (Gogotsi & Anasori, 2019)

Алынған MXene материалдарының жалпы формуласы $M_{n+1}X_nT_x$ түрінде жазылады, мұндағы T_x – химиялық жою кезінде М атомдарының бетіне енетін функционалдық топтарды (–O, –OH, –F) білдіреді. Сулы ортада жүргізілетін жою үдерісінің нәтижесінде MXene беті әрдайым гидрофильді функционалдық топтармен қапталады. Бұл ерекшелік MXene материалдарына жоғары гидрофильділік, ионалмасу қабілеті және беткі химиялық тұрақтылық береді. Беттік функционалдық топтардың болуы MXene-дердің полимерлік матрицаларда толтырғыш ретінде қолданылуына және гидроксилдік желілердің түзілуіне мүмкіндік береді, бұл иондардың тиімді тасымалдануына жағдай жасайды. Сонымен қатар, функционалдық топтар MXene-дердің басқа материалдармен химиялық және физикалық өзара әрекеттесуін жеңілдетіп, MXene-негізіндегі композиттік материалдардың кең спектрін қалыптастыруға жол ашады. Гидрофильді бет MXene ұнтақтары мен жұқа қабықшаларының тұрақтылығын және біркелкі дисперсиялануын арттырады (Anasori, Lukatskaya, & Gogotsi, 2023).

MXene бетінің функционалдық топтарға бай болуы сулы ерітінділерде сыртқы иондармен тиімді интерфейстік байланыстардың түзілуін қамтамасыз етіп, күрделі иерархиялық құрылымдарды оңай құрастыруға мүмкіндік береді. Қабатты морфология MXene материалдарын ион ион алмасу үдерістері үшін аса қолайлы етеді. Беткі топтар материалдың иондарды адсорбциялау және алмастыру қабілетін күшейтіп, оның жоғары беттік әрекеттесуі мен гидрофильділігін қамтамасыз етеді. MXene материалдарының Li^+, Na^+, K^+ және Mg^{2+} сияқты әртүрлі иондарды енгізу қабілеті, олардың электрохимиялық қасиеттерін айтарлықтай жақсартып, жоғары энергия тығыздығын және ұзақ циклдік тұрақтылықты қамтамасыз етеді. MAX-фазаларды селективті жоюға негізделген бұл әдістер әртүрлі морфологияға және реттелген құрылымдық ерекшеліктерге ие MXene материалдарын алуға мүмкіндік береді (Luo et al., 2024; Pan, 2024).

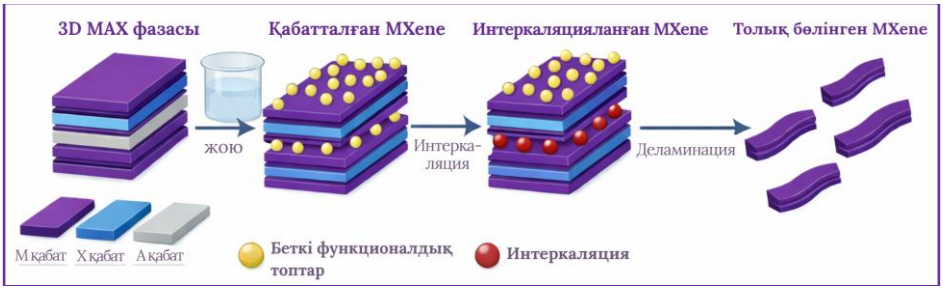
3. MXene синтездеу стратегиялары

MXene материалдарын төменнен жоғары немесе жоғарыдан төмен әдістері арқылы синтездеуге болады. Сәйкес синтездеу әдісін таңдау материалдың өлшемдерін,

морфологиясын және функционалдық қасиеттерін қоса алғанда, оның химиялық және физикалық сипаттамаларын жан-жақты анықтау үшін маңызды болып табылады (Shao et al., 2020).

3.1. MXene синтездеудің класикалық әдісі

MXene қабаттарын алуда ең кеңінен қолданылатын әдіс - top-down (жоғарыдан төмен) стратегиясы болып табылады. Бұл тәсіл бастапқы MAX фазасынан басталып, қабатты A элементін қышқылдар арқылы селективті түрде жою (etching) үдерісіне негізделеді (4-сурет). MXene құрылымының өзінің үшөлшемді (3D) MAX-фазалық аналогымен ұқсастығына байланысты, бұл әдіс дәстүрлі немесе классикалық тәсіл ретінде қарастырылады (Lim et al., 2022).

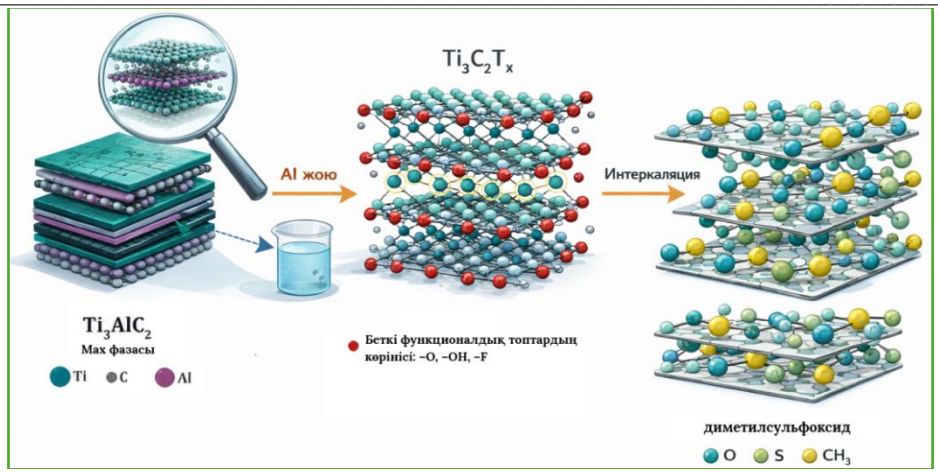


Сурет 4. MXene синтезі үшін жоғарыдан төмен қарай әдісінің сызбалық көрнісі

Үдеріс әдетте екі кезеңнен тұрады: MAX фазасының құрылымын бұзу немесе ойып бөлу, содан кейін алынған MXene қабаттарын деламинациялау. MAX фазасы M, A және X элементтерінің таза ұнтақтарын стехиометриялық араласумен 1200–1600 °C-та өңдеу арқылы алынады (Hugosson et al., 1999). Материалдың тығыздығын арттыру үшін суық немесе ыстық нығыздау қолданылады; қысым деңгейі (25–45 МПа) түйіршіктердің өсу бағытына әсер етеді. Алайда жоғары температурада A элементі (мысалы, Al немесе Si) буланып кетуі мүмкін, сондықтан оның артық мөлшері қажет болады (Buhari et al., 2025; Salim et al., 2019). MAX фазасын алу аяқталғаннан кейін MXene синтезінің негізгі және шешуші кезеңі ретінде 3D MAX құрылымын қышқылдық ортада жою жүргізіледі. Бұл кезеңде көбінесе Ti_3AlC_2 сияқты алюминийқұрамды MAX фазалары күшті химиялық реагент, фторсутек қышқылы (HF) арқылы өңделеді. MAX фазаларының кристалдық құрылымында металл–A (M-A) байланыстарының беріктігі металл–бейметалл (M-X) байланыстарына қарағанда төмен болғандықтан, A элементін селективті түрде жоюға қолайлы жағдай қалыптасады.

Алюминийді MAX фазасының қабатаралық құрылымынан тиімді әрі толық алып тастау үшін ерітіндіде фторид иондарының айтарлықтай жоғары концентрациясы талап етіледі. Бұл құбылыс фторид иондарының алюминий атомдарына деген жоғары химиялық бейімділігімен және тұрақты кешендер түзу қабілетімен байланысты. Осылайша, HF-пен өңдеу нәтижесінде үшөлшемді MAX фазасы біртіндеп қабатты MXene құрылымына айналады (Heidarpour, Faraji, & Haghighi, 2022; Zhou, 2012).

Сонымен қатар, қышқылмен өңдеу үдерісі тек A элементін жоюмен шектелмей, алынған MXene материалдарының беткі химиясын да айтарлықтай өзгертеді. Атап айтқанда, MXene қабаттарының бетінде оттек пен фтор құрамды функционалдық топтар, яғни –O, –OH және –F топтары қалыптасады. Бұл беткі аяқталулар MXene-нің гидрофильділігін арттырып, оның кейінгі интеркаляция, деламинация және әртүрлі қолданбалардағы (энергия сақтау, катализ, сенсорлар) функционалдық қасиеттеріне тікелей әсер етеді (4-сурет).

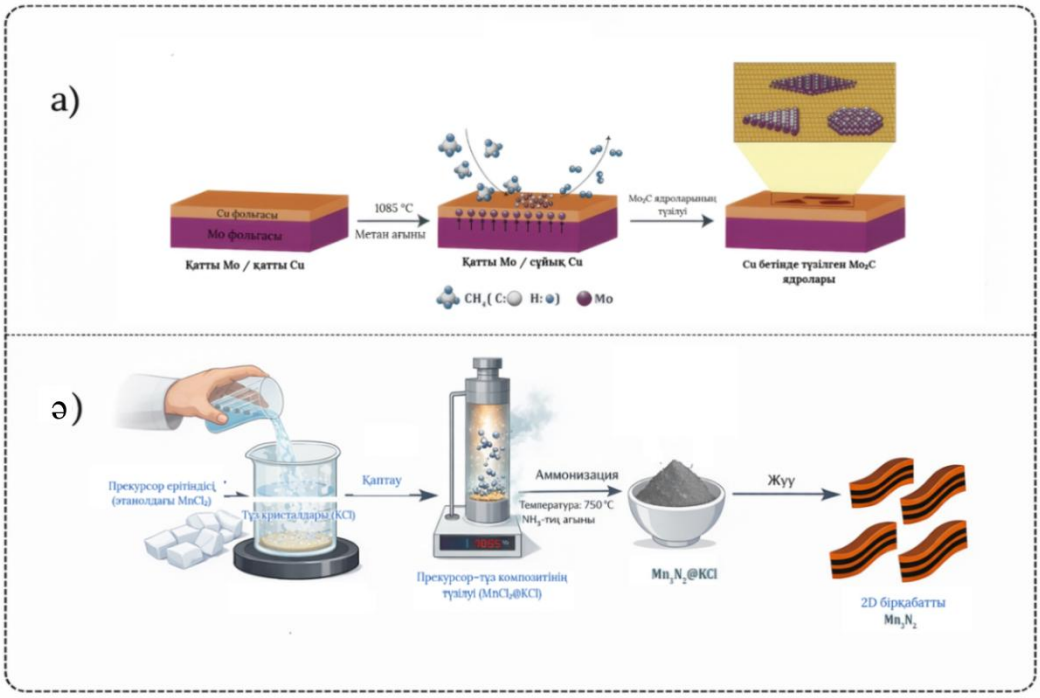


Сурет 5. Ti_3AlC_2 MAX фазасын Ti_3C_2 MXene алу мақсатында жою және интеркалация үдерістерін сызбанұсқа сипаттамасы

Төменнен жоғары (Bottom-up) синтез әдісі атомдық деңгейде дәл басқаруға мүмкіндік беретін MXene алудың баламалы стратегиясы болып табылады және бұл бағыт жоғарыдан төмен (top-down) әдісмен салыстырғанда әлі де шектеулі деңгейде зерттелген (Salim et al., 2019). Бұл тәсілде синтез жекелеген атомдардан немесе шағын бейорганикалық және органикалық молекулалардан басталып, кейіннен реттелген кристалдану арқылы екіөлшемді (2D) қабатты құрылымдардың түзілуіне алып келеді.

Төменнен жоғары Bottom-up стратегиясында ең кең таралған әдіс-химиялық бу фазасында тұндыру болып табылады. 6а-суретте көрсетілгендей, осы әдісте әртүрлі субстраттар бетінде жоғары сапалы және біркелкі жұқа қабыршақтарды өсіруге мүмкіндік береді. Алайда бұл әдіспен алынған MXene материалдары көбінесе көпқабатты сипатта болады, әдетте алты қабаттан кем болмайды.

MXene-нің бұл әдіс арқылы алғашқы синтезі барысында жоғары кристал түріне ие ультражұқа молибден карбиді (Mo_2C) алынады. Бұл үдерісте көміртек көзі ретінде метан газы (CH_4), ал субстрат ретінде мыс/молибден фольгасы қолданылып, синтез 1085 °C-тан жоғары температурада жүргізіледі. Өсу параметрлерін оңтайландыру арқылы, өлшемдері 10–100 мкм аралығындағы қабыршақтар алынып, олардың құрылымдық ақауларының аз және беттік функционалдық топтарының жоқ екені анықталған (Xu et al., 2015).



Сурет 6. а) Химиялық бу тәрізді отырғызу әдісін қолдану арқылы C және Mo газ камерасына енгізіліп, Mo_2C жұқа қабаты алу сызбанұсқасы. ә) Тұздар негізіндегі MoN наноқабатшалары синтездеу сызбанұсқасы

Химиялық бу фазасында тұндыру әдісінен бөлек, MXene алу үшін плазмамен күшейтілген импульстік лазерлік тұндыру және тұзды-шаблон (salt-templating) әдістері де зерттелуде (Zhang et al., 2017). Бұл әдістер арқылы 700 °C температурада ультражұқа Mo_2C қабыршақтарының қалыңдығы лазер импульстарының жиілігімен дәл реттеледі.

Соңғы зерттеулерде тұзды-шаблон әдісі арқылы гидрофильді қасиетке ие, қалыңдығы 1 нм-ден төмен 2D нитридтер (V_2N, W_2N, MoN) алынғаны көрсетілген (Buhari et al., 2025). Сонымен қатар, 6б суретте берілгендей, KCl мен Mn_3N_2 торларының сәйкестігіне негізделген әдіс арқылы бөлме температурасында магниттік қасиет көрсететін ультражұқа 2D Mn_3N_2 қабыршақтары синтезделген (Xiao et al., 2019).

3.2. Электрохимиялық өңдеу әдісі

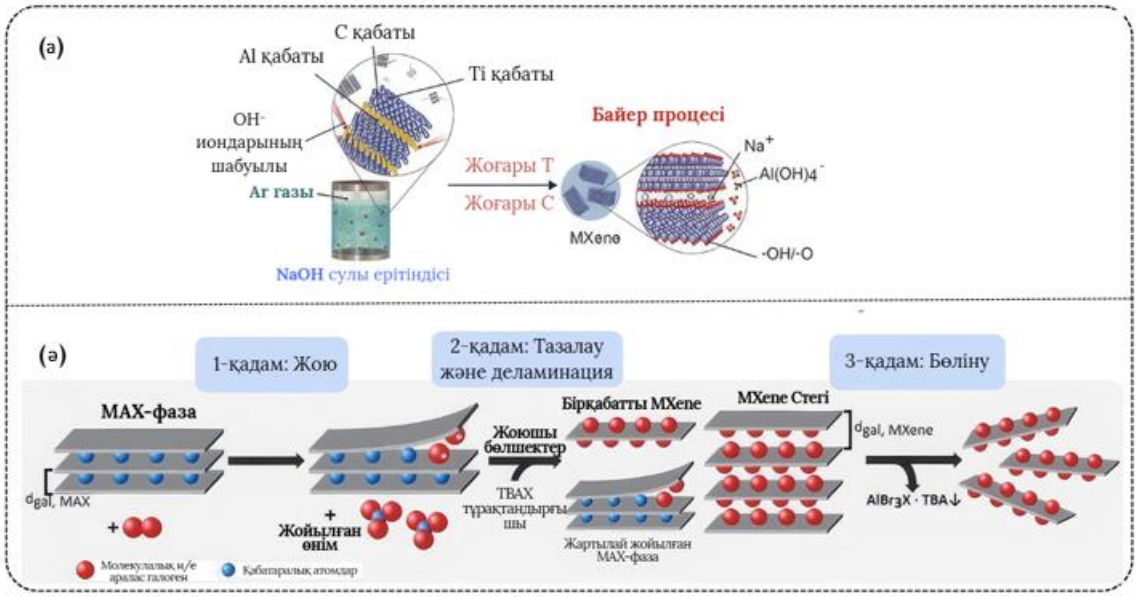
Электрохимиялық өңдеу MXene синтездеудің дәстүрлі HF-негізді әдістеріне экологиялық тұрғыдан қауіпсіз балама ретінде кеңінен танылуда. Фторидке негізделген коррозиялық реагенттермен салыстырғанда, бұл тәсіл жоғары қауіпсіздігімен, реакция кинетикасын дәл басқару мүмкіндігімен және беттік функционалдық топтарды реттеуге икемділігімен ерекшеленеді. Осы қасиеттеріне байланысты электрохимиялық өңдеу энергетикалық қолданбалар үшін аса қолайлы болып табылады (Nouseen & Pumera, 2025).

Сыртқы электр кернеуін LiOH, NH_4Cl, иондық сұйықтықтар немесе балқытылған тұздар сияқты арнайы таңдалған электролиттерде қолдану арқылы MAX фазаларындағы A-қабатты жұмсақ немесе қалыпты температура жағдайында селективті түрде жоюға болады. Бұл MXene морфологиясы мен беткі химиясын дәл баптауға мүмкіндік беріп, үлкен өлшемді, жақсы дисперсияланатын және әртүрлі топтары (–OH, –O, –Cl, –S) бар қабыршақтардың түзілуіне жағдай жасайды. Сонымен қатар, электролит құрамы беткі топтардың табиғатын анықтайтындықтан, каталитикалық белсенділікке және ион тасымалына тікелей әсер етеді (Ostermann et al., 2025).

Электрохимиялық әдістің тағы бір артықшылығы –Ti-негізді MAX фазаларымен шектелмей, V_2C, Nb_2C және Cr_2C сияқты жүйелерге де сәтті қолданылып, MXene материалдарының аясын кеңейтті (Wei et al., 2021). Фторидті реагенттердің коррозиялық HF

түзілуі және тұрақсыз –F мәселелерін болдырмау үшін фторсыз электрохимиялық әдістерге қызығушылық артты. MXene алғаш рет фторсыз сулы синтез арқылы алынып, кейін литий-ионды аккумулятор электролитін қолдану арқылы шамамен 3 нм қалыңдықтағы $Ti_3C_2T_x$ қабыршақтары алынып, сутек газының бөлінуі байқалды (Sun et al., 2019).

MAX фазасының анодтық жағындағы Al атомдары NH_4Cl және тетраметиламмоний гидроксиді электролиттерінде электрохимиялық жолмен экстракцияланып, гидроксид функционалдық топтарымен алмастырылды. Электрохимиялық тазалау екі электродты жүйеде жүзеге асады, катодта реакциялар байқалмайды. Сілтілік тазалау MXene синтезінің тиімді баламасы болып табылады: Ti_3AlC_2 фазасын 27,5 M NaOH ерітіндісінде 270 °C-та өңдеу арқылы $Ti_3C_2T_x$ MXene алынатыны және тазалығы 92 %-ға жететіні хабарланған (Li et al., 2018; 7a-сурет). Сусыз ортада галогендерді пайдалану MAX фазасынан MXene материалдарын бөлме температурасында тиімді синтездеуге мүмкіндік беретіні көрсетілген (7b-сурет) (Jawaid et al., 2021). Br_2, I_2, ICl және IBr галогендері Ti_3AlC_2 фазасын радикалдық механизм арқылы селективті түрде жойып тазалайды, ал үдерістің жүруі галоген мен еріткіштің концентрациясына, олардың молярлық арақатынасына және температураға тәуелді. Аталған әдіс құрамында HF бар орталармен салыстырғанда экологиялық қауіпі төмен MXene материалдарын алуға перспективалы мүмкіндік ұсынады.



Сурет 7. MXene синтезі үшін электрохимиялық әдістер сызбанұсқасы (Li et al., 2018; Jawaid et al., 2021)

3. Бифторид тұздарымен өңдеу әдісі

Бұл үдеріс кезінде бифторид тұздарынан бөлінетін гидратталған катиондар теріс зарядталған MXene бетіне адсорбцияланып, қабатаралық арақашықтықтың ұлғаюына ықпал етеді (Halim et al., 2014). Бұл әдіс ұшқыш әрі аса қауіпті HF-ке балама ретінде жұмсақ әрі қауіпсіз болып саналады. NH_4HF_2 арқылы өңделген Ti_3C_2 MXene кеңейтілген қабатаралық құрылымымен және жоғары электрохимиялық қасиеттерімен ерекшеленеді, бұл иондарды сақтау қабілетін айтарлықтай арттырады (Feng et al., 2019). Сонымен қатар, NH_4HF_2 қолдану арқылы K-MXene синтезделіп, pH реттеу үшін OH^- және NH_4^+ иондарының қатысуы жуудың санын азайтады (Feng et al., 2017). Karlsson және әріптестері Ti_3AlC_2-ні бөлме температурасында NH_4HF_2 ерітіндісінде өңдеу арқылы $Ti_3C_2T_x$ MXene алған (Karlsson et al., 2015). NH_4HF_2-ден басқа $NaHF_2$ және KHF_2 сияқты бифторид тұздары да Ti_3AlC_2 -ден $Ti_3C_2T_x$ алу үшін табысты қолданылған. Соңғы зерттеулерде NH_4HF_2-нің органикалық пропиленкарбонатпен біріктірілуі тұрақты MXene дисперсиясын алуға мүмкіндік беретіні көрсетілген (Natu et al., 2020).

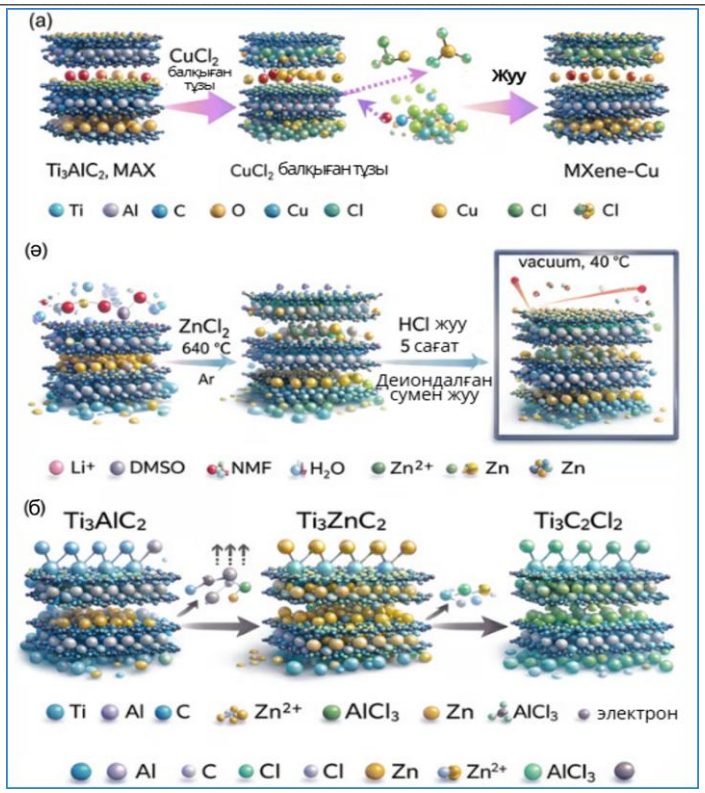
Бұл әдістің механизміне келетін болсақ, NH_4HF_2, $NaHF_2$ немесе KHF_2 сияқты бифторид тұздары қабатталған MAX прекурсорларынан (мысалы, Ti_3AlC_2) A-қабатын (әдетте Al) селективті түрде жою үшін қолданылады, нәтижесінде беттік функционалдық топтары бар (T_x = –F, –O, –OH) көпқабатты MXene құрылымдары түзіледі. 8а-суретте көрсетілгендей, MAX фазасы M–X қабаттары мен A атомдық қабаттарының кезектесуінен тұрады, мұнда бифторид иондары қабатаралық кеңістікке еніп, A-элементпен басым түрде әрекеттесіп, ерігіш алюминий фторид кешендерін түзеді. Селективті жою үдерісі барысында 8ә-суретте бейнеленгендей, $M_{n+1}X_n$ қабаттары біртіндеп босап, «аккордеон» тәрізді көпқабатты MXene бөлшектері қалыптасады. Кейінгі жуу және интеркаляция сатылары қабатаралық арақашықтықты одан әрі ұлғайтып, 8б-суретте көрсетілгендей, бірнеше қабатты немесе бір қабатты MXene наножапырақтарының түзілуіне мүмкіндік береді. Дәстүрлі HF-пен жою әдісімен салыстырғанда, бифторид тұздарымен жою қауіпсіздігі жоғары, реакция кинетикасын бақылауға қолайлы және MXene торының құрылымдық бұзылуын азайтады, бұл әдісті ауқымды әрі экологиялық тұрғыдан тиімді MXene синтезі үшін болашағы зор әдіс.



Сурет 8. Бифторид тұздарымен өңдеу әдісіні арқылы MXene алу сызбанұсқасы

3.4. Еріген тұздар арқылы өңдеу әдісі

Еріген тұздармен жою әдісі MXene синтезіне арналған фторсыз, редокс-бақыланатын стратегия ретінде дамыды, ол қатты күйдегі шарттарда A-қабатты дәл жоюға мүмкіндік береді және Льюис қышқылды галогенидтер ($ZnCl_2$, $CuCl_2$) қолдану арқылы MAX фазаларындағы Al, Si, Zn немесе Ga атомдарын селективті тотығуына мүмкіндік береді. Бұл әдіс инертті атмосферада және жоғары температурада жүргізіліп, –Cl, –O немесе –S терминалдары бар құрылымдық тұрақты MXene береді және синтез кезінде беттік функционалдылықты басқаруға мүмкіндік береді (Wang et al., 2025).



Сурет 9. Еріген тұздармен өңдеу кезінде MXene/$Ti_3C_2T_x$ синтезінің үдерісі (а), Льюис қышқылды еріген тұз әдісі арқылы MXene синтезі (ә) және наноламинатталған MAX фазаларынан MXene өндірісінде еріген тұздар қолданылуы (б)

Қатты орта сұйық қалдықтарды азайтып, тұздарды қайта пайдалануға жол береді, сондай-ақ дәстүрлі MAX фазалары мен нитрид прекурсорларын өңдеуге мүмкіндік береді (Pang et al., 2025). Li және оның әріптестері $ZnCl_2$ немесе $CuCl_2$ еріген тұздарын қолдана отырып, Ti_3ZnC_2, V_2ZnC, Ti_2ZnN, Ti_3SiC_2 сияқты MAX фазаларын өңдеп, фторсыз MXene синтезін көрсетті (Li et al., 2020). Сонымен қатар, LiF/NaF/KF еріген тұздарын қолдану Ti_4AlN_3 -ті өңдеп, сирек $Ti_4N_3T_x$ нитрид MXene алуға мүмкіндік берді, ал Nb_2CT_x MXene үшін еріген тұздар аз оттекті беткі топтарды беріп, биоқауіпсіздікті арттырды (Arole et al., 2022). Редокс-бақыланатын үдерістер термодинамикалық тұрғыда, MAX фазалары негіз мен Льюис қышқылды тұздардың өзара әрекетін болжауға көмектеседі. Осылайша, еріген тұздармен жою фторсыз MXene синтезін жаңа деңгейге көтеріп, беттік функционалдықты дәл басқару, прекурсорларды әртараптандыру және қалдықсыз өңдеуді біріктіретін кең масштабты платформаға айналдырады (Siddique et al., 2023).

MXene алу үшін ең көп қолданылатын прекурсор – Al-MAX фазасы (Ti_3AlC_2), ол үштік MAX фазаларының тек 20 %-ын құрайды. Қалған MAX фазаларын MXene-ге айналдыру үшін жаңа әдістер қажет. Льюис қышқылдары негізіндегі балқыған тұздарды пайдалану MXene материалдарын синтездеудің жаңа мүмкіндіктерін ашып, оларды алу әдістерінің аясын кеңейтті. Мысалы, $Ti_4N_3T_x$ MXene дәстүрлі HF әдісінен өзгеше, 550 °C-де Ar атмосферасында еріген тұздармен синтезделді. Na-ион батареялары үшін $Ti_3C_2T_x$ MXene аноды, Hu және әріптестері фторсыз, еріген тұзымен жасады. MAX фазасы NaCl/KCl тұзымен араласып, 700°C-де қыздырылды, содан кейін судан және $(NH_4)_2S_2O_8$ ерітіндісінен тазаланды (Hu et al., 2023). (сурет 9(а)). Zhang және әріптестері (Zhang et al., 2024) хлор-тұйықталған MXene синтезін көрсетті: Zn^{2+} балқыған Zn-ге айналып, Al атомы $AlCl_3$-ке айналды, MXene-де біркелкі –Cl терминалды бет пайда болды және вакуумде кептірілді (сурет 9(ә)). Еріген тұзда синтездеу әдісі реакцияның жоғары жылдамдығы мен технологиялық қарапайымдылығының арқасында кеңінен танымал. MAX фазалары $ZnCl_2$/NaCl/KCl тұздарында өңделіп, Zn-MAX

фазасы арқылы MXene алынды (сурет 9(ә)). Luo және әріптестері Co-пен модификацияланған, толық Cl-тұйықталған MXene-ді бірқадамдық еріген тұзымен синтездеді (Luo et al., 2021).

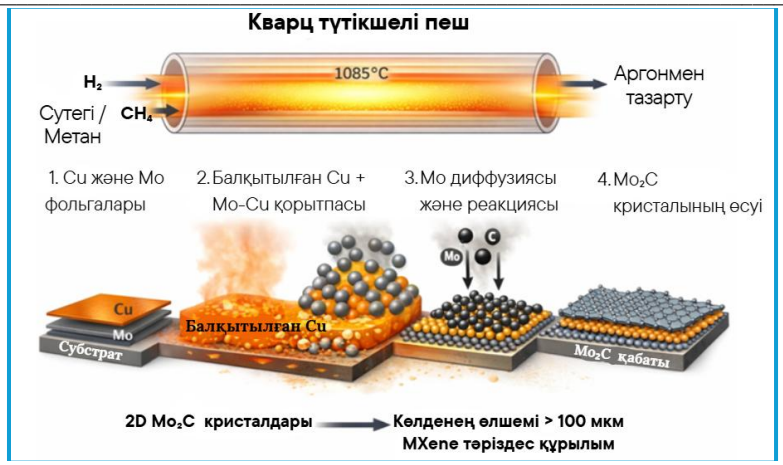
3.5. Химиялық бу фазасында тұндыру әдісі

Химиялық бу фазасында тұндыру әдісі MXene материалдарын экологиялық тұрғыдан таза синтездеу тәсілі ретінде қалыптасып келеді. Бұл әдіс газ тәрізді прекурсорларды қатаң бақыланатын жағдайларда пайдалана отырып, екіөлшемді кристалдарды тікелей қалыптастыруға мүмкіндік береді. Дәстүрлі тәсілдерден айырмашылығы, яғни MAX фазаларын қышқылдармен селективті жоюға негізделген әдістерден өзгеше, бұл технология қауіпті химиялық реагенттерді толықтай айналып өтіп, жоғары тазалықтағы MXene қабаттарын қоршаған ортаға әсері төмен әрі құрылымдық тұтастығы жоғары күйде алуға жол ашады (Rouhi et al., 2025).

Бұл әдістің негізгі принципі ұшпа прекурсорлардың жоғары температура жағдайында басқарылатын түрде ыдырауы немесе өзара әрекеттесуі арқылы MXene кристалдарының қолайлы субстрат бетінде тікелей нуклеацияланып өсуіне негізделген. Прекурсор құрамы, тасымалдаушы газдың ағын жылдамдығы, субстраттың түрі және реакция температурасы сияқты параметрлер алынатын MXene материалдарының морфологиясына, қабат қалыңдығына және бүйірлік өлшемдеріне айтарлықтай әсер етеді. Осындай дәл басқару мүмкіндігі үлкен меншікті беткі ауданы бар, ақау тығыздығы төмен және архитектурасы реттелетін ультражұқа қабаттарды алуға мүмкіндік береді. Маңыздысы, осы әдіс арқылы алынған MXene материалдары көбіне беттік функционалдық топтары жоқ немесе өте аз мөлшерде терминалданған күйде түзіледі, бұл олардың құрылымын терең зерттеуге және синтезден кейінгі функционалдандыру жұмыстарын жүргізуге кең мүмкіндіктер ашады (Madni et al., 2025). Тұрақты даму тұрғысынан алғанда, бұл синтез әдісі коррозиялық реагенттерді және сұйық қалдық ағындарын қолдануды қажет етпейтіндіктен, оны экологиялық тұрғыдан қауіпсіз балама технология ретінде қарастыруға болады.

Бұл әдісте Cu және Mo фольгалары субстрат ретінде қолданылып, кварц түтікке орналастырылды (10-сурет). Cu/Mo қосқабатты құрылым сутек атмосферасында 1085 °C-тан жоғары температурада қыздырылып, көміртек көзі ретінде CH_4 енгізу арқылы екіөлшемді Mo_2C кристалдарының өсуі іске асырылды. Осы температурада Cu балқып, Mo-Cu қорытпасының түзілуі Mo атомдарының диффузиясын жеңілдетіп, беттік қабатта ультражұқа Mo_2C қабаттарының түзілуіне жағдай жасалады. Алынған кристалдар 100 мкм-ден асатын бүйірлік өлшемдерге ие болып, құрылымдық жағынан MXene-тәрізді сипат көрсетеді (Papadopoulou et al., 2020).

Өсу уақыты мен температура Mo_2C кристалдарының қалыңдығын, нуклеация тығыздығын және бүйірлік өлшемдерін айқындайтын негізгі факторлар ретінде анықталды (Borah, Natu, Biswas, & Srivastava, 2025). Сонымен қатар, CH_4 концентрациясын реттеу арқылы кристалл морфологиясын дәл басқаруға болады: төмен мөлшерде әр деңгейде пішіні ұқсас тармақталған құрылымдар түзілсе, көміртектің аса қанығуы алтыбұрышты, бесбұрышты және тікбұрышты кристалдардың қалыптасуына әкелді. Алтыбұрышты Mo_2C фазасы орторомбалық құрылымнан айқын ерекшеленді.



Сурет 10. Химиялық бу фазасында тұндыру әдісінің сызбанұсқасы

Мыс фольгасының қалыңдығын өзгерту арқылы Mo_2C қабаттарының қалыңдығын дәл реттеу мүмкіндігі көрсетілді, бұл MXene-тәрізді материалдардың құрылымын оңтайландыруда маңызды артықшылығы болады (Geng et al., 2016). Осыған ұқсас тәсіл арқылы Wang және әріптестері Cu балқу температурасынан төмен жағдайда Ti/Cu фольгасын субстрат ретінде және NH_3 газын азот көзі ретінде пайдаланып TaN жұқа қабаттарын синтездеді, ал NH_3 орнына бор ұнтағын қолдану арқылы ауыспалы метал боридтерінің түзілуін көрсетті (Wang et al., 2017). Сонымен қатар, химиялық бу фазасында тұндыру әдісі моноатомдық ReC кристалдарын синтездеуге және Cu/Mo субстратында өсірілген графеннің термиялық қайта құрылуы арқылы екіөлшемді α-Mo_2C қабаттарын алуға мүмкіндік берді (Deng et al., 2017). Төменде 1-кестеде MXene синтезінің негізгі әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктері салыстырмалы түрде берілді.

Кесте 1. MXene синтезінің негізгі әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктері

№	Әдіс атауы	Артықшылықтары	Кемшіліктері
1	Химиялық бу фазасында тұндыру	Жоғары кристалл сапасы, қабат қалыңдығын дәл бақылау мүмкіндігі, қоспасыз, таза материал алу, үлкен ауданға біркелкі жабын алу	Жоғары температура талап етеді, қымбат жабдық қажет, үдеріс күрделі- өндірістік масштабтау қиын
2	Еріген тұздар арқылы өңдеу	HF қолданбайды, экологиялық тұрғыдан тиімдірек, MAX фазаны тиімді өңдеу мүмкіндігі	Жоғары температура қажет, тұз қалдықтарын жою қиын, Құрылымды бақылау шектеулі
3	Бифторид тұздарымен өңдеу (LiF + HCl)	HF-ке қарағанда қауіпсіздеу, жұмсақ өңдеу жағдайлары, жақсы деламинация	Уақыт ұзақ, қалдық иондар (Li^+, F^-) қалуы мүмкін, Қабаттардың толық бөлінбеуі мүмкін
4	Электрохимиялық өңдеу	HF қолданбайды, үдерісті дәл басқару мүмкіндігі, экологиялық таза, жұмсақ жағдайларда жүргізіледі	Арнайы жабдық қажет, өнім шығымы кейде төмен, үдеріс баяу болуы мүмкін

4. MXene материалдарының қолданылуы

4.1. Катализ саласында қолданысы

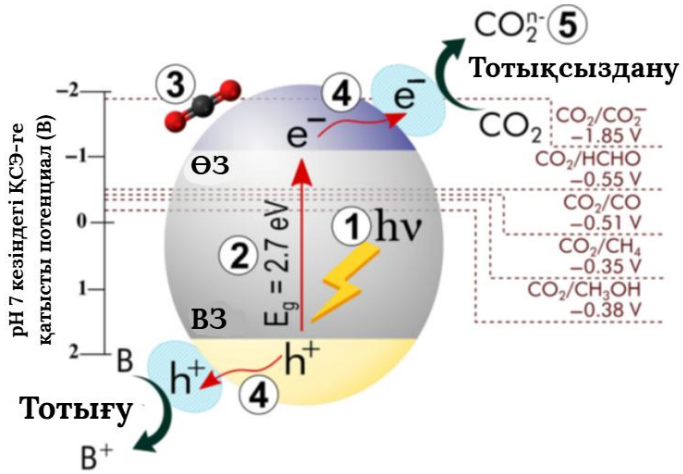
MXene-тәрізді екіөлшемді материалдар олардың жоғары беттік ауданы, металл элементтердің белсенділігі және функционалдық топтарының икемділігі арқасында катализде ерекше тиімді болып табылады. MXene құрылымындағы –OH, –O, –F сияқты терминалды топтар және субстраттағы ауыспалы металдар белсенді орталықтар ретінде әрекет ете отырып, реакция кинетикасын жақсартады.

4.1.1. Көмірқышқыл газын (CO_2) тотықсыздандыру реакциясы

Көмірқышқыл газын тотықсыздандыру реакциясы (CO_2 тотықсыздандыру) - бұл CO_2 молекуласын химиялық түрде азотсыз көміртек қосылыстарына немесе отынға түрлендіру үдерісі. Бұл үдеріс қазіргі кезде климаттық өзгерістермен күрес және жасыл энергия көздерін дамыту тұрғысынан өте маңызды. CO_2 тотықсыздандыру көмірқышқыл газын CO, метанол, этанол, метан, этилен, және басқа да пайдалы химиялық қосылыстарға айналдыруға мүмкіндік береді (Aggarwal et al., 2021).

Фотокаталитикалық әдістер табиғи фотосинтез механизмін модельдей отырып, күн сәулесінің энергиясын CO_2 молекулаларын тиімді түрлендіруге қолданады (Wang et al., 2019). Металл оксидтері, нитридтер және сульфидтер CO_2 тотықсыздандыру үдерісінде белсенділік көрсеткенімен, электрон (e^-–h^+) жұптарының жылдам рекомбинациясы олардың практикалық тиімділігін шектейді (Rao et al., 2021). Бұл мәселені еңсеру үшін дәстүрлі катализаторларға асыл металдар отырғызылып, өнімділікті арттырды. Күн сәулесімен белсендірілетін MXene материалдары заряд тасымалдаушылардың тиімді бөлінуі мен бағытталған тасымалы арқасында CO_2 тотықсыздандыру фотокатализаторлары ретінде ерекше қызығушылық тудырады (Otgonbayar & Oh, 2023; Murali et al., 2022).

Фотокатализдік CO_2 тотықсыздандыру реакциясы көміртек нитриді катализаторының бетінде жүреді. Осы фотокатализдік үдеріс 11-суретте көрсетілгендей бес негізгі қадамға бөлінеді, атап айтқанда: (1) жарықты сіңіру, (2) заряд тасушыларын бөлу, (3) CO_2 адсорбциясы, (4) беттік редокс реакциясы және (5) өнімнің десорбциясы (Ng, Foo, & Ong, 2022).



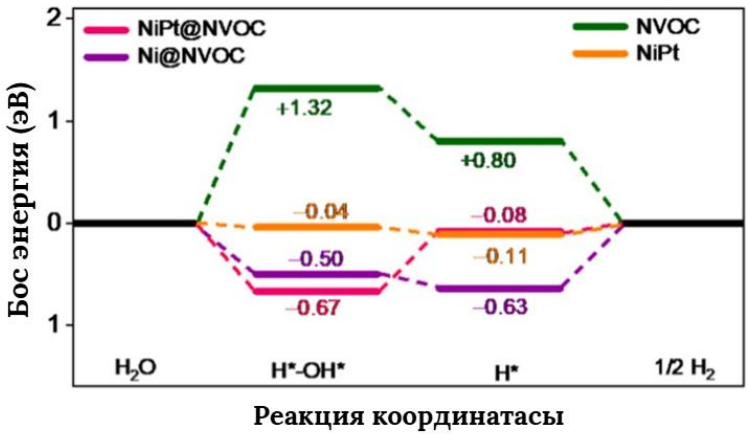
Сурет 11. Фотокатализдік CO_2 тотықсыздандыру реакция механизм сызбанұсқасы (Ng, Foo, & Ong, 2022)

4.1.2. Электрохимиялық жолмен суды айыру арқылы сутек газын өндіру

Бұл әдіс су молекулаларын (H_2O) электр тогының әсерімен сутек (H_2) және оттек (O_2) газдарына түрлендіру үдерісі. Ол жасыл энергия көзін алудың тиімді және экологиялық таза әдісі болып табылады, себебі реакция тек су мен электр энергиясын қажет етеді және зиянды қалдық түзбейді (Pugazhendhi, Kamarudin, & Brindhadevi, 2026). Бұл үдеріс екі негізгі жартылай реакциядан тұрады: анодта оттек эволюция реакциясы және катодта сутек эволюция

реакциясы. Анодта судан оттек бөлініп, протондар мен электрондар түзіледі, ал катодта протондар электрондарды қабылдап, молекулалық сутек түзіледі (Raj et al., 2025). Реакцияның тиімділігі көбінесе катализатордың түріне, электрод материалдарына, электролит құрамына және қолданылатын кернеуге байланысты болады. Металл катализаторлар, мысалы платина немесе иридий негізіндегі катализаторлар, сутек эволюция реакциясы және оттек эволюция реакциясы үшін жоғары белсенділік көрсетсе, сонымен қатар графен, метал оксидтері және наноқұрылымды катализаторлар да перспективті болып табылады (Li et al., 2025). Электрохимиялық суды айыру сутек өндірісінде қолданылатын энергияны жаңартылатын көздермен, мысалы күн немесе жел энергиясымен біріктіру арқылы толықтай жасыл сутек алуға мүмкіндік береді, бұл энергетикалық жүйелердің көміртексіз дамуына маңызды үлес қосады.

Дәстүрлі асыл металдарға негізделген катализаторлардың орнына қолжетімді, экологиялық таза баламаларды жасау саласында елеулі ілгерілеуге қол жеткізілді, бұл баламалар бәсекеге қабілетті катализдік белсенділік, жоғары беріктік және өндіріс көлемін арттыру мүмкіндігін қамтамасыз етеді. MXene туындылары негізіндегі NiV окси-карбидтік нано (NiPt@NVOC) электркатализатор ұсынылған, ол NiPt наноқұрылымдарынан тұрады, өте төмен Pt мөлшерімен (1,22 wt %) және бетінде реттелетін Pt зарядты белсенді орталықтарымен ерекшеленеді. Бұл ерекше құрылымдық және морфологиялық дизайн, оңтайландырылған электрлік конфигурациямен үйлескенде, суды диссоциациялау энергиясы кедергілерін тиімді төмендетуге және сутек өндіру үшін аралық адсорбцияны жақсартуға мүмкіндік береді, сонымен қатар теріс зарядталған Pt белсенді орталарын бетке шығаруды ынталандырады (Tran et al., 2025).



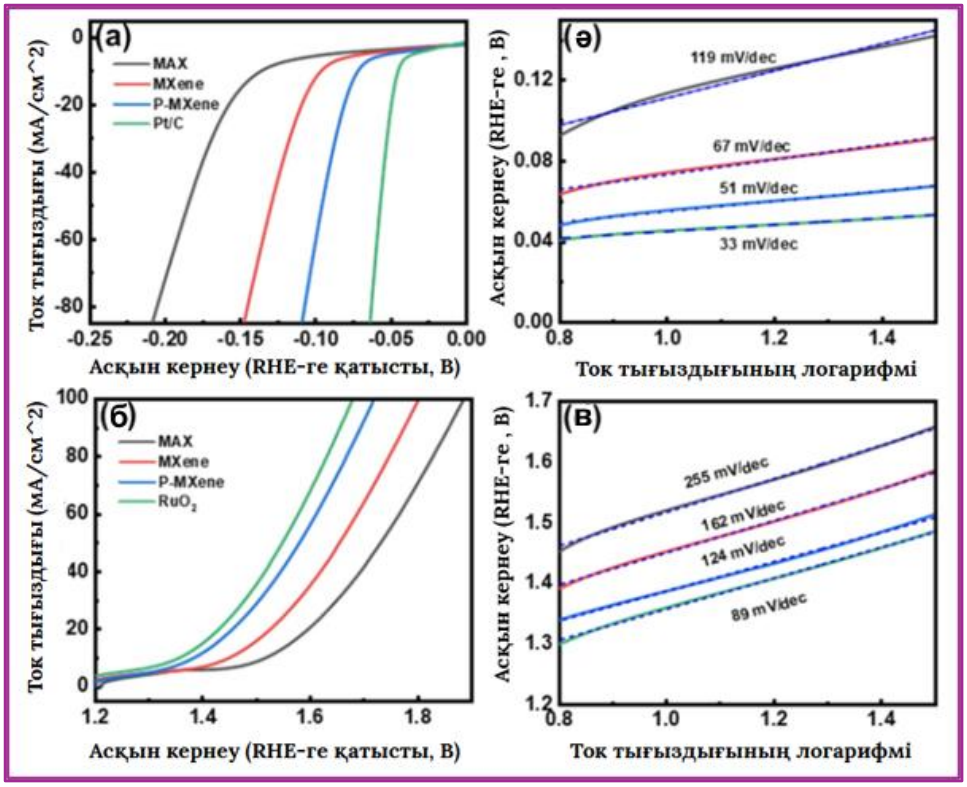
Сурет 12. Негіздік ортадағы сутек эволюциясы реакциясы үшін NiPt, NVOC, Ni@NVOC және NiPt@NVOC материалдарының Гиббс еркін энергиясының диаграммасы (Tran et al., 2025)

12-суретте суды диссоциациялау термодинамикалық тұрғыдан NVOC бетінде эндотермиялық (+1,32 эВ), ал NiPt (−0,04 эВ), Ni@NVOC (−0,50 эВ) және NiPt@NVOC (−0,67 эВ) беттерінде экзотермиялық реакция жүреді, бұл судың адсорбцияланған сутек аралықтарына диссоциациясының кинетикасы NiPt@NVOC үшін тиімді екенін көрсетеді. Сонымен қатар, NiPt@NVOC негіздік сутек эволюциясы реакциясында жоғары өнімділікті көрсетеді, бұл оның сутек аралықтарының Гиббс еркін энергиясы (ΔG_H) бойынша басқа материалдармен салыстырғанда оңтайлы екенін дәлелдейді. ΔG_H* көрсеткіші қышқыл ортадағы сутек эволюция реакциясында катализатор белсенділігін бағалауда маңызды рөл атқарады, ол протонның адсорбциясын, H^+ түзілуін және H_2 десорбциясын қамтиды.

Таза MXene материалдары оттек эволюциясы реакциясында орташа белсенділік көрсетсе де, оларды басқа материалдармен гибридтеу арқылы өнімділігін елеулі түрде арттыруға болады. Мысалы, NiFe/MXene композиттері 10 мА·см$^{-2}$ ток тығыздығында тек 270 мВ қосымша потенциалмен (η_{10}) жұмыс істей алады, бұл эталондық IrO_2 катализаторымен

салыстырғанда жоғары өнімділікті көрсетеді, себебі мұнда синергиялық электрондық әсерлер белсенді роль атқарады. NiFe қабатты қос гидроксидті (NiFe) MXene-мен біріктіру MXene материалдарының жоғары өткізгіштігін және NiFe құрамдас бөліктерінің оттек эволюциясы реакциясының белсенділігін тиімді біріктіреді, бұл қосымша потенциалдарды төмендетуге және катализатордың беріктігін арттыруға мүмкіндік береді (Pandey et al., 2025).

Сол сияқты, WO_3/Ti_3C_2@GQD гибридті катализаторы да синергиялық әсерлерге ие, мұнда MXene электрондарды тасымалдауды жақсартып, механикалық тұрақтылықты қамтамасыз етеді. Интерфейстік инженерия арқылы электрондық құрылымды реттеу зарядтардың қайта таралуын оңтайландырып, оттек эволюциясы реакциясының белсенділігін арттырады. Бұл синергиялық әсерлер негіздік ортада катализатордың электрохимиялық тұрақтылығын және тиімділігін жақсартуға ықпал етеді (Ashraf et al., 2025).



Сурет 13. (а) MXene негізіндегі катализаторлар үшін 0,5 М H_2SO_4 ерітіндісінде 5 мВ/с жылдамдықпен жүргізілген сутек эволюциясы реакциясының сызықтық вольтамперлік қисықтары; (ә) жақсарған сутек эволюциясы реакциясының кинетикасын растайтын Тафель көлбеулігі; (б) 1,0 М KOH ерітіндісінде оттек эволюциясы реакциясының сызықтық вольтамперлік қисықтары; (в) коммерциялық эталон катализаторлармен салыстырылған оттек эволюциясы реакциясы үшін Тафель көлбеулігі (Pandey et al., 2025)

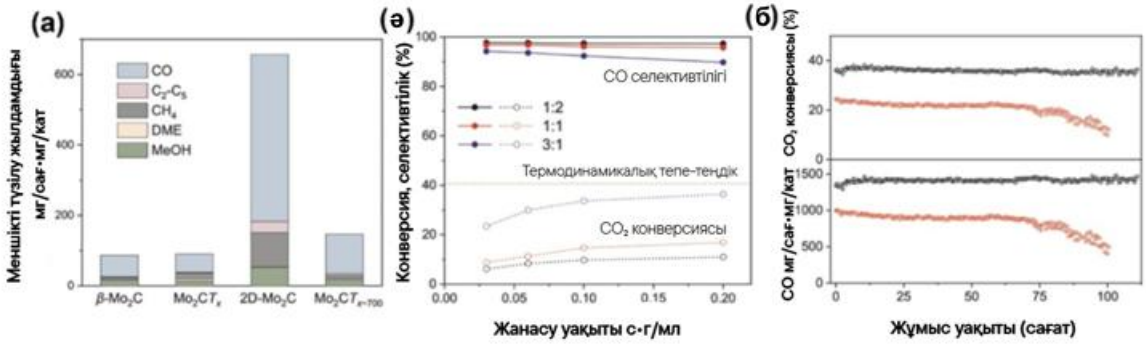
Сызықтық вольтамперлік қисықтары көрсеткендей (13-сурет), синтезделген MXene-негізіндегі катализатор эталондық материалдармен салыстырғанда сутек эволюциясы және оттек эволюциясы реакцияларында елеулі түрде төмен қосымша потенциалдарға ие. Атап айтқанда, сутек эволюция реакциясының басталу потенциалы оңға ығыстырылған және екі реакциядағы Тафель көлбеулігі жылдам кинетиканы көрсетеді, бұл катализатордың жоғары тиімділігін және электрондардың берік әрі жылдам тасымалдануын білдіреді. Осылайша, MXene негізіндегі гибридтік катализаторлар жоғары өткізгіштік, синергиялық электрондық әсерлер, төмен қосымша потенциал және тұрақты электркатализдік қасиеттер сияқты бірқатар артықшылықтарға ие болып, негіздік орталарда сутек және оттек эволюция реакцияларында жоғары өнімділікті қамтамасыз етеді.

4.1.3. Көмірқышқыл газын (CO_2) гидрлеу

CO_2 гидрлеу реакциясы көмірқышқыл газын, бағалы химиялық заттарға және отындарға, мысалы, метанол, метан немесе басқа көмірсутектерге айналдырудағы маңызды әдіс. Соңғы жылдары MXene-негізді катализаторлар бұл реакция үшін ерекше тиімді материалдар ретінде танылды. Себебі олардың құрылымдық және электрондық қасиеттері ерекше. MXene-дер - бұл 2D металл карбидтері, нитридтері және карбонитридтері (мысалы, Ti_3C_2, Nb_2C, Mo_2C) тобы, олар жоғары электр өткізгіштікке, үлкен меншікті беткі ауданға, реттелетін беттік химиясына және мықты химиялық тұрақтылыққа ие. Осы қасиеттері оларды CO_2-ні гидрлеу реакцияларын жүзеге асыруға тамаша платформаға айналдырады (Al-Mahayni, Yuan, & Seifitokaldani, 2025; Xu et al., 2025).

Mo-терминалды базалық жазықтықтарды пайдалана отырып, граммдық масштабта таза көпқабатты 2D-Mo_2C синтездеген. Бұл синтез әдісі $Mo_2C_xT_x$ құрамындағы T_x топтарын азайтқанда 2D құрылымның 3D-Mo_2C-ге айналуын болдырмайды (14-сурет). CO_2 гидрлеу реакциясында катализаторлық тиімділікті бағалау 25 бар қысымда және 230 °C температурада ($N_2/CO_2/H_2$ = 1/1/3) жүргізілді. $Mo_2C_xT_x$ негізінен метанол (CH_3OH), метан (CH_4) және көміртек тотығын (CO) түзеді, ал аз мөлшерде C_2-C_5 көмірсутектері және диметил эфирі (ДМЭ) пайда болады (14а-сурет) (Zhou et al., 2021).

H_2/CO_2 қоспасына 1 сағат әсер еткеннен кейін $Mo_2C_xT_x$ өзінің бастапқы төмен CO сорбциялық қабілетін едәуір арттырды. Катализатордың CO_2 гидрлеу реакциясындағы селективтілігі мен белсенділігі беткі Tx топтарының көптігімен тығыз байланысты болатыны анықталған (14ә-сурет). Мысалы, Tx топтары көп болған жағдайда метанол дегидратацияланып, ДМЭ түзеді, ал таза 2D-Mo_2C-де ДМЭ байқалмайды.



Сурет 14. (а) $Mo_2C_xT_x$-тің әртүрлі температураларда H_2 қатысында алдын ала өңделуі, нәтижесінде ішкі құрылымның түзілу жылдамдығы өзгерісі; (ә) 2D-Mo_2C катализаторындағы CO_2 гидрлеу реакциясы (430 °C температурада және 1 бар қысымда, әртүрлі H_2:CO_2 қатынастары); (б) Тұрақтылық көрсеткіштері: өнеркәсіптік Cu-ZnO-Al_2O_3 катализаторы (қызыл түс) және 2D-Mo_2C катализаторы (қара түс) (Zhou et al., 2021). с×г/мл

2D-Mo_2C катализаторы CO шығару жылдамдығы шамамен 6 г/сағ×г/кат, CO_2 гидрлеуде жоғары белсенділік көрсетіп, CO-ға ~94 % селективтілікке ие. 430 °C температурада 2D-Mo_2C стандартты β-Mo_2C катализаторымен салыстырғанда шамамен алты есе жоғары белсенділікті көрсетіп, 100 сағаттан астам үздіксіз жұмыс істейді. Сонымен қатар, CO_2 конверсиясы мен CO шығару жылдамдығы ұзақ уақыт бойы тұрақты қалады. Керісінше, өнеркәсіптік Cu–ZnO–Al_2O_3 катализаторында ZnO агломерациясы немесе Cu оксидтенуі салдарынан шамамен 50 % деградация байқалды (14б-сурет). Бұл нәтижелер 2D-Mo_2C катализаторының жоғары тұрақтылығы мен белсенділігін, сондай-ақ CO_2 гидрлеуге қолайлы екенін көрсетеді.

4.2. Энергия сақтау және түрлендіру

MXene материалдары олардың жоғары электр өткізгіштігі, кең беткі ауданы және иондарды тиімді енгізу қабілеті арқасында энергия сақтау және түрлендіру құрылғыларында кеңінен қолданылады. Оларға мыналар жатады: (1) Li/Na/K-ионды батареялар - электрод

ретінде MXene қолдану зарядтау/разрядтау жылдамдығын арттырады және цикл тұрақтылығын жақсартады. (2) суперконденсаторлар - екіөлшемді қабаттар жоғары беткі ауданы мен ион өткізгіштігі арқасында жоғары қуат сыйымдылығын қамтамасыз етеді. (3) Zn және Al-иондық жүйелер - MXene материалдары катализдік белсенділік пен ион тасымалдауды жақсартып, энергия тығыздығын арттырады (Qi et al., 2017; Kalsoom et al., 2025; Tang, Zhou, & Shen, 2012).

4.2.1. Литий-ионды батареялар

Литий-ионды батареялар жоғары энергия тығыздығымен, ұзақ қызмет ету мерзімімен және өздігінен разрядтың төмен деңгейімен сипатталатын ең кең таралған энергия сақтау жүйелерінің бірі болып табылады. Кәдімгі литий-ионды батарея катодтан (мысалы, $LiCoO_2$, $LiFePO_4$ немесе қабатты өткінші металл оксидтері), анодтан (көбіне графит), литий тұздары бар электролиттен және сепаратордан тұрады. Зарядтау және разрядтау барысында литий иондары электролит арқылы анод пен катод арасында қайтымды түрде орын ауыстырады, ал электрондар сыртқы тізбек арқылы қозғалып, электр энергиясын өндіреді (Qi et al., 2017). Соңғы жылдары литий-ионды батареялар үшін жетілдірілген электродтық материалдар, соның ішінде нанокұрылымды көміртек материалдары, металл оксидтері және MXene сияқты екіөлшемді материалдар үлкен ғылыми қызығушылық тудырып отыр. MXene-дер жоғары электр өткізгіштігімен, үлкен меншікті беткі ауданымен, қабатаралық арақашықтығын реттеу мүмкіндігімен және беттік функционалдық топтарының көптігімен ерекшеленеді (Kalsoom et al., 2025).

MXene-негізді литий-ионды батареялардың жоғары сыйымдылығы қабаттық құрылымның қолжетімділігі, жылдам ион диффузиясы, төмен заряд тасымал кедергісі, деламинацияланған қабаттардың белсенділігі және металлдық гибридтенуден артқан өткізгіштікпен байланысты. Сонымен қатар, олардың электрохимиялық өнімділігі беттік функционалдық топтарға тәуелді: –OH топтары басым MXene-де сыйымдылық шектеулі болса, оттекпен терминалданған MXene-де айтарлықтай жоғары, себебі литий иондарының қозғалғыштығы жоғары (Tang, Zhou, & Shen, 2012; Mashtalir et al., 2023).

MXene анодтарының өнімділігін арттырудың тиімді тәсілі – H_2O_2 арқылы өңдеу, бұл қабатаралық арақашықтықты реттеп, бетінде TiO_2 нанокристалдарының түзілуіне мүмкіндік береді. V_2CT_x электроды Nb-негізді MXene-дермен салыстырғанда кеңірек жұмыс кернеу аймағын және 1 C жылдамдықта 210 mAh g^{-1} сыйымдылық көрсетті, сондай-ақ 0–3 V (Li/Li^+) диапазонында айтарлықтай заряд сақтау қабілетін сақтады (Naguib et al., 2013). H_2O_2 арқылы өңделген Ti_2C MXene жоғары ток тығыздықтарында да қайтымды сыйымдылық пен ұзақ циклдік тұрақтылық көрсетті, бұл қабатаралық қашықтықтың ұлғаюымен байланысты (Ahmed et al., 2016). Nb_2CT_x анодтары HF немесе HCl/LiF арқылы өңдеуден кейін жоғары меншікті сыйымдылық пен ұзақ циклдік тұрақтылық көрсетті. Алдын ала Li^+ интеркаляцияланған Li–Nb_2CT_x аноды 1 A g^{-1} ток тығыздығында 425 mAh g^{-1} сыйымдылықпен Ti_2CT_x және $Ti_3C_2T_x$ материалдарынан жоғары өнімділік көрсетті, бұл MXene-негізді анодтардың литий-ионды батареялар үшін жоғары әлеуетін дәлелдейді (Zhao et al., 2019).

4.2.2. Мырыш-ионды батареялар

Мырыш-ионды батареялар литий-ионды жүйелерге балама ретінде қарқынды дамып келе жатқан энергия сақтау технологиясы болып саналады, себебі олар жоғары қауіпсіздігімен, экологиялық тазалығымен, төмен құнымен және сулы электролиттерді қолдануымен ерекшеленеді. Бұл жанғыш органикалық еріткіштерді пайдалануды болдырмайды және өрт қаупін едәуір төмендетеді. Металл мырыштың өте жоғары көлемдік сыйымдылығы (~5855 мА·сағ·$см^{-3}$), қолайлы тотығу-тотықсыздану потенциалы, табиғи мол қоры және химиялық тұрақтылығы оны ауқымды энергия сақтау жүйелері үшін тартымды етеді. Алайда дәстүрлі мырыш-ионды батареялар жүйелері мырыш дендриттерінің түзілуі, сутегінің бөліну реакциялары және катод материалдарының құрылымдық деградациясы

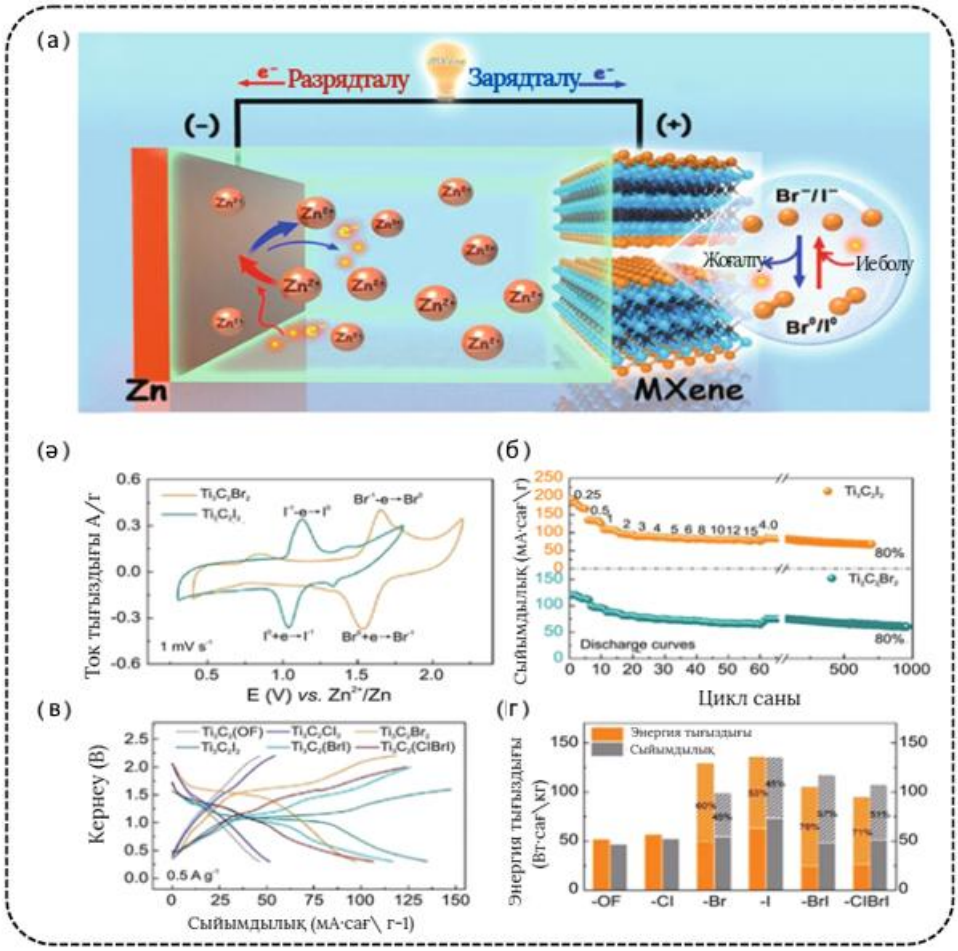
сияқты бірқатар күрделі мәселелерге тап болады, бұл олардың циклдық тұрақтылығы мен тиімділігін айтарлықтай төмендетеді (Li & Song, 2025).

Батарея жұмысы барысында Zn^{2+} иондары анод бетінде қайтымды түрде тұндырылып және қайта ерітіледі. Алайда мырыштың төмен беткі энергиясы мен ион миграциясының жоғары кедергісі Zn^{2+} иондарының біркелкі емес тұнуына алып келеді, нәтижесінде өткір дендриттер түзіліп, сепараторды тесіп өту арқылы қысқа тұйықталуға себеп болуы мүмкін. Сонымен қатар сулы электролиттерде бұл үдеріс сутегінің бөліну реакцияларымен және анодтың коррозиясымен қатар жүреді.

MXene-негізді жабындар мен интерфейстік қабаттар бұл мәселелерді бірнеше өзара байланысты механизмдер арқылы тиімді түрде азайтады. MXene бетінде орналасқан оттекқұрамды функционалдық топтар Zn^{2+} иондарын біркелкі адсорбциялап, электр өрісін тегістейді, нәтижесінде мырыштың біркелкі нуклеациясы қамтамасыз етіліп, дендриттердің түзілуі тежеледі. Сонымен қатар MXene-дердің гидрофильді беті Zn^{2+} иондарының гидратациялық қабатын әлсіретіп, десольватация энергиясын төмендетеді, бұл сутегінің бөліну реакцияларын басуға мүмкіндік береді. MXene-дердің жоғары электрөткізгіштігі электрондардың тез тасымалдануын қамтамасыз етіп, мырыштың тұну-еру кинетикасын жеделдетеді және жүйенің қайтымдылығын арттырады. Нәтижесінде MXene-мен модификацияланған мырыш анодтары мыңдаған сағат бойы тұрақты жұмыс істей алады, жоғары кулондық тиімділік пен ұзақ қызмет мерзімін көрсетеді (Liu, Chen, Shang, & Zhang, 2025).

MXene материалдары катодтардың жұмысын жақсартуға да ықпал етеді, өйткені олар белсенді интеркаляциялық материалдар үшін электрондардың өту жолдарын жақсартатын және құрылымдық тұтастықты қамтамасыз ететін жоғары өткізгіш тасымалдаушы матрица ретінде қызмет атқарады. Қабатты металл оксидтерін немесе ванадий негізіндегі қосылыстарды MXene қаңқаларымен біріктіру иондар мен электрондардың тасымалдануын күшейтіп, Zn^{2+} иондарының жылдам интеркаляциясы мен деинтеркаляциясын қамтамасыз етеді. Мысалы, CaV_4O_9 – $Ti_3C_2T_x$ композиттері MXene-нің қабатты құрылымы қалыптастыратын жоғары өткізгіштік пен иондардың жылдам диффузия желілерінің арқасында қайтымды меншікті сыйымдылықтың артуын және циклдық тұрақтылықтың жақсаруын көрсетеді (Fang et al., 2023).

15-суреттерде мырыш иондық батареяларда катод ретінде қолданылатын галогенделген MXene материалдарының электрохимиялық сипаттамасы мен өнімділігін көрсетеді. 15(a)-суретте Zn||MXene батареясының зарядтау және разрядтау үдерістері кезінде жұмыс істеу принципін сызбанұсқа түрінде бейнелейді. Разрядтау кезінде анодтағы мырыш металы тотығады, Zn^{2+} иондарын және электрондарды босатады. Zn^{2+} иондары электролит арқылы MXene катодына қозғалып, MXene қабаттарына енеді, ал электрондар сыртқы тізбек арқылы өтіп, зарядтың теңгерімділігін сақтайды. Сол уақытта MXene бетінде орналасқан галогендік терминалдар (Br^-/I^-) кері қайтарылатын оксид–редокс реакцияларға түседі, яғни оксидтелген және тотыққан күй арасында айналып, Zn^{2+} интеркализациясынан тыс қосымша электрохимиялық белсенділік қосады (Li et al., 2021).



Сурет 15. (а) Мырыш иондық батареяның сызбанұсқалық бейнесі және оның электрохимиялық механизмі; (ә) $Ti_3C_2Br_2$ және $Ti_3C_2I_2$ үшін циклоамперометриялық қисықтар; (б) $Ti_3C_2Br_2$ және $Ti_3C_2I_2$ материалдарының жылдамдықтық қабілеті және ұзақ мерзімді циклдық тұрақтылығы; (в) Әр түрлі терминалдары бар Ti_3C_2 MXene материалдарының гальваностатикалық заряд–разряд профилі; (г) Әр түрлі терминалдары бар Ti_3C_2 MXene материалдарының энергия тығыздығы және сыйымдылығы (Li et al., 2021)

15(ә)-суретте Br және I терминалды Ti_3C_2 негізіндегі MXene материалдарының циклоамперометрия қисықтарын көрсетеді, онда галоген редокс жұптарына (Br^-/Br^0 және I^-/I^0) сәйкес анық пиктер көрінеді, бұл беттегі галогендердің электрохимиялық белсенді екенін және заряд сақтауға үлес қосатынын растайды. 15(б)-суретте панелі ұзақ мерзімді циклдық тұрақтылықты көрсетеді, $Ti_3C_2Br_2$ және $Ti_3C_2I_2$ катодтарын салыстырады. $Ti_3C_2I_2$ жоғары сыйымдылыққа (~200 мА·сағ·$г^{-1}$) ие, бірақ $Ti_3C_2Br_2$ -ге (~120 мА·сағ·$г^{-1}$) қарағанда сәл жылдам сыйымдылық азаюын көрсетеді, бұл галоген түрінің сыйымдылық пен тұрақтылыққа елеулі әсер ететінін дәлелдейді.

15(в)-суретте әртүрлі галоген терминалы бар MXene материалдарының 0,5 А·$г^{-1}$ токпен гальваностатикалық заряд–разряд профилін көрсетеді. Мұнда галогендік терминалдардың кернеу тақталарын және қолжетімді сыйымдылықты қалай өзгертетіні айқын көрінеді. Br және I терминалды MXene материалдарында Zn^{2+} интеркализациясы мен галоген редокс белсенділігінің қосарланған әсерінен кернеу тақталары айқын байқалады. 15(г)-суретте әртүрлі галогенделген MXene материалдарының энергия тығыздығы мен нақты сыйымдылығын сандық түрде көрсетеді, мұнда Br және I терминалды MXene жоғары энергия тығыздығын көрсетсе, аралас галоген терминалды материалдар (мысалы, Cl/Br, Cl/Br/I) электрохимиялық өнімділікті икемді түрде баптауға мүмкіндік береді. Барлық суреттер бірлесіп, MXene бетіне галогендік функционалық топ қосу арқылы судың ішінде жұмыс

істейтін мырыш иондық батареяларда электрохимиялық белсенділікті және энергия сақтау қабілетін арттыратынын көрсетеді, өйткені бұл үдеріс Zn^{2+} интеркализациясы мен беттегі терминалдардың редокс реакцияларының бір уақытта жүруіне мүмкіндік береді.

4.2.3. Суперконденсаторлар

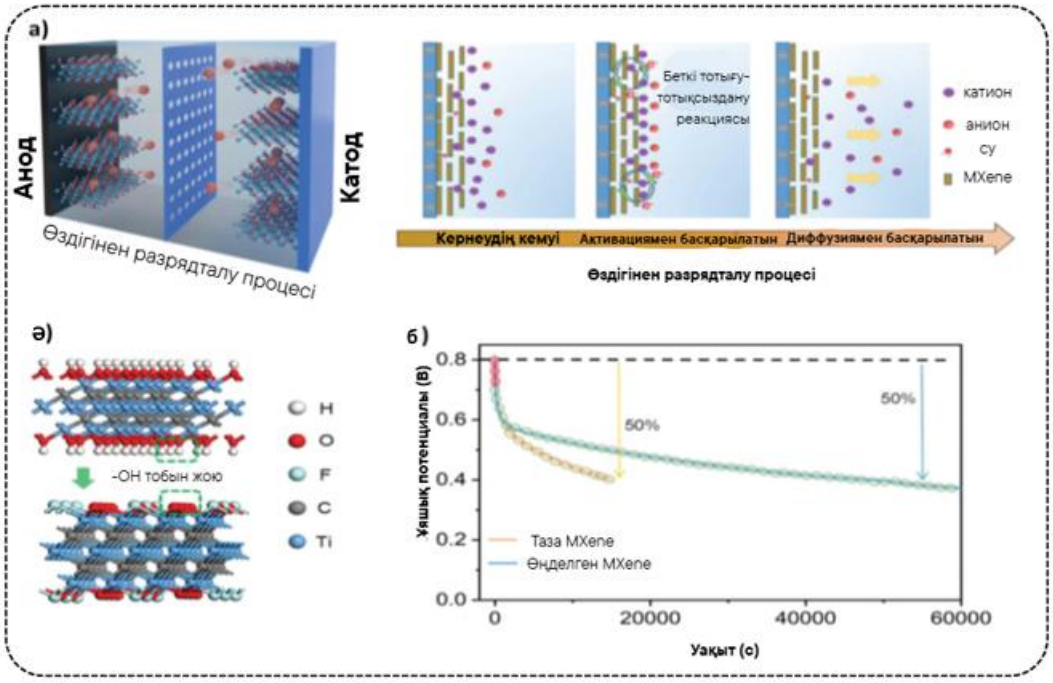
Суперконденсаторлар, немесе электрохимиялық конденсаторлар ретінде белгілі, энергияны сақтау құрылғылары болып табылады. Олардың жоғары қуат тығыздығы, жылдам зарядтау–разрядтау қабілеті және ұзақ циклдық тұрақтылығы бар, бұл оларды портативті электроника, электр көліктері және желі деңгейіндегі энергияны буферлеу сияқты қолданбалар үшін маңызды (Conway, 2013). Батареялардан айырмашылығы, энергияны редокс реакциялары арқылы сақтамай, суперконденсаторлар негізінен электр қос қабатты сыйымдылық және кей жағдайларда псевдосыйымдылық механизмін пайдаланады, бұл электрод–электролит интерфейсінде иондардың жылдам адсорбциясы/десорбциясына мүмкіндік береді (Miller & Simon, 2008). Соңғы жылдары екі өлшемді ауыспалы метал карбидтері мен нитридтер, яғни MXene материалдары, суперконденсаторлар үшін жоғары өнімді электродтық материалдар ретінде пайда болды (Zhang, McKeown, & Pomerantseva, 2019).

Қабаттық құрылымы және айқын геометриясы арқасында MXene материалдары әртүрлі қолданбалар үшін перспективалы болып отыр. MXene негізгі ерекшеліктеріне жоғары балқу температурасы, жоғары қаттылық, тотығуға төзімділік, гидрофилділік, әртүрлі енгізулерді қабылдай алу қабілеті және жылу өткізгіштік жатады. Көбінесе осындай керемет металдық өткізгіштік қасиетіне байланысты MXene материалдары жиі суперконденсаторларда қолданылады. $Ti_3C_2T_x$ MXene тез электрон тасымалдау тұрғысынан ең перспективалы таңдау болып саналады. MXene-ге металдық иондардың электрохимиялық немесе өздігінен интеркализациялануы мүмкін екені анықталған, бұл оның энергияны сақтау мүмкіндігін көрсетеді (Yaseen et al., 2021).

Зерттеушілер Ti_3C_2 MXene-ге K^+, Na^+, Mg^{2+}, NH_4^+ және Al^{3+} катиондары электрохимиялық жолмен интеркализацияланатынын және бұл оның сақтау сыйымдылығына әсер ететінін атап көрсеткен. Бірнеше су ерітінділері Ti_3C_2 MXene-ге қолданылып, катиондардың өздігінен интеркализациялануы іске асырылған. Ti_3C_2 электродында бұл интеркализациялар нәтижесінде шамамен 300 $F \cdot см^{-3}$ сыйымдылыққа жету байқалған. Бұл нәтижелер ғалымдарға MXene-ді суперконденсаторларда қолдануға бағытталған зерттеулерге назар аударуға мүмкіндік берді (Lukatskaya et al., 2013).

$Ti_3C_2T_x$ электрод материалы икемді суперконденсаторлар үшін жібектен жасалған көміртекті матрицаға қолданылды. Сонымен қатар, MXene материалдарының өткізгіш полимерлер немесе көміртекті наноматериалдармен композиттері әзірленіп, электрохимиялық өнімділікті арттыру үшін иондарға қолжетімді бет ауданы мен электр өткізгіш жолдарын көбейтеді (Tang et al., 2018; Bai et al., 2023). MXene құрамын және беттегі терминалды топтарын икемді өзгерту мүмкіндігі келесі ұрпақ суперконденсаторларын жобалау үшін энергия мен қуат тығыздығын арттыруға арналған кең мүмкіндіктерді ұсынады (Zhang et al., 2023).

16(а-б)-суреттерде $Ti_3C_2T_x$ MXene негізіндегі суперконденсаторлардың өзіндік разрядталу сипаттамасы мен беткі модификациясын көрсетеді. 16(а)-суретте өзіндік разряд үдерісін сызбанұсқа түрінде бейнелейді: қабатталған MXene электродтары мен олардың арасындағы катиондар, аниондар және су молекулаларының су негізіндегі электролитте интеркаляциясын көрсетеді, беттік функционалды топтардың (–OH, –O, –F) қатысуымен жүретін активация бақыланатын кезеңді және баяу иондардың миграциясына байланысты пайда болатын диффузия бақыланатын кезеңді ерекшелейді. Бұл MXene қабаттық құрылымы мен беткі химиясының өзіндік разрядтың кинетикасы мен көлеміне қалай әсер ететінін көрсетеді.



Сурет 16. (а) $Ti_3C_2T_x$ MXene негізіндегі суперконденсаторларда өздігінен разрядтау үдерісінің сипаттамасы; (ә) MXene бетінің интерфейстік модуль арқылы өзгеруі нәтижесінде –OH тобының алынуын көрсететін сызбанұсқа; (б) MXene суперконденсаторларының ашық тізбек потенциалы био-термиялық өңдеуден бұрын және кейінгі жағдайлары (Pu et al., 2023)

16(ә)–суретте MXene бетінің беттік модуль арқылы өзгеруін көрсетеді, нәтижесінде –OH топтары жойылады, бұл қажетсіз жанама реакцияларды азайтып, электрохимиялық тұрақтылықты жақсартады, сонымен қатар иондардың тасымалы мен электрондардың берілуін тиімдірек етеді. 16(б)-суретте биотермальды өңдеуден бұрын және кейінгі MXene суперконденсаторларының ашық тізбек потенциалын көрсетеді: өңделмеген MXene (Pure-MX) тез разрядталып, потенциалдың 50 %-ы ерте кезеңде төмендейді, ал өңделген MXene (Treated-MX) ұзақ уақыт бойы жоғары потенциалды сақтайды. Бұл биотермальды беткі өңдеудің MXene электродтарын тұрақтандыратынын, беткі қосымша реакцияларды азайтып өзіндік разрядты тежейтінін және ұзақ мерзімді энергияны сақтауды жақсартатынын растайды. Жалпы, бұл нәтижелер беттік функционализация мен интерфейстік инженерлеу MXene негізіндегі суперконденсаторлардың өзіндік разрядын бақылау және олардың өнімділігін арттыру үшін тиімді стратегиялар екенін көрсетеді (Pu et al., 2023).

5. Қорытынды

MAX-фазалар – гексагональды үшкомпонентті қабатты материалдар, жоғары термиялық тұрақтылыққа, механикалық беріктілікке және жақсы электр/жылу өткізгіштік қасиеттерге ие. Олардың қабаттық құрылымы MXene-ді алу үшін тиімді прекурсор болып табылады. MXene материалдары фторсутек қышқылымен өңдеу, бифторид тұздарын пайдалану, электрохимиялық әдістермен өңдеу, химиялық бу фазасында тұндыру (CVD) және еріген тұзда синтездеу әдістері арқылы алынады. Бұл материалдардың морфологиясын, қабат қалыңдығын және беттік функционалдық топтарын дәл басқаруға мүмкіндік береді. Нәтижесінде алынған MXene жоғары беттік ауданымен, функционалдық топтарға бай бетімен және металдық элементтердің белсенділігімен ерекшеленіп, катализ, энергия сақтау, ион алмасу және электрондық қолданбаларда перспективті болып табылады. MAX-фазалар мен MXene материалдарының синтезі мен қасиеттерін зерттеу заманауи функционалдық материалдар саласында жаңа бағыттарды дамытуға жол ашады.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Тұжырымдамалау – Ж.А; әдіснама және формальды талдау – Қ.Т; жазу - рецензиялау және редакциялау – И.С; ғылыми жетекшілік және жобаны басқару – С.А. Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасын оқып, мақұлдады.

8. Автор туралы ақпарат

Сейтхан, Азат – профессор, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22 үй, Алматы, Қазақстан, 050060; s.azat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9705-7438

Асенгали, Жадыра – зерттеуші, магистрант студенті, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22 үй, Алматы, Қазақстан, 050060; zhadyraassengali@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-7854-2251

Сапаргали, Инабат – зерттеуші, магистр студенті, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22 үй, Алматы, Қазақстан, 050060; sapargali.i@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-0258-8277

Тоштай, Қайнаубек - PhD, Физикалық химия, катализ және мұнай химиясы кафедрасының доценті; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, 050060; kainaubek.toshtay@kaznu.kz, https://orcid.org/0000-0003-1182-7460

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің қолдауымен орындалды (грант № BR24992873).

10. Алғыстар: Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қолдауымен жүзеге асырылды (грант № BR24992873). Қолдау көрсеткендері үшін алғысымызды білдіреміз.

11. Мүдделер қақтығысы: Осы зерттеу бойынша авторлар арасында мүдделер қақтығыстығы жоқ деп мәлімдейміз.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Aggarwal, M., Basu, S., Shetti, N., Nadagouda, N. M., & Aminabhavi, T. M. (2021). Photocatalytic conversion of CO_2 into valuable products using emerging two-dimensional graphene-based nanomaterials: a step towards sustainability. *Chemical Engineering Journal*, 425, 131401. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131401
2. Ahmed, B., Anjum, D. H., Gogotsi, Y., & Alshareef, H. N. (2017). Atomic layer deposition of SnO_2 on MXene for Li-ion battery anodes. *Nano Energy*, 34, 249–256. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.02.043
3. Ahmed, B., Anjum, D. H., Hedhili, M. N., Gogotsi, Y., & Alshareef, H. N. (2016). H_2O_2 assisted room temperature oxidation of Ti_2C MXene for Li-ion battery anodes. *Nanoscale*, 8(14), 7580–7587. https://doi.org/10.1039/C6NR00002A
4. Al-Mahayni, H., Yuan, R., & Seifitokaldani, A. (2025). A MXene-supported single atom catalyst selectively converts CO_2 into methanol and methane. *RSC Sustainability*, 3(4), 1729–1740. https://doi.org/10.1039/D4SU00747F
5. Alhabeb, M., Maleski, K., Anasori, B., Lelyukh, P., Clark, L., Sin, S., & Gogotsi, Y. (2017). Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide ($Ti_3C_2T_x$ MXene). *Chemistry of Materials*, 29(18), 7633–7644. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02847
6. Anasori, B., Lukatskaya, M. R., & Gogotsi, Y. (2023). 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. In *MXenes* (pp. 677–722). Jenny Stanford Publishing. https://doi.org/10.1201/9781003306511

7. Antony Jose, S., Price, J., Lopez, J., Perez-Perez, E., & Menezes, P. L. (2025). Advances in MXene materials: fabrication, properties, and applications. *Materials*, 18(21), 4894. https://doi.org/10.3390/ma18214894
8. Arole, K., Blivin, J. W., Bruce, A. M., Athavale, S., Echols, I. J., Cao, H., Tan, Z., Radovic, M., Lutkenhaus, J. L., & Green, M. J. (2022). Exfoliation, delamination, and oxidation stability of molten salt etched Nb_2C Tz MXene nanosheets. *Chemical Communications*, 58(73), 10202–10205. https://doi.org/10.1039/D2CC02237K
9. Ashraf, M., Umar, E., Sunny, M. A., Iqbal, M. W., Almutairi, B. S., Ismayilova, N. A., & Khan, J. A. (2025). WO_3/Ti_3C_2@GQD composites: advanced materials for superior energy storage and hydrogen evolution performance. *The European Physical Journal Plus*, 140, 120. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-025-06052-2
10. Bai, W., Yong, Zh., Wang, Sh., Wang, X., Li, Ch., Pan, F., Liang, D., Cui, Y., & Wang, Zh. (2023). Polyaniline-MXene composite electrode with excellent electrochemical properties for all-solid flexible supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 71, 108053. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108053
11. Barsoum, M. W. (2000). The $M_{n+1}AX_n$ phases: a new class of solids: thermodynamically stable nanolaminates. *Progress in Solid State Chemistry*, 28(1–4), 201–281. https://doi.org/10.1016/S0079-6786(00)00006-6
12. Bibi, S., Shah, S. S. A., Nazir, M. A., Helal, M. H., El-Bahy, S. M., El-Bahy, Z. M., Ullah, S., Wattoo, M. A., & Rehman, A. (2024). MOF/MXene composites: synthesis, application and future perspectives. *Advanced Sustainable Systems*, 8(8), 2400011. https://doi.org/10.1002/adsu.202400011
13. Borah, A. J., Natu, V., Biswas, A., & Srivastava, A. (2025). A review on recent progress in synthesis, properties, and applications of MXenes. *Oxford Open Materials Science*, 5(1), itae017. https://doi.org/10.1093/oxfmat/itae017
14. Buhari, S., Ahuja, M., Babu, B., & Chalana, A. (2025). Advances in MXenes: synthesis and electrochemical applications. *Advanced Sustainable Systems*, 9(9), e00419. https://doi.org/10.1002/adsu.202500419
15. Chhowalla, M., Shin, H. S., Eda, G., Li, L.-J., Loh, K. P., & Zhang, H. (2013). The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. Nature Chemistry, 5(4), 263–275. https://doi.org/10.1038/nchem.1589
16. Conway, B. E. (2013). Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications. Springer Science & Business Media. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6
17. Dahlqvist, M., Barsoum, M. W., & Rosen, J. (2024). MAX phases – Past, present, and future. *Materials Today*, 72, 1–24. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.11.010
18. Deng, R., Zhang, H., Zhang, Y., Chen, Z., Sui, Y., Ge, X., Liang, Y., Hu, S., Yu, G., & Jiang, D. (2017). Graphene/Mo_2C heterostructure directly grown by chemical vapor deposition. *Chinese Physics B*, 26(6), 067901. https://doi.org/10.1088/1674-1056/26/6/067901
19. Dhas, A. K., Pansare, D. N., & Katariya, A. P. (2026). A review on MXene–polymer composites for water treatment to remove emerging contaminants. In *Advances in Treatment Methods Towards Emerging Contaminants* (pp. 311–318). https://doi.org/10.1016/B978-0-443-34270-7.00003-1
20. Ding, H., Li, Y., Li, M., Chen, K., Liang, K., Chen, G., Lu, J., Palisaitis, J., Persson, P. O. Å., Eklund, P., Hultman, L., Du, S., Chai, Z., Gogotsi, Y., & Huang, Q. (2023). Chemical scissor–mediated structural editing of layered transition metal carbides. *Science*, 379(6637), 1130–1135. https://doi.org/10.1126/science.add5901
21. Ding, L., Wei, Y., Wang, Y., Chen, H., Caro, J., & Wang, H. (2017). A two-dimensional lamellar membrane: MXene nanosheet stacks. *Angewandte Chemie International Edition*, 56(7), 1825–1829. https://doi.org/10.1002/anie.201609306

22. Ding, M., Zhou, H., Ge, M., Jiang, Z., Xu, H., Jia, X., Gao, E., Mallya, D., & Gao, L. (2025). MXene-based catalysts for water purification in the persulfate-based Fenton-like system. *Journal of Water Process Engineering*, 77, 108291. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108291
23. Elsa, G., Hanan, A., Walvekar, R., Numan, A., & Khalid, M. (2025). Zirconium-based MXenes: Synthesis, properties, applications, and prospects. *Coordination Chemistry Reviews*, 526, 216355. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216355
24. Er, D., Shenoy, V. B., & Barsoum, M. W. (2023). MXenes: from discovery to applications of two-dimensional metal carbides and nitrides (Y. Gogotsi & B. Anasori, Eds.). New York: Jenny Stanford Publishing. https://doi.org/10.1201/9781003306511
25. Etzkorn, J., Ade, M., & Hillebrecht, H. (2007). Ta_3AlC_2 and Ta_4AlC_3 - Single-crystal investigations of two new ternary carbides of tantalum synthesized by the molten metal technique. *Inorganic Chemistry*, 46(4), 1410–1418. https://doi.org/10.1021/ic062231y
26. Fang, L., Lin, L., Wu, Z., Xu, T., Wang, X., Chang, L., & Nie, P. (2023). High-performance layered CaV_4O_9–MXene composite cathodes for aqueous zinc ion batteries. *Nanomaterials*, 13(9), 1536. https://doi.org/10.3390/nano13091536
27. Feng, A., Yu, Y., Jiang, F., Wang, Y., Mi, L., Yu, Y., & Song, L. (2017). Fabrication and thermal stability of NH_4HF_2-etched Ti_3C_2 *MXene*. *Ceramics International*, 43(8), 6322–6328. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.02.039
28. Feng, A., Yu, Y., Mi, L., Yu, Y., & Song, L. (2019). Comparative study on electrosorptive behavior of NH_4HF_2-etched Ti_3C_2 and HF-etched Ti_3C_2 for capacitive deionization. *Ionics*, 25(2), 727–735. https://doi.org/10.1007/s11581-018-2787-9
29. Geng, D., Zhao, X., Li, L., Song, P., Tian, B., Liu, W., Chen, J., Shi, D., Lin, M., Zhou, W., & Loh, K. P. (2016). Controlled growth of ultrathin Mo_2C superconducting crystals on liquid Cu surface. *2D Materials*, 4(1), 011012. https://doi.org/10.1088/2053-1583/aa51b7
30. Gogotsi, Y., & Anasori, B. (2019). The rise of MXenes. *ACS Nano*, 13, 8491–8494. https://doi.org/10.1021/acsnano.9b06394
31. Halim, J., Lukatskaya, M. R., Cook, K. M., Lu, J., Smith, C. R., Näslund, L.-Å., May, S. J., Hultman, L., Gogotsi, Y., Eklund, P., & Barsoum, M. W. (2014). Transparent conductive two-dimensional titanium carbide epitaxial thin films. *Chemistry of Materials*, 26(7), 2374–2381. https://doi.org/10.1021/cm500641a
32. Heidarpour, A., Faraji, M., & Haghighi, A. (2022). Production and characterization of carbide-derived-nanocarbon structures obtained by HF electrochemical etching of Ti_3AlC_2. *Ceramics International*, 48(8), 11466–11474. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.003
33. Högberg, H., Eklund, P., Emmerlich, J., Birch, J., & Hultman, L. (2005). Epitaxial Ti_2GeC, Ti_3GeC_2, and Ti_4GeC_3 MAX-phase thin films grown by magnetron sputtering. *Journal of Materials Research*, 20(4), 779–782. https://doi.org/10.1557/JMR.2005.0105
34. Hu, C., Lai, C.-C., Tao, Q., Lu, J., Halim, J., Sun, L., Zhang, J., Yang, J., Anasori, B., Wang, J., Sakka, Y., Hultman, L., Eklund, P., Rosen, J., & Barsoum, M. W. (2015). Mo_2Ga_2C: a new ternary nanolaminated carbide. *Chemical Communications*, 51(30), 6560–6563. https://doi.org/10.1039/C5CC00980D
35. Hu, W., Yang, M., Fan, T., Li, Z., Wang, Y., Li, H., Zhu, G., Li, J., Jin, H., & Yu, L. (2023). A simple, efficient, fluorine-free synthesis method of MXene/$Ti_3C_2T_x$ anode through molten salt etching for sodium-ion batteries. *Battery Energy*, 2(5), 20230021. https://doi.org/10.1002/bte2.20230021
36. Hugosson, H. W., Eriksson, O., Nordström, L., Jansson, U., Fast, L., Delin, A., Wills, J. M., & Johansson, B. (1999). Theory of phase stabilities and bonding mechanisms in stoichiometric and substoichiometric molybdenum carbide. *Journal of Applied Physics*, 86(7), 3758–3767. https://doi.org/10.1063/1.371284

37. Jawaid, A., Hassan, A., Neher, G., Nepal, D., Pachter, R., Kennedy, W. J., Ramakrishnan, S., & Vaia, R. A. (2021). Halogen etch of Ti_3AlC_2 MAX phase for MXene fabrication. *ACS Nano*, 15(2), 2771–2777. https://doi.org/10.1021/acsnano.0c08630
38. Jeitschko, W., Nowotny, H. T., & Benesovsky, F. (1964). Carbides of formula T_2MC. *Journal of the Less Common Metals*, 7(2), 133–138. https://doi.org/10.1016/0022-5088(64)90015-2
39. Jussambayev, M., Shakenov, K., Sultakhan, S., Zhantikeyev, U., Askaruly, K., Toshtay, K., & Azat, S. (2025). MXenes for sustainable energy: a comprehensive review on conservation and storage applications. *Carbon Trends*, 100471. https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100471
40. Kalsoom, U., Khan, S., Kashif, M., Yaseen, H. S., Hussain, S. A., Azizi, S., & Maaza, M. (2025). MXene-based hybrid composites for lithium-ion batteries: Advances in synthesis strategies and electrochemical performance. *Ionics*, 31(10), 10053–10073. https://doi.org/10.1007/s11581-025-06628-z
41. Kang, K. M., Kim, D. W., Ren, C. E., Cho, K. M., Kim, S. J., Choi, J. H., Nam, Y. T., Gogotsi, Y., & Jung, H. T. (2017). Selective molecular separation on $Ti_3C_2T_x$-graphene oxide membranes during pressure-driven filtration: comparison with graphene oxide and MXenes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(51), 44687–44694. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101029
42. Karlsson, L. H., Birch, J., Halim, J., Barsoum, M. W., & Persson, P. O. Å. (2015). Atomically resolved structural and chemical investigation of single MXene sheets. *Nano Letters*, 15(8), 4955–4960. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b00737
43. Lai, C. C., Meshkian, R., Dahlqvist, M., Lu, J., Näslund, L.-Å., Rivin, O., Caspi, E. N., Ozeri, O., Hultman, L., Eklund, P., Barsoum, M. W., & Rosén, J. (2015). Structural and chemical determination of the new nanolaminated carbide Mo_2Ga_2C from first principles and materials analysis. *Acta Materialia*, 99, 157–164. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.07.063
44. Lane, N. J., Jović, V., Jaćimović, J., Barsoum, M. W., & Finkel, P. (2012). Structure of a new bulk $Ti_5Al_2C_3$ MAX phase produced by the topotactic transformation of Ti_2AlC. *Journal of the European Ceramic Society*, 32(12), 3485–3491. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.03.035
45. Li, A., Zhu, Q., Mi, Y., Ur Rehman, H., Shoaib, M., Cao, X., & Wang, N. (2025). Triboelectric nanogenerator drives electrochemical water splitting for hydrogen production: fundamentals, progress, and challenges. *Small*, 21(1), 2407043. https://doi.org/10.1002/smll.202407043
46. Li, M., Li, X., Qin, G., Chen, C., Zeng, Y., Huang, X., & Chen, J. (2021). Halogenated Ti_3C_2 MXenes with electrochemically active terminals for high-performance zinc ion batteries. *ACS Nano*, 15(1), 1077–1085. https://doi.org/10.1021/acsnano.0c07972
47. Li, M., & Song, S. (2025). Synergistic experimental and computational strategies for MXene-based zinc-ion batteries. *Batteries*, 12(1), 8. https://doi.org/10.3390/batteries12010008
48. Li, T., Yao, L., Liu, Q., Gu, J., Chen, B., Zhang, W., & Luo, R. (2018). Fluorine-free synthesis of high-purity $Ti_3C_2T_x$ (T = OH, O) via alkali treatment. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(21), 6115–6119. https://doi.org/10.1002/anie.201800887
49. Li, Y., Zhang, H., Huang, Y., Li, J., Liu, Y., & Wang, X. (2017). Facile preparation of in situ coated $Ti_3C_2T_x/Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ composites and their electromagnetic performance. *RSC Advances*, 7(40), 24698–24708. https://doi.org/10.1039/C7RA03402D
50. Li, Y., Huo, J., Ma, X., Miao, Y., Zhang, X., & Liu, J. (2020). A general Lewis acidic etching route for preparing MXenes with enhanced electrochemical performance in non-aqueous electrolyte. *Nature Materials*, 19(8), 894–899. https://doi.org/10.1038/s41563-020-0657-0
51. Lim, K. R. G., Shekhirev, M., Wyatt, B. C., Anasori, B., Gogotsi, Y., & Mikhael, B. (2022). Fundamentals of MXene synthesis. *Nature Synthesis*, 1(8), 601–614. https://doi.org/10.1038/s44160-022-00104-6
52. Lin, Z. J., Li, M. S., Wang, J. Y., & Zhou, Y. C. (2006). Structural characterization of a new layered-ternary Ta_4AlC_3 ceramic. *Journal of Materials Research*, 21(10), 2587–2592. https://doi.org/10.1557/jmr.2006.0310

53. Liu, J., Chen, S., Shang, W., & Zhang, J. (2025). From surface chemistry to ion dynamics: mechanistic roles of MXenes in aqueous zinc-ion batteries. *EES Batteries*, 1(5), 1047–1067. https://doi.org/10.1039/D5EB00114E
54. Liu, L., Orbay, M., Luo, S., Duluard, S., Shao, H., Harmel, J., Rozier, P., Taberna, P.-L., & Simon, P. (2021). Exfoliation and delamination of $Ti_3C_2T_x$ MXene prepared via molten salt etching route. *ACS Nano*, 16(1), 111–118. https://doi.org/10.1021/acsnano.1c08498
55. Lukatskaya, M. R., Mashtalir, O., Ren, C. E., Dall'Agnese, Y., Rozier, P., Taberna, P.-L., Naguib, M., Simon, P., Barsoum, M. W., & Gogotsi, Y. (2013). Cation intercalation and high volumetric capacitance of two-dimensional titanium carbide. *Science*, 341(6153), 1502–1505. https://doi.org/10.1126/science.1241488
56. Luo, R., Li, R., Jiang, C., Qi, R., Liu, M., Luo, C., Lin, H., Huang, R., & Peng, H. (2021). Facile synthesis of cobalt modified 2D titanium carbide with enhanced hydrogen evolution performance in alkaline media. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(64), 32536–32545. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.110
57. Luo, Y., Jia, S., Yi, Y., Liu, X., Zhang, G., Yang, H., Li, W., Wang, J., & Li, X. (2024). Nitrogen-doped Ti_3C_2 MXene films with low-F terminal groups achieving an ultrahigh volumetric capacitance. *Journal of Alloys and Compounds*, 977, 173355. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173355
58. Madni, A., Rana, U., Rafiq, A., Hayat, H., Iqbal, M. Z., Khan, W. S., & Bajwa, S. Z. (2025). MXene-based electrochemical sensors for cancer biomarker detection: current trends, challenges, and future directions. *Microchimica Acta*, 192(12), 804. https://doi.org/10.1007/s00604-025-07638-4
59. Magnuson, M., & Mattesini, M. (2017). Chemical bonding and electronic structure in MAX phases as viewed by X-ray spectroscopy and density functional theory. *Thin Solid Films*, 621, 108–130. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.11.005
60. Mashtalir, O., Lukatskaya, M. R., Zhao, M. Q., Naguib, M., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. (2023). Amine-assisted delamination of Nb_2C MXene for Li-ion energy storage devices. In *MXenes* (pp. 401–414). Jenny Stanford Publishing. https://doi.org/10.1201/9781003306511
61. Mehrpooya, M., Eivari, M. E., Ganjali, M. R., & Lee, M. H. (2026). The progress of MXene hydrogels fabrication for supercapacitor applications. *Journal of Power Sources*, 661, 238653. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238653
62. Mendhe, A. C., Rengasamy, M., Pradeep, H., Bhoyar, T., Chandirasekar, K., Kore, A., & Lee, H. (2026). Recent advances and insights into carbon-based materials synergistically enhancing MXene for supercapacitor, battery, solar cell, and electrocatalytic applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 550, 217400. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.217400
63. Miller, J. R., & Simon, P. (2008). Electrochemical capacitors for energy management. *Science*, 321(5889), 651–652. https://doi.org/10.1126/science.1158736
64. Murali, G., Modigunta, J. K. R., Park, Y. H., Lee, J.-H., Rawal, J., Lee, S.-Y., In, I., & Park, S.-J. (2022). A review on MXene synthesis, stability, and photocatalytic applications. *ACS Nano*, 16(9), 13370–13429. https://doi.org/10.1021/acsnano.2c04750
65. Mussa, N. S., Askaruly, K., Bexeitova, K., Azat, S., & Toshtay, K. (2025). Recent advancements in MXene-based catalysts: synthesis, characterization, and applications in sustainable energy production. *Carbon Trends*, 100551. https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100551
66. Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., & Barsoum, M. W. (2011). Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2. *Advanced Materials*, 23(37), 4248–4253. https://doi.org/10.1002/adma.201102306
67. Naguib, M., Halim, J., Lu, J., Cook, K. M., Hultman, L., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. (2013). New two-dimensional niobium and vanadium carbides as promising materials for Li-ion batteries. *Journal of the American Chemical Society*, 135(43), 15966–15969. https://doi.org/10.1021/ja405735d

68. Natu, V., Pai, R., Sokol, M., Carey, M., Kalra, V., & Barsoum, M. W. (2020). 2D Ti_3C_2Tz MXene synthesized by water-free etching of Ti_3AlC_2 in polar organic solvents. *Chem*, 6(3), 616–630. https://doi.org/10.1149/MA2020-022261mtgabs
69. Ng, S. F., Foo, J. J., & Ong, W. J. (2022). Solar-powered chemistry: Engineering low-dimensional carbon nitride-based nanostructures for selective CO_2 conversion to C1–*C*2 products. *InfoMat*, 4(1), e12279. https://doi.org/10.1002/inf2.12279
70. Goossens, N., Tunca, B., Lapauw, T., Lambrinou, K., & Vleugels, J. (2021). MAX phases: structure, processing and properties. In *Encyclopedia of Materials: technical Ceramics and Glasses* (pp. 182–199). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818542-1.00015-1
71. Nouseen, S., & Pumera, M. (2025). Electrochemical etching of MXenes: mechanism, challenges and future outlooks. *Journal of Materials Chemistry A*, 13(40), 34055–34084. https://doi.org/10.1039/D5TA04176G
72. Ostermann, M., Piljević, M., Akbari, E., Patil, P., Zahorodna, V., Baginskiy, I., Gogotsi, O., Gachot, C., & Ripoll, M. R. (2025). Pulsed electrochemical exfoliation for an HF-free sustainable MXene synthesis. *Small*, 21, 2500807. https://doi.org/10.1002/smll.202500807
73. Otgonbayar, Z., & Oh, W. C. (2023). MXene-based nanocomposite for the photocatalytic CO_2 reduction: comprehensive review. *Molecular Catalysis*, 541, 113085. https://doi.org/10.1016/j.mcat.2023.113085
74. Palmquist, J. P., Li, S., Persson, P. O. Å., Emmerlich, J., Wilhelmsson, O., Högberg, H., Katsnelson, M. I., Johansson, B., Ahuja, R., Eriksson, O., Hultman, L., & Jansson, U. (2004). $M_{n+1}AX_n$ phases in the Ti–Si–C system studied by thin-film synthesis and ab initio calculations. *Physical Review B*, 70(16), 165401. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.165401
75. Pan, Y. (2024). W_2AlC: a new layered MAX phase to adjust the balance between strength and ductility. *Materials Today Chemistry*, 35, 101915. https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.101915
76. Pandey, S., Ghimire, M., Kim, T., Jung, M. Y., Asaithambi, S., Dong, W. J., Son, J. W., Yun, Y. J., & Jun, Y. (2025). Synthesis of porous MXene for efficient bifunctional electrocatalysis in overall water splitting: hydrogen and oxygen evolution reactions. *FlatChem*, 50, 100837. https://doi.org/10.1016/j.flatc.2025.100837
77. Pandit, M. A., Yuan, J., Nazir, R., Dong, Y., & Li, Q. (2025). A brief review on the progress of MXene-based catalysts for electro- and photochemical water splitting for hydrogen generation. *Chemical Communications*, 61(13), 2602–2626. https://doi.org/10.1039/D4CC05868B
78. Pang, S. Y., Io, W. F., Wong, L. W., Lao, X., Bai, Q., Chan, K. L., Zhao, J., & Hao, J. (2025). Fluoride-free molten salt hydrate-assisted synthesis of MXene in air down to 150 °C. *Advanced Functional Materials*, 35, 2504864. https://doi.org/10.1002/adfm.202504864
79. Papadopoulou, K. A., Chroneos, A., Parfitt, D., & Christopoulos, S. R. G. (2020). A perspective on MXenes: their synthesis, properties, and recent applications. *Journal of Applied Physics*, 128(17), 170902. https://doi.org/10.1063/5.0021485
80. Pietzka, M. A., & Schuster, J. C. (1994). Summary of constitutional data on the aluminum–carbon–titanium system. *Journal of Phase Equilibria*, 15(4), 392–400. https://doi.org/10.1007/BF02647559
81. Pu, S., Wang, Z., Xie, Y., Zhang, H., Zhang, J., Wang, Y., & Liu, Y. (2023). Origin and regulation of self-discharge in MXene supercapacitors. *Advanced Functional Materials*, 33(8), 2208715. https://doi.org/10.1002/adfm.202208715
82. Pugazhendhi, A., Kamarudin, S. K., & Brindhadevi, K. (2026). MXenes as catalyst for sustainable hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116376. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116376
83. Qi, W., Shapter, J. G., Wu, Q., Yin, T., Gao, G., & Cui, D. (2017). Nanostructured anode materials for lithium-ion batteries: principle, recent progress and future perspectives. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(37), 19521–19540. https://doi.org/10.1039/C7TA05283A

84. Raj, K., Jhala, R., Sujai, S., Pattanayak, B., Singh, J., Kumar, P., Kaladhar, M., Singh, R., Bisht, Y., & Gautam, A. (2025). A comprehensive review on the MXene-based catalysts for hydrogen generation via water splitting processes. *Journal of Molecular Structure*, 1324, 143534. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.143534
85. Rana, A. S., Raza, N., Anwar, M. J., & Nazar, M. F. (2025). Advancing MXenes through green chemistry for sustainable future. *Materials Research Bulletin*, 113720. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2025.113720
86. Rao, T., Wang, X., Chen, Z., Liu, Y., & Zhang, J. (2021). Nanostructured metal nitrides for photocatalysts. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(16), 5323–5342. https://doi.org/10.1039/D0TC05609J
87. Rouhi, S., Bay, M., Aydin, O., Yildiz, M., & Alkan, M. (2025). Large-area growth of Mo_2 C thin films and MXene structures via the PVD–CVD hybrid technique. *New Journal of Chemistry*, 49, 10194–10204. https://doi.org/10.1039/D4NJ05530F
88. Sahith, V. N., Kumar, A., Sruthi, V. S., Krithiga, T., Sundararaman, S., & Hosseini-Bandegharaei, A. (2025). MXenes-based sorbents: pioneering nanomaterials and its mechanism for advanced dye remediation in aqueous environments. *Next Materials*, 9, 101029. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101029
89. Salim, O., Mahmoud, K. A., Pant, K. K., & Joshi, R. K. (2019). Introduction to MXenes: synthesis and characteristics. *Materials Today Chemistry*, 14, 100191. https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2019.08.010
90. Shao, B., Liu, Z., Zeng, G., Wang, H., Liang, Q., He, Q., Cheng, M., Zhou, C., Jiang, L., & Song, B. (2020). Two-dimensional transition metal carbide and nitride (MXene) derived quantum dots (QDs): synthesis, properties, applications and prospects. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(16), 7508–7535. https://doi.org/10.1039/D0TA01552K
91. Siddique, S., Waheed, A., Iftikhar, M., Mehran, M. T., Zarif, M. Z., Arafat, H. A., Hussain, S., & Shahzad, F. (2023). Fluorine-free MXenes via molten salt Lewis acidic etching: applications, challenges, and future outlook. *Progress in Materials Science*, 139, 101183. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101183
92. Sidorowicz, A., Wicht, T., Stöger-Pollach, M., Licheri, R., Cao, G., Concas, A., & Rupprechter G. (2025). Influence of MXene and TiO_2 on the performance of microalgae-derived Ru-based catalysts for CO_2 hydrogenation to methane. *ACS Catalysis*, 15(17), 15261–15278. https://doi.org/10.1021/acscatal.5c04285
93. Sun, Z., Yuan, M., Lin, L., Yang, H., Nan, C., Li, H., Sun, G., & Yang, X. (2019). Selective lithiation–expansion–microexplosion synthesis of two-dimensional fluoride-free MXene. *ACS Materials Letters*, 1(6), 628–632. https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.9b00390
94. Tang, H., Hu, Q., Zheng, M., Chi, Y., Qin, X., Pang, H., & Xu, Q. (2018). MXene–2D layered electrode materials for energy storage. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(2), 133–147. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.03.00395
95. Tran, P. K. L., Nguyen, T. H., Tran, D. T., Pham, T. T., Nguyen, T. T. N., Le, T. H., Nguyen, H. T. (2025). Tunable charge Pt sites-dominated alloy confined by MXene-derived oxycarbide enables ultra-stable ampere-level hydrogen production. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 363, 124801. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.124801
96. Urbankowski, P., Anasori, B., Makaryan, T., Er, D., Kota, S., Walsh, P. L., & Gogotsi, Y. (2016). Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti_4N_3 (MXene). *Nanoscale*, 8(22), 11385–11391. https://doi.org/10.1039/C6NR02253G
97. Wang, C., Sun, Z., Zheng, Y., & Hu, Y. H. (2019). Recent progress in visible light photocatalytic conversion of carbon dioxide. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(3), 865–887. https://doi.org/10.1039/C8TA09865D
98. Wang, Y., Yang, G., Chao, M., Zhao, J., Wang, W.-T., Yan, J., Wang, Q., & Yang, R. (2025). Molten salts etching-driven in situ construction of MOF-derived Co/Co–N–C/MXene toward

oxygen reduction catalysis. *Energy & Fuels*, 39(17), 8283–8290. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c00357

99. Wang, Z., Kochat, V., Pandey, P., Kashyap, S., Chattopadhyay, S., Samanta, A., Sarkar, S., Manimunda, P., Zhang, X., Asif, S., Singh, A. K., Chattopadhyay, K., Tiwary, C. S., & Ajayan, P. M. (2017). Metal immiscibility route to synthesis of ultrathin carbides, borides, and nitrides. *Advanced Materials*, 29(29), 1700364. https://doi.org/10.1002/adma.201700364
100. Wei, Y., Zhang, P., Soomro, R. A., Zhu, Q., & Xu, B. (2021). Advances in the synthesis of 2D MXenes. *Advanced Materials*, 33(39), 2103148. https://doi.org/10.1002/adma.202103148
101. Xiao, X., Urbankowski, P., Hantanasirisakul, K., Yang, Y., Sasaki, S., Yang, L., Chen, C., Wang, H., Miao, L., Tolbert, S. H., Billinge, S. J. L., Abruña, H. D., May, S. J., & Gogotsi, Y. (2019). Scalable synthesis of ultrathin Mn_3N_2 exhibiting room-temperature antiferromagnetism. *Advanced Functional Materials*, 29(17), 1809001. https://doi.org/10.1002/adfm.201809001
102. Xu, C., Wang, L., Liu, Z., Chen, L., Guo, J., Kang, N., Ma, X.-L., Cheng, H.-M., & Ren, W. (2015). Large-area high-quality 2D ultrathin Mo_2C superconducting crystals. *Nature Materials*, 14(11), 1135–1141. https://doi.org/10.1038/nmat4374
103. Xu, Y., Gao, D., Li, Y., Fang, Y., Huang, Y., Tang, C., & Guo, Z. (2025). Understanding the CO_2 activation and hydrogenation mechanism on MXene under electrochemical conditions. *ChemPhysChem*, 26(16), e202500101. https://doi.org/10.1002/cphc.202500101
104. Yaseen, M., Khattak, M. A. K., Humayun, M., Usman, M., Shah, S. S., Bibi, S., Hasnain, B. S. U., Ahmad, S. M., Khan, A., Shah, N., Tahir, A. A., & Ullah, H. (2021). A review of supercapacitors: materials design, modification, and applications. *Energies*, 14(22), 7779. https://doi.org/10.3390/en14227779
105. Younis, A., Idrisov, E., Thaker, S., Hamed, F., Sadki, E. H., Iqbal, M. Z., Mahmood, T., Shabbir, B., & Bao, Q. (2025). Advances in MXene-based electronics via surface and structural redesigning and beyond. *Advanced Electronic Materials*, 11(14), e00321. https://doi.org/10.1002/aelm.202500321
106. Zeng, W., Ye, X., Dong, Y., Zhang, Y., Sun, C., Zhang, T., Guan, X., & Guo, L. (2024). MXene for photocatalysis and photothermal conversion: synthesis, physicochemical properties, and applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 508, 215753. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215753
107. Zhang, C., McKeown, J. T., & Pomerantseva, E. (2019). *MXenes for energy storage. Journal of Physics: Energy*, 7(15), 7626–7654. https://doi.org/10.1088/2515-7655/ab9b1d
108. Zhang, T., Pan, L., Tang, H., Du, F., Guo, Y., Qiu, T., & Yang, J. (2017). Synthesis of two-dimensional $Ti_3C_2T_x$ MXene using HCl+LiF etchant: enhanced exfoliation and delamination. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 818–826. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.127
109. Zhang, T., Shevchuk, K., Wang, R. J., Kim, H., Hourani, J., & Gogotsi, Y. (2024). Delamination of chlorine-terminated MXene produced using molten salt etching. *Chemistry of Materials*, 36(4), 1998–2006. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c02872
110. Zhang, Y., Feng, Z., Wang, X., Hu, H., & Wu, M. (2023). MXene/carbon composites for electrochemical energy storage and conversion. *Materials Today Sustainability*, 22, 100350. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100350
111. Zhang, Z., Zhang, F., Wang, H., Chan, C. H., Lu, W., & Dai, J.-Y. (2017). Substrate orientation-induced epitaxial growth of face-centered cubic Mo_2C superconductive thin film. *Journal of Materials Chemistry C*, 5(41), 10822–10827. https://doi.org/10.1039/C7TC03652C
112. Zhao, J., Wen, J., Bai, L., Xiao, J., Zheng, R., Shan, X., Li, L., Gao, H., & Zhang, X. (2019). One-step synthesis of few-layer niobium carbide MXene as a promising anode material for high-rate lithium-ion batteries. *Dalton Transactions*, 48(38), 14433–14439. https://doi.org/10.1039/C9DT03260F

113. Zhao, Y., Que, M., Chen, J., & Yang, C. (2020). MXenes as co-catalysts for the solar-driven photocatalytic reduction of CO_2. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(46), 16258–16281. https://doi.org/10.1039/D0TC02979C
114. Zhou, A. (2012). Methods of MAX-phase synthesis and densification–II. In *Advances in Science and Technology of* $M_{n+1}AX_n$ *Phases* (pp. 21–46). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1533/9780857096012.21
115. Zhou, H., Chen, Z., Kountoupi, E., Zhu, C., Liu, Y., Liu, Y., Hu, J., Zhao, Y., & Chen, J. (2021). Two-dimensional molybdenum carbide 2D-Mo_2C as a superior catalyst for CO_2 hydrogenation. *Nature Communications*, 12(1), 5510. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25784-0

Recent progress in MXene synthesis: applications in catalysis and sustainable energy storage

Seitkhan Azat, Zhadyra Assengali, Inabat Sapargali, Kainaubek Toshtay

Abstract. Two-dimensional (2D) MXene materials, composed of transition metal carbides, nitrides, and carbonitrides, represent a rapidly emerging class of functional materials. Derived from MAX phases through selective chemical etching, MXenes exhibit a unique combination of properties, including high electrical conductivity, tunable surface chemistry, hydrophilicity, and layered architecture. These characteristics make MXenes particularly attractive for applications requiring efficient energy transport and surface interactions, surpassing conventional 2D materials such as graphene and transition metals. This review addresses recent advances in MXene synthesis, with emphasis not only on traditional approaches but particularly on fluoride-free and low-fluoride routes, including electrochemical and molten salt processing techniques. The influence of these methods on surface functional groups, structural stability, and material properties is systematically analyzed. Additionally, delamination, heteroatom doping, and hybridization strategies are discussed as key routes to enhance the functional performance of MXenes. The expanding applications of MXenes in catalysis, energy storage, and conversion are examined in terms of structure–property–performance relationships. In energy storage devices, MXene materials deliver high capacity, long cycle stability, and rapid ion transport in lithium-ion and zinc-ion batteries, as well as supercapacitors. MXenes and their hybrid derivatives also show great promise as efficient, stable, and versatile materials for photocatalysis, electrocatalysis, and CO_2 hydrogenation systems. This review establishes a unified scientific framework for the rational design of MXenes and paves the way for future research aimed at developing sustainable and application-oriented MXene-based technologies.

Keywords: MAX phase; MXene; synthesis methods; catalysis; energy storage.

Современные достижения в синтезе MXene: применение в катализе и устойчивом хранении энергии

Сейтхан Азат, Жадыра Асенгали, Инабат Сапаргали, Кайнаубек Тоштай

Аннотация. Двумерные (2D) материалы MXene – это класс функциональных материалов, состоящий из карбидов, нитридов и карбонитридов переходных металлов, который в последние годы активно развивается. MXene, получаемые селективным химическим удалением из фаз MAX, характеризуются уникальным сочетанием свойств, включая высокую электропроводность, настраиваемую поверхность, гидрофильность и слоистую архитектуру. Эти особенности делают MXene особенно привлекательными для приложений, требующих

передачи энергии и поверхностного взаимодействия, по сравнению с традиционными 2D материалами, такими как графен и переходные металлы. В данной обзорной статье рассматриваются последние достижения в синтезе MXene и уделяется внимание как традиционным методам, так и маршрутам с низким или отсутствующим содержанием фтора, включая электрохимические методы и синтез с использованием расплавленных солей. Систематически анализируется влияние этих подходов на природу терминальных функциональных групп, структурную стабильность и свойства материалов. Кроме того, обсуждаются стратегии деламинации, легирования гетероатомами и гибридизации как основным путям повышения функциональной эффективности MXene. Расширяющиеся области применения MXene в катализе, хранении и преобразовании энергии рассматриваются с точки зрения связи структура–свойства–эффективность. В устройствах хранения энергии материалы MXene обеспечивают высокую емкость, долговечность циклов и быструю ионную проводимость в литий-ионных и цинк-ионных батареях, а также в суперконденсаторах. MXene и их гибридные производные представляют собой перспективные материалы для фотокатализа, электрокатализа и процессов гидрирования углекислого газа (CO_2), обеспечивая высокую эффективность, стабильность и гибкость. Данный обзор формирует целостную научную основу для рационального проектирования MXene и открывает перспективы будущих исследований, направленных на развитие устойчивых и прикладных технологий на основе MXene.

Ключевые слова: MAX-фаза; Mxene; методы синтеза; катализ; хранение энергии.

IRSTI 87.21.02
Geography
Article

Analysis of the physicochemical properties and particle-size distribution of soils in the Khromtau region

Aitolkyn Alimuratkyzy[1], Gulzhanat Mukanova[1]*, Tursynkul Bazarbayeva[1], Batyrgeldy Shimshikov[1], Aitu Oshakbay[1], Abdurashit Nizamiev[2]

[1]Al-Farabi Kazakh National University; aitolkynalimurat@gmail.com
[2]Osh State University; nizamiev@oshsu.kg
*Correspondence: gulzhanatmukanova@gmail.com

Abstract: The article analyzes the physicochemical properties and particle-size distribution of dark brown soils in the Khromtau region. The study areas included territories adjacent to the Don Mining and Processing Plant, areas near waste heaps (terricones), and agricultural lands used for crop cultivation. Soil samples were collected from different genetic depth horizons. The following parameters were determined: soil bulk density, humus content, total and mobile forms of nitrogen, phosphorus, and potassium, soil solution reaction (pH), the total content and ionic composition of water-soluble salts, as well as the particle-size distribution of the soils. The soil reaction was found to be weakly alkaline to alkaline (pH 7.6–8.5), while the salinity level remained low, indicating non-saline conditions. Particle-size analysis revealed a progressive increase in the proportion of fine fractions (fine silt and clay) in deeper soil layers, which negatively affects the soil moisture-aeration regime through compaction. The obtained results establish a solid baseline to develop scientifically based recommendations for the rational and sustainable use of soils and land resources in the region.

Keywords: soil cover; soil profile; morphological characteristics; chemical composition; particle-size distribution; dark brown soil; deposit; Don mining and processing plant.

Citation: Alimuratkyzy, A., Mukanova, G., Bazarbayeva, T., Shimshikov, B., Oshakbay, A., Nizamiev, A. (2026). Analysis of the physicochemical properties and particle-size distribution of soils in the Khromtau region. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 155(2), 103-118. https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-103-118

Academic Editor:
N.E. Ramazanova

Received: 1.06.2026
Revised: 17.06.2026
Accepted: 23.06.2026
Published: 30.06.2026

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 city of Khromtau represents one of the major industrial centers in the Aktobe region. It hosts the Don Mining and Processing Plant, which operates one of the largest chromium deposits in Kazakhstan. The soils surrounding the city are characterized as dark brown, typical of the dry steppe climate, and have undergone significant transformation driven by both human activities and climatic conditions (Mukanova, 2025; Koshim, 2015).

Dark brown soils cover several districts of the region, spanning a total area of approximately 3.6 million hectares; consequently, their distinct investigation is of paramount importance for the economic interests of agriculture (Safarov, 2023).

The topography of the region is highly diverse: while the western and eastern sectors are predominantly plains, the central part exhibits a hilly terrain. The complexity of the geological structure significantly

influences soil thickness as well as its physicochemical properties. Dark brown soils with a light texture (light particle-size distribution) dominate the central districts, whereas loamy soils prevail in the western and southwestern areas (Novikova, 1968). The chromium deposits surrounding the city further exacerbate the environmental situation. The industrial load primarily stems from the extraction of chromium, copper, and nickel ores (Koshim, 2015; Shakirzyanova, 2011).

The region ranks second globally in terms of chromium reserves, which leads to a high concentration of environmentally hazardous industrial facilities. The industrial infrastructure encompasses mining operations, processing plants, thermal power generation, and municipal utilities (Bazarbayeva, 2025; Mukanova, 2021). As a result of this technogenic impact, alterations occur in the structure and composition of the soil, preventing it from fully executing its ecological functions (Baltabayeva, 2023). Currently, soil degradation is pronounced, and its agricultural suitability is declining, which amplifies not only environmental but also socio-economic risks. Therefore, a comprehensive study of soil composition, structure, and the patterns of their transformation is of particular significance (Kalybekov, 2019; Osintseva, 2023).

The objective of this study is to analyze the physicochemical properties and particle-size distribution of dark brown soils in the Khromtau region. According to classical soil science concepts, physicochemical characteristics and particle-size distribution play a decisive role in regulating water-air regimes, nutrient availability, biological activity, and the overall fertility of soils (Kachinsky, 1965; Dobrovolsky & Nikitin, 2012; Shein, 2005). The soil within the area between the Don Mining and Processing Plant (MPP) in Khromtau and the adjacent agricultural fields was selected as the object of research. This specific area is characterized by the juxtaposition of a high-impact technogenic industrial zone and land allocated for agricultural use. In this regard, a comprehensive assessment of the ecological status of the soil cover is critically important.

In the map illustrating the spatial distribution of the study area (Figure 1), soil sampling points are arranged systematically; sampling via this method enables the evaluation of dynamics in the soil's ecological status (Alimuratkyzy, 2025). This approach facilitates the determination of distribution patterns regarding anthropogenic loads and the identification of high-risk zones. Furthermore, the grid-based arrangement of the research points ensures the representativeness of the obtained data (Khassenova, 2025; Wu, 2014; Grygar, 2025).

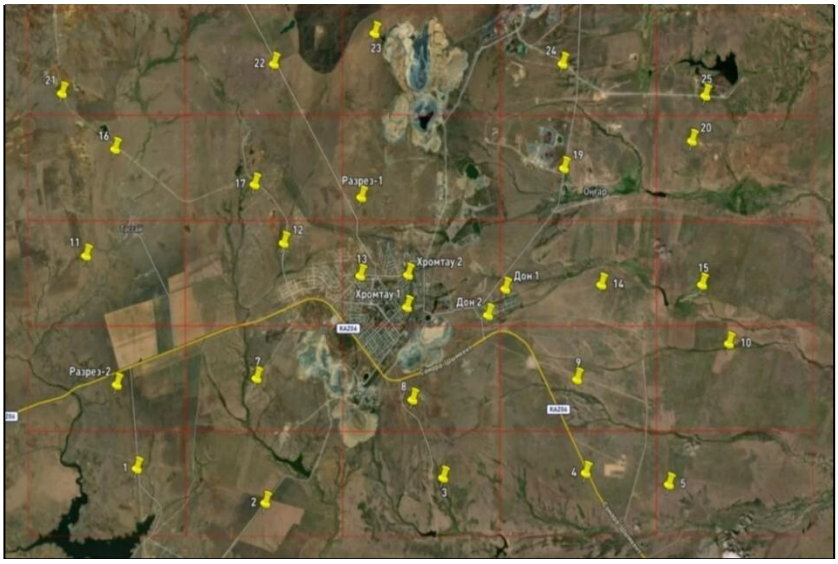


Figure 1. Spatial distribution of the study area

Unlike previous studies conducted in the Khromtau industrial zone, which mainly focused on geoecological assessment, heavy metal contamination, and remote sensing analysis (Koshim, 2015; Mukanova, 2025), the present study provides a detailed characterization of the physicochemical and

particle-size properties of dark brown soils located between the Don Mining and Processing Plant, waste heaps, and agricultural lands. The novelty of this research lies in the integrated assessment of soil bulk density, agrochemical parameters, water-soluble salts, and particle-size distribution across different genetic horizons, allowing evaluation of soil profile transformation under long-term technogenic influence. The obtained results provide baseline data for future monitoring of soil degradation and environmental changes in the Khromtau region.

2. Materials and methods

During the field research phase, soil profiles were established across territories experiencing varying degrees of natural and anthropogenic impacts. A total of two representative soil profiles (P-1 and P-2) were selected for detailed investigation. Profile P-1 was established between the Don Mining and Processing Plant and adjacent agricultural land, whereas Profile P-2 was established near waste heaps (terricones). For each horizon, laboratory analyses were performed in triplicate, and mean values are presented in the tables.

Laboratory analyses of the soil samples were conducted using standard methodologies widely accepted in the field of soil science: particle-size and microaggregate distributions were determined via the Kachinsky method; total organic carbon (humus) according to Tyurin; total nitrogen by the Kjeldahl method; carbonate carbon dioxide (CO^2) using the Geissler-Maximyuk method; cation exchange capacity (CEC) and exchangeable calcium (Ca^{2+}) and magnesium (Mg^{2+}) via the Gedroiz method; exchangeable sodium (Na^+) and potassium (K^+) using flame photometry; and water extract analysis according to Arinushkina. Furthermore, the pH of the soil suspension was measured colorimetrically; bulk density was determined using the Nekrasov auger core method; available phosphorus was analyzed via the Machigin method; available potassium according to Protasov; hydrolyzable nitrogen by the Tyurin and Kononova method; total phosphorus using the Pemberton method; total potassium via the Smith method; and bulk elemental analysis of the soil was conducted according to Gedroiz (Kachinsky, 1965; Jarsjö, 2017; Fernández-Martínez, 2014; Kim, 2025).

Within the framework of cartographic research methods, archival materials and field observation data were processed. Based on geographic information systems (GIS) technologies and remote sensing (RS) data, the specific soil sampling locations were precisely identified (Guo, 2025; Zeng, 2022; Woszczyk, 2018).

AI-assisted language editing tools (FixMeBot; ChatGPT) were used solely for grammatical and stylistic improvement. All scientific analyses, interpretations, and conclusions were performed by the authors.

3. Results

The high level of anthropogenic load within the territory of the Don Mining and Processing Plant has resulted in a substantial transformation of the soil cover. Driven by industrial activities, open-pit mines, external waste dumps, industrial sites, and processing complexes have completely lost their natural state. Consequently, soil fertility has declined, and its morphological and physicochemical properties have undergone significant alterations. In numerous areas, the fertile topsoil has been entirely removed, and the relief has undergone repeated mechanical leveling, leading to the formation of distinct anthropogenically modified (technogenic) landscapes in the region.

To characterize the soil morphology and determine its physicochemical properties, soil pits were excavated within the study area (coordinates: N – 50°14.725′ / E – 58°22.055′, absolute elevation: 401 m). The field analysis revealed that the soils in this specific area exhibit a dark brown coloration, and the local topography is characterized by a flat plain. Soil samples were subsequently collected to assess the physicochemical composition under laboratory conditions.

Soil Profile No. 1 was excavated in an area located 300 m south of a major open-pit mine featuring high waste heaps (terricones) adjacent to agricultural fields (Figure 2). The local topography is characterized as a flat, pristine steppe, with a total projective vegetation cover of 60 %. The plant community is predominantly composed of fescue-feather grass (Festuca-Stipa) and wormwood

(Artemisia), intermixed with calendula (Calendula officinalis), elecampane (Inula), common soapwort (Saponaria officinalis), and various other herbaceous species. The open-pit mines operating for chromium ore extraction are clustered around the Don Mining and Processing Plant (MPP). These open pits are surrounded by massive waste heaps reaching heights of 30 to 50 meters. The soil type is classified as a dark brown calcareous (carbonate) medium loam.



Figure 2. Soil profile established between the Don MPP and the agricultural field

Depth, cm	Horizon Description
A1 0 – 12 cm	Dark dark-brown color, dry, fine granular structure, dusty, presence of plant roots, heavy loam, presence of small stones; effervesces with 10 % hydrochloric acid (HCl); gradual transition to the subsequent horizon.
A2 12 – 22 cm	Dark dark-brown color, fresh (slightly moist), presence of plant roots, moist, heavy loam, stony, effervesces with 10 % hydrochloric acid (HCl); distinct transition to the subsequent horizon.
B1 22 – 30 cm B2 30 – 56 cm	Greyish dark-brown color, fresh (slightly moist), highly stony, presence of salt spots, plant roots are rare, heavy loam, presence of small gravelly stones; effervesces with 10 % hydrochloric acid (HCl); distinct transition to the subsequent horizon.
C 56 – 80 cm	Dark greyish-brown color, presence of whitish spots of salts and oxides, highly stony, heavy loam, effervesces with 10 % hydrochloric acid (HCl).

The wheat agricultural field is characterized by an open plain with sparse vegetation cover, indicating that the soil surface is highly susceptible to wind and water erosion. Such conditions contribute to the degradation of the soil's physical properties, a reduction in organic matter content, and the rapid dissemination of pollutants.

The proximity of agricultural lands to the industrial zone exacerbates the risk of heavy metals and other technogenic contaminants accumulating in the soil matrix. This, in turn, may exert a detrimental impact on the stability and sustainability of the agroecosystem.

In the vicinity of the chromium ore extraction sites, adjacent to the waste heaps (terricones), Soil Profile No. 2 was excavated within the dark brown soil zone to serve as a control/monitoring point (Figure 3) (coordinates: N – 50°16.306′ / E – 58°30.262′, absolute elevation: 403 m). The local topography is characterized as an undulating plain. The vegetation community is predominantly composed of fescue and feather grass (Festuca-Stipa), interspersed with wormwood (Artemisia) and various other herbaceous species. The total projective vegetation cover ranges between 70 % and 80 %.



Figure 3. Soil profile established adjacent to the waste heaps (terricones)

Depth, cm	Horizon Description
A1 0 – 9 cm.	Dark dark-brown color, porous, fine granular dusty structure, abundant vegetation, medium sandy loam, absence of foreign inclusions, small stones are rare; effervesces with 10 % hydrochloric acid (HCl); the transition to the subsequent horizon is distinct, defined by a change in density.
A2 9 – 22 cm.	Dark dark-brown color, compacted, fresh (slightly moist), presence of plant roots, fine granular dusty structure, presence of small stones, medium loam; effervesces with 10 % hydrochloric acid (HCl); the transition to the subsequent horizon is distinct, defined by a change in density.
B1 22 – 32 cm.	Dark-brown color, fresh (slightly moist), blocky-granular structure, presence of whitish spots of salts and carbonates, medium loam, dense; effervesces with 10 % hydrochloric acid (HCl); continuous, solid bedrock (stones) underlies below the depth of 32 cm.

The soil profile delineates the morphological structure of the soil within the study area. Distinct horizons, a shallow upper humus layer, and signs of compaction in the lower genetic horizons are evident across the profile. This structural state is interpreted as a direct consequence of long-term anthropogenic impact.

Soil physicochemical parameters (including pH, organic carbon/humus content, salinity levels, and heavy metal accumulation) serve as primary indicators for assessing the ecological stability of the ecosystem. In sampling points located proximate to the industrial zone, these parameters are

highly likely to deviate from baseline (background) values, whereas a relative improvement in ecological conditions is anticipated moving toward the agricultural fields.

The soil profile was established within a territory situated in the immediate vicinity of the waste heaps (terricones) in the Khromtau region. This area represents a technogenic landscape characterized by the accumulation of mining waste and is defined by a high level of anthropogenic stress exerted on the surrounding environment.

A flat steppe landscape is observed adjacent to the waste heaps. The vegetation cover is sparse, primarily comprising drought-resistant (xerophytic) herbaceous species. This ecological condition reflects a reduction in the naturally developed soil fertility and indicates an overwhelming technogenic impact. Pronounced signs of wind erosion create favorable conditions for the widespread dissemination of fine particulate matter.

The proximity of the waste heaps intensifies environmental risks, such as atmospheric dust pollution, heavy metal accumulation, and the disruption of the soil's native chemical composition.

The soil profile demonstrates weakly differentiated genetic horizons and a shallow topsoil layer. The thickness of the humus horizon is severely constrained, and the soil exhibits a light coloration, indicating an insufficient concentration of organic matter. With increasing depth, distinct compaction is observed in the lower horizons, resulting from the degradation of their physical properties.

The inclusion of technogenic materials within the profile matrix is highly apparent, demonstrating the infiltration and integration of particulate matter originating from the waste heaps into the soil horizons. This condition exerts a detrimental effect on the soil's moisture-aeration regime, thereby reducing the overall stability of the ecosystem.

The ecological status of the soils surrounding the waste heaps is continually shaped by the interplay of natural and anthropogenic factors. Consequently, these territories are classified as high-risk environmental zones that require systematic and continuous monitoring.

Table 1. Soil bulk density (structure density)

Soil Profile	Depth, cm	Tin No.	Mass of empty tin, g	Mass of soil before drying, g	Mass of soil after drying, g	Mass of absolutely dry soil, g	Mass of evaporated water, g	Moisture content, %	Mean moisture content, %	Bulk density, g/cm^3	Mean bulk density, g/cm^3
P-1, Agricultural field	0-12	23	74.92	196.00	190.40	115.48	5.60	4.85	5.67	1.22	1.20
		13	75,60	194.00	186.10	110.50	7.90	7.15		1.16	
		22	77.52	199.00	193.20	115.68	5.80	5.02		1.22	
	12-22	21	75.03	218.00	206.77	131.47	11.23	8.54	8.65	1.38	1.42
		15	74.18	227.00	213.21	139.03	13.79	9.92		1.46	
		10	75.44	193.00	184.29	108.85	8.71	7.50		1.14	
	22-30	11	74.60	215.92	201.06	126.46	14.86	11.75	11.49	1.33	1.36
		12	74.07	212.94	198.87	124.80	14.07	11.27		1.31	
		14	81.00	233.26	217.88	136.88	15.68	11.45		1.44	

During the research, the soil bulk density (structural density) in the Khromtau region (Khromtau, sampling point P–1) was determined using integrated field and laboratory methods. Samples were collected from genetic horizons at depths of 0–12 cm, 12–22 cm, and 22–30 cm (Table 1).

The soil bulk density was determined via the core (cylinder) method. Sampling was performed in triplicate for each horizon, during which the initial mass, mass prior to drying, and oven-dry mass

were sequentially measured. Following the determination of the absolutely dry soil mass, the soil moisture content, density, and bulk density values were calculated.

This methodology is widely utilized to assess the degree of soil compaction, the status of the moisture-aeration regime, and the extent of anthropogenic impact.

The obtained results demonstrate that within the upper 0–12 cm layer, the soil bulk density is relatively low, ranging approximately from 1.14 to 1.22 g/cm^3. This horizon is characterized by a higher relative concentration of organic matter and a loose structural arrangement. However, the low moisture content (4.8–7.1 %) reflects the positioning of the soil under arid climatic conditions. In the 12–22 cm layer, the bulk density ranges between 1.38 and 1.46 g/cm^3, indicating a notable compaction of the soil matrix. This structural state may be attributed to the intensification of mechanical compaction on agricultural lands and the subsequent disruption of the native soil structure. With increasing depth, the bulk density in the 22–30 cm horizon reaches higher values (1.31–1.44 g/cm^3), illustrating a pronounced trend of soil compaction. An increase in moisture content was observed in this horizon, where the dense structural framework may impede the free movement of water and air.

Table 2. Agrochemical properties of dark brown soils

Sampling Location	Depth, cm	Humus, %	Total			Mobile			pH	CO_2
			Nitrogen%	Phosphorus %	Potassium %	Nitrogen mg/kg	Phosphorus, mg/kg	Potassium mg/kg		
P-1, Agricultural field	0-12	3.12	0.196	0.115	2.405	32.2	6	220	7.7	0.16
	12-22	2.50	0.168	0.101	2.206	24.3	18	560	8.1	0.16
	22-30	2.17	0.154	0.108	2.201	20.1	2	220	8.2	0.19
	30-56	-	-	0.105	2.334	-	2	230	8.5	0.26
	56-80	-	-	0.070	1.860	-	4	260	8.3	0.48
P-2, Adjacent to waste heaps (terric ones)	0-9	4.58	0.210	0.180	2.767	61.6	72	700	7.6	0.26
	9-22	3.93	0.196	0.178	2.747	36.4	40	580	8.0	0.19
	22-32	2.64	0.168	0.153	2.605	28.0	40	450	8.4	0.16

Note: "-" not determined.*

During the research, the agrochemical properties of dark brown soils in the Khromtau region (Khromtau, sampling point P–1) were comprehensively evaluated across various depth horizons ranging from 0 to 80 cm (Table 2). The core parameters determined included humus content, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, mobile nutrient elements, soil reaction (pH), and carbonate content.

According to the obtained results, the highest concentration of humus is observed in the upper soil horizons. In Soil Profile No. 1, the humus content within the 0–12 cm layer is 3.12 %, whereas it decreases to 2.50–2.17 % with increasing depth. This distribution pattern is attributed to the accumulation of organic residues primarily on the soil surface and the high level of biological activity within this specific horizon. In Soil Profile No. 2, the humus content is relatively high (4.58–2.64 %), indicating a somewhat more favorable agroecological state of this territory.

Humus content and nitrogen concentrations were not determined in the 30–56 cm and 56–80 cm horizons because these deeper layers are located below the main humus-accumulative horizon. According to established soil science approaches, the determination of humus and available nitrogen is primarily conducted in the upper soil horizons where organic matter accumulation and biological activity are concentrated.

The total nitrogen content across all soil samples ranges from low to moderate levels (0.070–0.210 %). This parameter correlates closely with the humus content and serves as a fundamental indicator of soil fertility.

The total phosphorus content varies within the range of 0.101–0.180 %, indicating a moderate phosphorus content. The potassium content is relatively high (1.860–2.767 %), which is linked to the characteristic mineralogical composition inherent to dark brown soils.

The content of mobile nitrogen varied considerably between the investigated sites. The soils adjacent to the waste heaps (P-2) were characterized by higher concentrations of available nitrogen, ranging from 28.0 to 61.6 mg/kg in the upper horizons. In contrast, agricultural soils (P-1) contained lower amounts of mobile nitrogen, estimated at 20.1–32.2 mg/kg in the upper 30 cm layer. In both profiles, the nitrogen content generally decreased with depth, indicating the accumulation of organic matter and nutrients in the surface horizons. The highest concentration of mobile nitrogen (61.6 mg/kg) was recorded in the 0–9 cm layer of soils located near the terricones.

The content of mobile phosphorus varies significantly across the genetic horizons. In Soil Profile No. 2, this parameter reaches 72 mg/kg within the 0–9 cm layer, demonstrating a high level of supply, whereas in the other horizons, the mobile form of phosphorus remains at low or moderate levels.

The mobile potassium content is high across all investigated horizons (220–700 mg/kg), indicating that the soil is well-supplied with potassium, thereby creating favorable conditions for the cultivation and growth of agricultural crops.

The reaction of the soil solution varies from weakly alkaline to alkaline (pH 7.6–8.5). This property is characteristic of dark brown soils and is directly associated with the presence of carbonates. The carbonate content, measured as CO_2, increases with depth, rising from 0.16 % to 0.48 %. This condition indicates an intensifying influence of carbonate parent rocks in the lower horizons of the soil profile.

The obtained agrochemical parameters indicate that the fertility of the dark brown soils in the Khromtau region stands at a moderate level. The relatively low concentrations of humus and nitrogen, particularly in territories proximate to industrial zones, demonstrate that the soils have been subjected to anthropogenic stress. Furthermore, the deficit of available phosphorus necessitates the implementation of agrotechnical measures, specifically fertilizer application.

Overall, the investigated soils are suitable for agricultural use; however, systematic monitoring of their agrochemical status is required to ensure long-term environmental sustainability.

Table 3. Content of water-soluble salts in dark brown soils $\frac{\%\%}{M.EQ.}$

№	Depth, cm	Water extract of absolutely dry soil								
		Total soluble salts, %	Alkalinity		Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
			Total HCO_3^-	CO_3^{2-}						
P-1, Agricultural field	0-12	0.021	0.0625	0.000	0.000	0.033	0.0222	0.0111	0.02	0.0333
	12-22	0.028	0.0607	0.000	0.000	0.0461	0.0222	0.0105	0.02	0.025
	22-30	0.028	0.0607	0.000	0.000	0.0444	0.0222	0.0105	0.02	0.025

	30-56	0.027	0.0607	0.002	0.033	0.05	0.0222	0.0105	0.02	0.0333
	56-80	0.087	0.0611	0.000	0.000	0.0475	0.0222	0.0105	0.0234	0.0333
P-2, Adjacent to waste heaps (terricones)	0-9	0.026	0.0607	0.000	0.000	0.05	0.0222	0.0111	0.02	0.0375
	9-22	0.027	0.0625	0.000	0.000	0.05	0.0222	0.0105	0.02	0.0333
	22-32	0.026	0.06	0.000	0.000	0.05	0.0222	0.0105	0.02	0.0333

The research results indicate that the concentration of water-soluble salts in the dark brown soils of the Khromtau region is low (Table 3). The total soluble salts content in the soil solution at sampling point P–1 varies between 0.021 % and 0.087 %, confirming a weak/negligible level of salinity across all investigated genetic horizons.

Vertical distribution analysis demonstrates a relative increase in salt content within the 56–80 cm horizon. This trend indicates an accumulation process of soluble salts in the lower horizons; however, these values do not signify soil alkalization or salinity development.

Regarding the ionic composition, calcium $Ca^{2+}$and sulfate SO^{2-} ions are predominant, characterizing the typical calcium-sulfate type of salinity inherent to dark brown soils. The low concentration of sodium Na^{+} ions indicates the absence of a solonetzization (alkalization) risk. Furthermore, chloride ions Cl^{-} and carbonates CO^{2-} were detected at exceptionally low levels.

In the soil of the agricultural field, the total soluble salt content is approximately 0.081 %, exhibiting a slightly higher value compared to the industrial zones. This variation is attributed to the continuous influence of agricultural land use and the specific soil moisture regime.

The increase in total soluble salts observed in the 56–80 cm horizon of Profile P-1 is likely associated with the accumulation of soluble compounds in the lower part of the profile due to limited downward water movement and the influence of carbonate parent material. However, the measured value remains below the threshold of saline soils.

Overall, the investigated dark brown soils are classified as non-saline and are evaluated as highly favorable for agricultural production and utilization.

Table 4. Particle-size distribution of soil profiles

Sampling Location	**Depth, cm**	**A.C.H % H2O**	**% Fraction content of absolutely dry soil**						
			Sum of fractions, mm						
			Sand, mm		**Dust, mm**			**Silt, mm**	**Physical clay**
			1.0-0.25	**0.25-0.05**	**0.05-0.01**	**0.01-0.005**	**0.005-0.001**	**<0.001**	**Fractions < 0.01**
P-1, Agricultural field	0-12	4.76	30.00	25.50	30.24	2.94	1.68	9.66	14.28
	12-22	5.32	8.45	40.43	10.56	9.72	21.97	8.87	40.56
	22-30	5.66	10.09	23.34	24.17	5.94	30.10	6.36	42.40
	30-56	5.48	5.80	15.07	26.66	11.00	39.36	2.12	52.48
	56-80	5.18	9.98	64.71	22.78	0.84	0.84	0.84	2.53
	0-9	3.34	19.51	41.59	30.62	1.24	6.21	0.83	8.28

P-2, Adjacent to waste heaps (terricones)	9-22	3.84	25.44	34.63	27.87	5.82	5.41	0.83	12.06
	22-32	3.82	18.34	42.57	35.77	0.42	0.83	2.08	3.33

Based on the classical Kachinsky classification of soil texture, the investigated soils demonstrate considerable textural variability. In Profile P-1 (agricultural field), the content of physical clay (<0.01 mm) ranges from 2.53 % to 52.48 %, indicating a transition from a loose sandy texture (2.53 %) in the deepest horizon (56-80 cm) to a sandy loam (14.28 %) in the surface layer, reaching medium loam (40.56-42.40 %) and heavy loam (52.48 %) textures in the middle part of the profile. In Profile P-2 (adjacent to waste heaps), the content of physical clay varies from 3.33 % to 12.06 %, classifying these horizons sequentially as cohesive sand (8.28 %), sandy loam (12.06 %), and loose sand (3.33 %). Thus, Profile P-1 is characterized by a substantially heavier textural composition and distinct vertical differentiation, whereas Profile P-2 consists predominantly of loose and cohesive light-textured sandy matrices (Table 4).

The particle-size distribution analysis revealed substantial differences between the two investigated soil profiles. In Profile P-1, the upper horizon (0–12 cm) is dominated by sand and dust fractions, which together account for approximately 85 % of the soil mass. Such a composition promotes favorable aeration and water infiltration conditions. However, with increasing depth, the proportion of fine particles gradually increases. The content of physical clay rises from 14.28 % in the surface horizon to 52.48 % at a depth of 30–56 cm, indicating a significant accumulation of fine material in the subsurface layers.

The highest content of physical clay was observed in the 30–56 cm horizon, where fine fractions predominate over coarse particles. Such textural characteristics may reduce soil permeability, increase bulk density, and negatively affect the soil moisture–air regime. In contrast, the deepest horizon (56–80 cm) contains a high proportion of sand particles, particularly the 0.25–0.05 mm fraction, reflecting the influence of the parent material on soil formation processes.

Profile P-2, located adjacent to the terricones, exhibits a more uniform particle-size distribution. Sand and dust fractions dominate throughout the profile, while the content of physical clay remains low, varying from 3.33 % to 12.06 %. Compared with the agricultural field soil, this profile is characterized by a lighter texture and a lower degree of compaction.

The predominance of coarse fractions in the surface horizons contributes to good aeration and drainage properties, whereas the accumulation of physical clay in the middle horizons of Profile P-1 increases water-holding capacity but may restrict root penetration under conditions of excessive compaction. Overall, the particle-size distribution data indicate that the soils of the Khromtau region are generally characterized by light- to medium-textured materials, although significant textural differentiation occurs within the agricultural profile. The observed increase in physical clay content with depth suggests the development of compact subsurface horizons, highlighting the need for continuous monitoring of soil physical properties under both agricultural and technogenic influences.

4. Discussion

The results obtained in the course of our comprehensive research indicate that the key physicochemical and morphological properties of dark brown soils in the investigated Khromtau region are determined by both natural soil-forming processes and long-term intensive anthropogenic influences associated with chromium mining activities. Pronounced changes in soil morphological characteristics, agrochemical properties, and particle-size composition were particularly evident in areas located near the Don Mining and Processing Plant and adjacent waste heaps (terricones). These findings are fully consistent with previous studies conducted in industrial regions of Kazakhstan, which have reported significant alterations in soil physical and chemical properties under technogenic impact.

According to the analytical data, the soil bulk density progressively increases with depth, a phenomenon that underscores an intensifying trend of soil compaction. The elevated bulk density values within the 12–30 cm horizons may be associated with long-term anthropogenic disturbance, including mechanical impacts related to industrial and agricultural activities, alongside the general disruption of the soil's native structural framework. Prior studies have similarly demonstrated that soil compaction in technogenic zones induces a degradation of the moisture-aeration regime, ultimately culminating in physical soil degradation.

The vertical distribution of humus and nutrients within the investigated soil profiles follows the classical pattern typical of zonal dark brown soils, with the highest concentrations occurring in the upper surface horizons and gradually decreasing with depth. In Profile P-1, established on the agricultural field, the humus content progressively decreased from 3.12 % in the upper 0–12 cm horizon to 2.50 % in the 12–22 cm layer, and reached a minimum of 2.17 % at a depth of 22–30 cm. A similar trend was observed in Profile P-2 near the terricones, where the humus content decreased from a maximum of 4.58% in the surface layer (0–9 cm) to 3.93 % in the 9–22 cm horizon, and further down to 2.64 % at a depth of 22–32 cm. The higher humus content recorded in the upper horizons of Profile P-2 may be associated with the preservation of natural steppe vegetation and the accumulation of plant residues in the surface layer. The general decline in total nitrogen and available nutrients with depth reflects both the natural reduction in organic matter content and the genetic differentiation of the soil horizons.

Available phosphorus concentrations were generally low to moderate in both studied profiles, indicating a moderate phosphorus supply status. In contrast, the potassium content remained relatively high throughout the profiles (ranging from 1,860 to 2,767 mg/kg), which directly reflects the specific mineralogical composition of the parent material and the natural nutrient status of regional dark brown soils.

The reaction of the soil solution was weakly alkaline to alkaline throughout both soil profiles, with pH values ranging from 7.6 to 8.5. These values are highly characteristic of dark brown soils formed under arid and semi-arid climatic conditions of Western Kazakhstan. The documented increase in carbonate content with depth reflects the geogenic influence of carbonate-rich parent materials and the downward migration of carbonates within the soil profile. Despite the alkaline reaction, the investigated soils cannot be classified as saline or solonetzic, since the total content of soluble salts remained low (0.021–0.087 %), and no evidence of significant salinization was detected.

According to the particle-size classification developed by N.A. Kachinsky, the investigated soils demonstrate considerable textural variability. In Profile P-1 (agricultural field), the content of physical clay (<0.01 mm) varies drastically from 2.53 % to 52.48 %, indicating a clear transition from sandy loam in the surface horizon to medium to heavy loam textures in the middle part of the profile. The deepest horizon (56–80 cm) is characterized by a sandy texture due to the low content of physical clay. In contrast, Profile P-2 contains only 3.33–12.06 % physical clay and is therefore classified mainly as sandy and sandy loam. These differences indicate a substantially heavier granulometric composition in the agricultural profile compared with the soils adjacent to the terricones.

The particle-size distribution data further show that sand and dust fractions predominate in the upper horizons of both profiles, whereas the proportion of physical clay increases with depth, particularly in Profile P-1. The accumulation of fine particles in the subsurface horizons may contribute to increased soil density, reduced permeability, and deterioration of the moisture–air regime. Such conditions can restrict root penetration and reduce the effectiveness of water infiltration. Conversely, the predominance of sand fractions in Profile P-2 promotes better drainage and aeration but may reduce water-holding capacity. The presence of technogenic material and industrial dust near the waste heaps may also influence the observed granulometric composition and contribute to profile heterogeneity.

Overall, the investigated dark brown soils remain relatively stable with respect to their agrochemical characteristics and do not exhibit signs of industrial salinization. Nevertheless, the observed vertical differentiation of physical clay, together with changes in nutrient distribution and

carbonate accumulation, indicates ongoing transformations of soil properties under the combined influence of natural and anthropogenic factors. These findings emphasize the importance of continuous environmental monitoring of soil quality in mining regions of Western Kazakhstan and the implementation of measures aimed at preventing physical degradation and maintaining soil fertility.

Although heavy metal contamination is considered one of the major environmental concerns in mining regions, the present study focused primarily on physicochemical, agrochemical, and particle-size characteristics of soils. Heavy metal concentrations were not determined within the framework of this investigation and should be addressed in future studies aimed at assessing ecological risks associated with chromium mining activities in the Khromtau region.

5. Conclusion

In synthesis, this study demonstrates that the physicochemical and structural attributes of the dark brown soils in the Khromtau region are simultaneously governed by natural pedogenic pathways and chronic technogenic pressure stemming from chromium mining operations. The comparative assessment between the cultivated matrix (Profile P-1) and the industrially exposed landscape adjacent to the waste heaps (Profile P-2) unveils distinct variations in their agrochemical dynamics and particle-size distribution frameworks.

The research findings demonstrate a pronounced trend of soil compaction within areas located proximate to the industrial zone. The progressive increase in soil bulk density with depth, rising from 1.14-1.22 g/cm^3 to 1.38-1.46 g/cm^3, delineates a clear degradation of the moisture–aeration regime and may indicate the development of unfavorable physical conditions within the soil profile. This structural alteration may be associated with anthropogenic disturbance and long-term land-use impacts and the emergence of technogenic landscapes.

The vertical allocation of soil organic matter and macro-nutrients adheres to classical zonal regularities, demonstrating a pronounced surface accumulation that progressively attenuates down the profile gradient. The documented humus content varies between 2.17 % and 4.58 %, while the total nitrogen and phosphorus concentrations fluctuate within the ranges of 0.070-0.210 % and 0.101-0.180 %, respectively. Conversely, the potassium baseline remains consistently elevated throughout both profiles (1.860-2.767 %), validating a strong mineralogical dependence on the native, potassium-rich parent material of the region.

The soil solution reaction exhibits a consistent weakly alkaline to alkaline shift (pH 7.6-8.5), driven by the buffering capacity of the carbonate system. The upward gradient of carbonate accumulation discovered in the lower genetic horizons suggests the downward redistribution of carbonates within the profile and highlights the geogenic influence of the underlying parent bedrock. Crucially, the low abundance of water-soluble salts confirms that these soils indicate non-saline conditions, lacking any current risks of active solonetzization.

Evaluated through the classical particle-size classification of N.A. Kachinsky, the profiles demonstrate pronounced textural differentiation along the vertical axis. Profile P-1 (agricultural land) marks a distinct lithological transition from a sandy loam surface horizon into relatively dense medium to heavy loam textures within the middle tiers, before shifting into a sand-dominated texture in the basal horizon. In juxtaposition, the profile configuration of Profile P-2 is predominantly characterized by coarser sandy and sandy loam textures. Across both sites, the mass proportion of physical clay (<0.01 mm) spans a wide range from 2.53 % to 52.48 %, corroborating an intense structural heterogeneity.

The progressive accumulation of physical clay within the subsurface horizons of Profile P-1 reveals the development of dense, restrictive layers that significantly impair hydraulic conductivity and further deteriorate the soil moisture–aeration regime through compaction. On the contrary, the sand-dominated framework of Profile P-2 facilitates rapid drainage and high aeration capacity, but introduces limitations regarding moisture retention, rendering the topsoil potentially more susceptible to wind erosion and technogenic dust loading. These structural divergences illustrate the synergetic

impact of pristine soil-forming factors and modern technogenic disturbances on the physical integrity of the soil cover.

Conclusively, the findings provide a useful basis for ecological zoning, land-use planning, and future soil monitoring programs in the Khromtau region.

6. Supplementary Materials: No supplementary material.

7. Author Contributions

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

8. Author Information

Alimuratkyzy, Aitolkyn – PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050040; aitolkynalimurat@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6938-3511

Mukanova, Gulzhanat – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050040; gulzhanatmukanova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3683-6622

Bazarbayeva, Tursynkul – Candidate of Geographical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050040; tursynkul.bazarbayeva@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-5685-5215

Shimshikov, Batyrgeldy – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050040; bshimshikov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0196-3373

Oshakbay, Aitu – PhD, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan, 050040; aitu.oshakbay@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2515-923X

Nizamiev, Abdurashit – Doctor of Geographical Sciences, Professor, Osh State University, 331 Alymbek Datka St., Osh, Kyrgyzstan; nizamiev@oshsu.kg, https://orcid.org/0000-0003-3525-6156

9. Funding: This scientific research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the program-targeted funding framework, Project No. BR21882122: "Sustainable Development of Natural-Economic and Socio-Economic Systems of the Western Kazakhstan Region in the Context of Green Development: Comprehensive Analysis, Concept, Prognostic Assessment, and Scenarios," specifically within Subprogram No. 4: "Assessment of Soil Pollution by Toxic Chemicals as a Result of Industrial Activities in the Western Kazakhstan Region."

10. Acknowledgements: None.

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

12. References

1. Mukanova, G., Alimuratkyzy, A., Bazarbayeva, T., Shimshikov, B., Tukenova, Z., Oshakbay, A., & Kurbanova, L. (2025). Assessment of the ecological state of soils in the Khromtau region based on agrochemical indicators (Khromtau oniri topyraktarynyn ekologiyalyk jagdayyn agrokhimiyalyk kersetkishter negizinde bagalau in Kazakh). *Journal of al-Farabi Kazakh National University. Geography series*, 78(3). https://doi.org/10.26577/JGEM202578313

2. Koshim, A. G., & Sergeyeva, A. M. (2015). Geoecological analysis of the industrial center of Khromtau and adjacent territories *(*Geoekologicheskiy analiz promyshlennogo tsentra Khromtau i prilegayushchikh territoriy in Russian) [Conference session]. *Environmental Safety of Mining Regions Conference*, Yekaterinburg, Russian Federation.
3. Safarov, R., Berdenov, Z., Shomanova, Z., Nossenko, Y. G., & Bexeitova, Zh. (2023). Spatial distribution of elements, environmental effects, and economic potential of technogenic waste materials of chromite slag from dumps of Don mining and processing plant. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 58(6), 1102–1111. https://doi.org/10.59957/jctm.v58i6.162
4. Novikova, G. (Ed.). (1968). *Pochvy Kazakhskoy SSR: Aktyubinskaya oblast'* (Soils of the Kazakh SSR: Aktobe Region). (Vol. 11). Gylym.
5. Koshim, A. G., Sergeyeva, A., Umirzakova, Zh., & Baydrakhmanova, G. (2015). Geoecological state of the Khromtau deposit and its mapping using multi-temporal Landsat satellite imagery (Geoekologicheskoye sostoyaniye mestorozhdeniya Khromtau i yeye kartografirovaniye po raznovremennym kosmosnimkam Landsat in Russian). *Journal of al-Farabi Kazakh National University. Geography series*, 41(2), 38–44. https://bulletin-geography.kaznu.kz/index.php/1-geo/article/view/252
6. Shein, E.V. (2005). *Course of Soil Physics* (Kurs fiziki pochv in Russian). Moscow State University Press.
7. Baltabayeva, S. (2023). Characterization of chromite mining waste via mineralogical and geochemical approaches, Khromtau Site (Master's thesis). Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan.
8. Kachinsky, N.A. (1965). *Soil Physics* (Fizika pochvy in Russian). Part 1. Vysshaya Shkola.
9. Bazarbayeva, T., Khassenova, A., Tukenova, Z., Mukanova, G., Shimshikov, B., Tussupova, B., Kudaibergen, K., & Alimuratkyzy, A. (2025). Current state of contamination of soil in the West Kazakhstan Region with toxic chemicals as a result of industrial activities. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 23(1), 173–180. https://doi.org/10.22124/cjes.2025.8572
10. Mukanova, G. A., Zhakypbek, Y., Toleutayeva, A. K., & Akhtayeva, N. Z. (2021). Study of heavy metal contamination within the territory of the Sokolov-Sarybai Mining and Processing Production Association (Sokolov-Sarybay Tau-Ken Bayytu Ondiristik Birlestigi aumagynda auyr metaldarmen lastanudyzerteu in Russsian). *Gornyy zhurnal Kazakhstana*, 2, 48–52.
11. Kalybekov, T., Tursbekov, S. V., Zhakypbek, Y., Akhtayeva, N. Z., & Mukanova, G. A. (2019). Study of the intensification of soil formation processes during the reclamation of waste dump surfaces (Izucheniye intensifikatsii pochvoobrazovatel'nykh protsessov pri rekul'tivatsii poverkhnosti otvalov in Russian). *Vestnik KRSU*, 19(4), 93–98.
12. Dobrovolsky, G.V., & Nikitin, E.D. (2012). *Soil Science* (Pochvovedenie in Russian). Moscow State University Press.
13. Khassenova, A., Bazarbayeva, T., Nizamiev, A., Kurbanova, L., Tussupova, B., Kenzhebay, R., Bekzhanova, A., & Khamitov, A. (2025). Assessment of the stability potential of geosystems under anthropogenic influences (Case study: Ural River). *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 23(1), 181–187. https://doi.org/10.22124/cjes.2025.8573
14. Wu, J., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., & Jiao, X. (2014). Evaluation of soil contamination indices in a mining area of Jiangxi, China. *PLoS ONE*, 9(11), e112917. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112917
15. Alimuratkyzy, A., Mukanova, G., Bazarbaeva, T., Tukenova, Z., Shimshikov, B., Abdibattayeva, M., Bazarbayeva, Zh., & Serikbay, A. (2025). Spatial heterogeneity of soil pollution by heavy metals in areas of chromite ore mining. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 23(4), 927–936. https://doi.org/10.22124/cjes.2025.9210
16. Shakirzyanova, R. A. (2011). Hygienic assessment of soil in the city of Khromtau (Gigiyenicheskaya otsenka pochvy g. Khromtau in Russian). *Meditsinskiy zhurnal Zapadnogo Kazakhstana*, 30(2), 45–48.

17. Guo, K., Zhang, Z., Li, G., Liu, H., Wang, Z., Fu, Y., & Wang, W. (2025). Impact of mining methods and mine types on heavy metal (loid) contamination in mine soils: A multi-index assessment. *Minerals*, 15(9), 986. https://doi.org/10.3390/min15090986
18. Grygar, T. M., Adamec, S., Tůmová, Š., Burdová, H., Kříženecká, S., Bretschneiderová, D., & Pavlů, I. (2025). Identification of coal combustion impacts on soil contamination by risk elements needs empirical holistic approach: case study in the Most Basin, Czech Republic. *Environmental Earth Sciences*, 84, Article 446. https://doi.org/10.1007/s12665-025-12458-z
19. Zeng, Q., Shen, L., Feng, T., & Hao, R. (2022). Investigation of the distribution of heavy metals in the soil of the Dahuangshan mining area of the Southern Junggar coalfield, Xinjiang, China. *Minerals*, 12(10), 1332. https://doi.org/10.3390/min12101332
20. Jarsjö, J., Chalov, S. R., Pietroń, J., Alekseenko, A. V., & Thorslund, J. (2017). Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia. *Regional Environmental Change*, 17, 1991–2005. https://doi.org/10.1007/s10113-017-1169-6
21. Fernández-Martínez, R., Loredo, J., Ordóñez, A., & Rucandio, I. (2014). Mercury availability by operationally defined fractionation in granulometric distributions of soils and mine wastes from an abandoned cinnabar mine. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 16(2), 289–298. https://doi.org/10.1039/C3EM00710C
22. Kim, D. M., Batsaikhan, B., Yun, S. T., Im, D. G., & Seo, H. S. (2025). Assessing soil contamination in a mining city using Cu, Mo, Pb, and Zn isotopic ratios and PMF analysis. *Environmental Technology and Innovation*, 40, Article 104498. https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104498
23. Osintseva, M. (2023). Assessment of soil properties in technogenically disturbed lands of Kemerovo Oblast – Kuzbass. *Qubahan Academic Journal*, 3(4), 1–9. https://doi.org/10.48161/qaj.v3n4a164
24. Woszczyk, M., Spychalski, W., & Boluspaeva, L. (2018). Trace metal (Cd, Cu, Pb, Zn) fractionation in urban-industrial soils of Ust-Kamenogorsk (Oskemen), Kazakhstan – implications for the assessment of environmental quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, Article 362. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6733-0
25. Uspanov, U.U. (2025). Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry. (2024–2025). *Reports of the testing laboratory*. Protocols dated July 18, 2024, and June 4, 2025. Almaty, Kazakhstan.

Хромтау өңірі топырағының физика-химиялық қасиеті мен гранулометриялық құрамын талдау

Әлимұратқызы Айтолқын, Мұқанова Гүлжанат, Базарбаева Турсынкул, Шимшиков Батыргельды, Ошақбай Айту, Низамиев Абдурашит

Аңдатпа: Мақалада Хромтау өңіріндегі қарақоңыр топырақтардың физика-химиялық қасиеті және гранулометриялық құрамы талданды. Зерттеу нысандары ретінде Дөң кен-байыту комбинатына іргелес аумақтар, терриқондар маңы және ауылшаруашылық мақсатта пайдаланылатын егістік жерлер таңдалды. Топырақ үлгілері әртүрлі тереңдік қабаттарынан алынып, көлемдік салмақ, гумус мөлшері, жалпы және жылжымалы азот, фосфор, калий, топырақ ерітіндісінің реакциясы, суда еритін тұздардың мөлшері мен иондық құрамы, сондай-ақ гранулометриялық құрамы анықталды. Топырақ реакциясы сілтілі (pH 7,6–8,5) тұздану деңгейі төмен. Гранулометриялық талдау терең қабаттарда ұсақ фракциялардың артуын анықтап, бұл жағдайдың су-ауа режиміне әсер ететінін көрсетті. Алынған нәтижелер өңірдегі жер ресурстарын және топырақты ұтымды пайдалану бойынша ғылыми негізделген ұсыныстар әзірлеуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: топырақ жамылғысы; топырақ кескіні; морфологиялық сипаттама; химиялық құрамы; гранулометриялық құрамы; қара қоңыр топырақ; кен орны; Дөң кен байыту комбинаты.

Анализ физико-химических свойств и гранулометрического состава почв Хромтауского региона

Алимураткызы Айтолкын, Муканова Гулжанат, Базарбаева Турсынкул, Шимшиков Батыргельды, Ошакбай Айту, Низамиев Абдурашит

Аннотация. В статье проанализированы физико-химические свойства и гранулометрический состав тёмно-каштановых почв Хромтауского региона. В качестве объектов исследования были выбраны территории, прилегающие к Донскому горно-обогатительному комбинату, участки вблизи терриконов, а также сельскохозяйственные угодья, используемые под пашню. Почвенные образцы были отобраны из различных глубинных горизонтов. Определялись объемная масса почвы, содержание гумуса, общий и подвижный азот, фосфор и калий, реакция почвенного раствора, содержание водорастворимых солей и их ионный состав, а также гранулометрический состав почвы. Установлено, что реакция почвенного раствора является щелочной (pH 7,6–8,5), при этом уровень засоления характеризуется как низкий. Гранулометрический анализ показал увеличение содержания мелких фракций в более глубоких слоях почвы, что оказывает влияние на водно-воздушный режим почв. Полученные результаты позволяют разработать научно обоснованные рекомендации по рациональному использованию почв и земельных ресурсов региона.

Ключевые слова: почвенный покров; почвенный разрез; морфологическая характеристика; химический состав; гранулометрический состав; тёмно-каштановая почва; месторождение; Донский горно-обогатительный комбинат.

МРНТИ 89.57.35
География
Научная статья

Мониторинг динамики береговой линии Каспийского моря по спутниковым данным высокого разрешения

Татьяна Дедова[1], Лариса Балакай[1], Нурия Баширова[1], Берик Искаков[1], Айбек Мерекеев[1]*, Гаухар Кайранбаева[2]

[1]Институт ионосферы, Алматы, Казахстан; dedova@ionos.kz, balakay@ionois.kz, bashyrova@ionos.kz, berikiskakov@ionos.kz, aibek.merekeyev@ionos.kz
[2]Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; gaukhar.kairanbayeva@kaznu.edu.kz
*Корреспонденция: aibek.merekeyev@ionos.kz

Аннотация: В статье представлены результаты комплексного мониторинга динамики береговой линии северо-восточной части Каспийского моря за период с 2017 по 2024 год. Исследование базируется на анализе спутниковых снимков высокого пространственного разрешения (PlanetScope) и данных многомиссионной альтиметрии (DAHITI). Применение автоматизированного алгоритма обработки космической съемки, включающего расчет спектральных индексов NDVI и NDWI для выделения границы «суша-вода» и последующую векторизацию береговой линии, позволило с высокой точностью зафиксировать масштабную регрессию моря, выраженную в сокращении площади водного зеркала исследуемой территории на 5 416 км² и падении его уровня на 1.2 м. Особое внимание уделено выявленной корреляции между гидрологическими показателями и морфометрическими изменениями побережья. Установлено, что средний коэффициент чувствительности площади к изменению уровня составляет 45.5 км²/см, при этом в 2024 году зафиксировано ускорение темпов осушения мелководных участков. Результаты работы подтверждают высокую эффективность совместного использования спутниковой альтиметрии и данных ДЗЗ высокого разрешения для получения достоверных количественных характеристик состояния акваторий в условиях интенсивных климатических изменений. Полученные данные могут быть использованы при планировании хозяйственной деятельности и разработке мер по адаптации прибрежных регионов к продолжающемуся падению уровня моря.

Ключевые слова: Каспийское море; береговая линия; снимки высокого разрешения PlanetScope; спутниковая альтиметрия; изменение уровня моря.

Цитирование: Дедова, Т., Балакай, Л., Баширова, Н., Искаков, Б., Мерекеев, А., Кайранбаева, Г. (2026). Мониторинг динамики береговой линии Каспийского моря по спутниковым данным высокого разрешения. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География, 155(2), 119-135. https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-119-135

Академический редактор: Н.Е. Рамазанова

Поступила: 20.04.2026
Исправлена: 22.05.2026
Принята: 7.06.2026
Опубликована: 30.06.2026

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. Введение

Каспийское море, являясь крупнейшим замкнутым водоемом планеты, представляет собой уникальный природный объект для исследования динамики береговой линии, обусловленной

комплексом гидрологических и климатических факторов, включая сток рек Волги, Урала и испарение (Akbari et al., 2020; Duan et al., 2025, Kostianoy et al., 2025). Главными составляющими приходной части водного баланса северной части моря выступает речной сток, где около 80% всего притока обеспечивает р. Волга, а вклад р. Урал составляет порядка 5% (De Mora et al., 2004). Регулирование русел данных рек водохранилищами приводит к долгосрочному перераспределению и снижению объемов паводкового стока. Однако основными причинами сокращения площади водного зеркала Каспийского моря выступают современные климатические изменения. Снижение атмосферных осадков наряду с ростом температуры приземного слоя воздуха и поверхностных вод обусловливает увеличение испарения с морской поверхности, что вкупе с изменением подземного стока приводит к нарушению равновесие внутриводоемного баланса (Samant & Prange, 2023). В последние десятилетия здесь фиксируется устойчивая тенденция к снижению уровня, что приводит к заметной перестройке береговой зоны (Chen et al., 2023). Из-за снижения уровня моря изменяются прибрежные экосистемы, включая дельтовые ландшафты и мелководные нерестовые зоны осетровых видов рыбы, сокращаются рыбные ресурсы и объемы рыболовства, а также возрастают риски для судоходства (Court et al., 2025). Наиболее отчетливо данные процессы проявляются в северо-восточной части акватории, где из-за крайне пологого рельефа дна и обширных мелководий даже незначительные изменения уровня приводят к смещению береговой линии на расстояния, достигающие нескольких километров (Akhmetov & Malakhov, 2026).

В подобных условиях возрастает потребность в методах мониторинга, способных обеспечивать как высокую точность, так и оперативность. Этим условиям отвечают методы дистанционного зондирования Земли, позволяющие получать регулярные и сопоставимые во времени оценки положения береговой линии. Для проведения космического мониторинга береговой линии в научных исследованиях активно используются растительный и водные спектральные индексы (Chowdhury & Yang, 2025; Xu, 2006), которые зарекомендовали себя как эффективные инструменты для выделения границы «суша-вода» и анализа ее изменений. Их применение подтверждено на различных типах водных объектов – от речных дельт до морских побережий (Christofi et al., 2025; Vos et al., 2023). В исследованиях, ориентированных на условия сложной прибрежной морфологии и мелководия Северного Каспия, показано, что среди водных индексов наибольшую эффективность демонстрирует модифицированный индекс MNDWI, обеспечивающий более надежное выделение водной поверхности по сравнению с классическими индексами за счет подавления сигнала от суши и техногенных объектов (Duan et al., 2025). В исследовании (Meirambek et al., 2024) проведена проверка адекватности методик дешифрирования береговой линии с использованием различных водных индексов (NDWI, NDMI, MNDWI, WRI, NDVI), которая показала наибольшую эффективность индекса MNDWI для выделения водной поверхности и анализа изменений прибрежных территорий Каспия. В работе, посвященной северо-восточной части Каспийского моря, методы обработки спутниковых снимков позволяют не только фиксировать текущее положение уреза воды, но и моделировать зоны потенциального затопления и осушения, что критически важно для оценки экологических рисков в этом мелководном регионе (Kamza et al., 2023).

Несмотря на широкое распространение данных дистанционного зондирования Земли, снимки со средним пространственным разрешением, такие как Landsat и Sentinel-2, не всегда позволяют корректно анализировать сложную конфигурацию берегов. В таких случаях применяются дополнительные подходы, направленные на достижение субпиксельной точности (Palomar-Vázquez et al., 2023). Это особенно актуально для участков с изрезанной линией побережья и наличием мелких островов или зон мелководья.

Существенный вклад в развитие методов мониторинга береговой линии связан с использованием данных высокого пространственного разрешения. В частности, спутниковая группировка PlanetScope обеспечивает регулярную съемку с разрешением порядка 3–5 м, что

позволяет значительно улучшить точность и детальность выделения границы «суша-вода». Такие данные все чаще применяются для изучения береговых процессов, включая оценку эрозии, аккумуляции и динамики мелководных зон, например, исследования Holzner et al., (2025); Tan et al. (2026).

В рамках настоящего исследования описываются результаты высокодетального мониторинга береговой линии Каспийского моря с использованием данных Planet Labs. Использование снимков данной группировки позволяет получить более детализированное представление береговой линии северо-восточной части Каспийского моря. Для повышения достоверности интерпретации полученных результатов дополнительно производится сопоставление с данными спутниковой альтиметрии (база DAHITI), что дает возможность связать геометрические характеристики береговой линии с абсолютными значениями уровня моря.

Цель исследования заключается в количественной оценке изменений береговой линии северо-восточной части Каспийского моря за период 2017–2024 гг, как наиболее динамично изменяющейся зоны. В рамках работы решаются задачи формирования многолетнего архива спутниковых изображений, их тематической обработки с использованием индексов NDVI и NDWI, последующей векторизации береговой линии и анализа ее пространственно-временной динамики, а также валидация полученных результатов с данными уровня моря.

Научная новизна исследования состоит в объединении данных высокодетализированной спутниковой съемки и спутниковой альтиметрии для анализа динамики береговой линии в условиях мелководной акватории. Практическая значимость исследования связана с возможностью использования полученных результатов для экологического мониторинга, оценки последствий снижения уровня Каспийского моря и разработки обоснованных решений в области управления прибрежными территориями.

2. Материалы и методы

2.1. Сбор изображений высокого пространственного разрешения исследуемой территории

В рамках исследования для мониторинга состояния побережья северо-восточной части Каспийского моря были использованы данные оптических спутников Planet Scope американской компания Planet Labs, специализирующейся на разработке и эксплуатации группировок малых спутников дистанционного зондирования Земли (Planet Labs, 2026). Для прибрежной акватории Каспийского моря применялись данные с пространственным разрешением изображений 3–5 м, при этом спектральный состав данных варьировался от 4 (2017–2021 гг.) до 8 (с 2022 г.) каналов в зависимости от года съемки, что обеспечивало возможность решения как стандартных задач дешифрирования, так и применения дополнительных спектральных индексов.

Выборка данных осуществлялась на основе строгих критериев качества. Основными параметрами фильтрации служили уровень облачности (не более 10–20 %), угол отклонения от надира, высота Солнца над горизонтом, что позволило минимизировать геометрические и атмосферные искажения. Для исследования отбирались продукты уровня обработки Surface Reflectance (Level 3B), прошедшие процедуру радиометрической калибровки, геометрической ортотрансформации и атмосферной коррекции. Предварительный визуальный контроль и анализ метаданных (Рисунок 1) позволили исключить снимки с дефектами изображения, обеспечив в последующем высокую достоверность векторизации береговой линии.

Ретроспективный анализ состояния береговой зоны Каспийского моря охватывал временной интервал с 2017 по 2024 год. Выбор данного временного интервала обусловлен доступностью спутниковых данных высокого пространственного разрешения с обеспечением стабильного покрытия исследуемой территории. Периодичность орбитальной съемки позволила сформировать репрезентативную выборку данных для весеннего, летнего и осеннего сезонов. Суммарный объем обработанной видеоинформации превысил 1,5 ТБ, что

объясняется значительным пространственным разрешением снимков, обширностью исследуемой акватории и длительностью мониторингового периода.

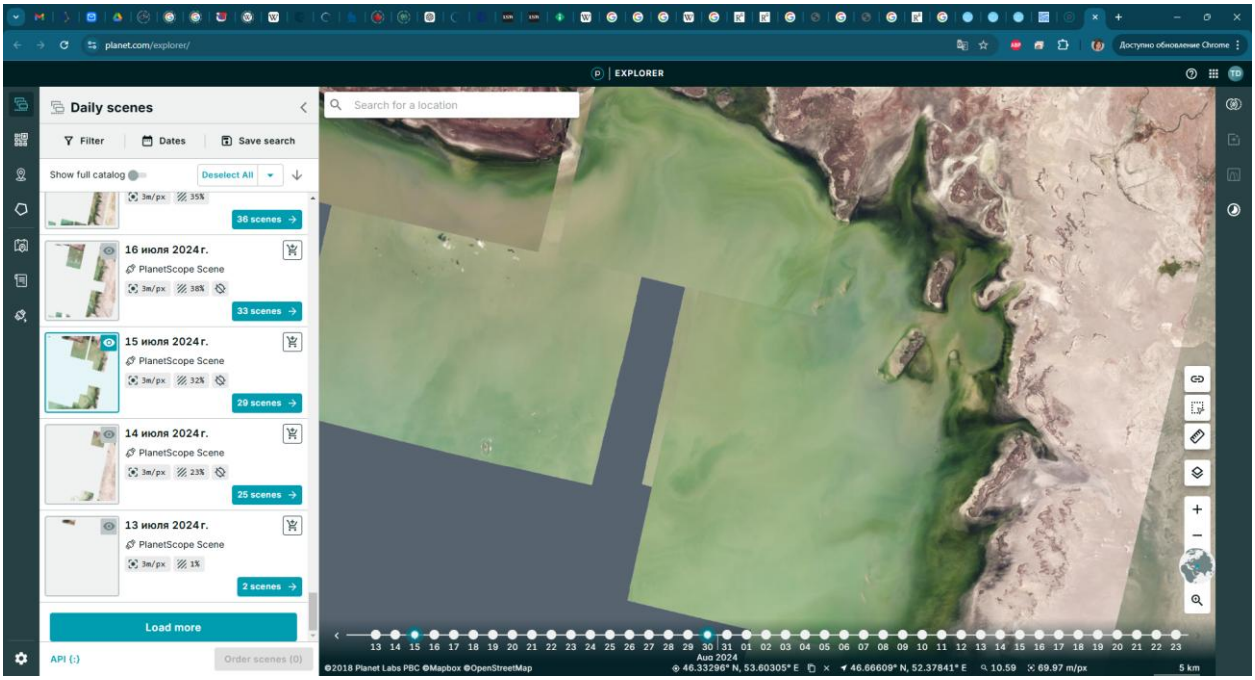


Рисунок 1. Интерфейс выбора сцен при формировании заказа

2.2. Тематическая обработка данных оптической съемки

Целью обработки оптических изображений высокого разрешения по данным орбитальной группировки Planet Scope для северо-восточной части Каспийского моря было получение береговой линии моря в векторном формате и построение ее динамики.

Метод построения береговой линии основывался на совместном использовании и анализе вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (NDVI Explained, 2026) и нормализованного разностного водного индекса NDWI (Normalized Difference Water Index) (NDWI, 2026) для выделения границы «суша-вода». Такой комбинированный подход позволяет одновременно исключить влияние растительности на прибрежной зоне и надежно определить границы водной поверхности.

Расчет индекса NDVI проводился по стандартной формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где NIR – отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне, RED – отражательная способность в красном спектральном диапазоне. Для обработки данных использовалось программное обеспечение SNAP. В частности:

- для данных Planet за 2017–2021 гг.: NDVI = (Band 4 - Band 3) / (Band 4 + Band 3),
- для данных Planet за 2022–2024 гг.: NDVI = (Band 8 - Band 6) / (Band 8 + Band 6).

Для выделения морской поверхности применялся пороговый диапазон значений NDVI от -0,2 до 0, что позволяло эффективно исключать участки суши и зоны растительного покрова.

Параллельно рассчитывался нормализованный разностный водный индекс NDWI, основанный на различии в отражении излучения в ближнем инфракрасном (NIR) и зеленом (Green) диапазонах. Он позволяет выявлять даже незначительные изменения содержания воды в водоемах и прибрежной зоне. NDWI вычислялся по формуле:

NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR), (2)

где Green – отражательная способность в зеленом спектральном диапазоне, NIR – отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне, при этом:

- для данных Planet 2017–2021 гг.: NDWI = (Band 2 - Band 4) / (Band 2 + Band 4),
- для данных Planet 2022–2024 гг.: NDWI = (Band 3 - Band 8) / (Band 3 + Band 8).

В отличие от NDVI, где применялись отрицательные пороговые значения, для NDWI использовались положительные значения (более 0,2), надежно характеризующие поверхность воды.

Этапы обработки снимков для получения береговой линии схематически представлены на рисунке 2. На первом этапе использовались исходные оптические изображения высокого пространственного разрешения. Затем рассчитывались индексы NDVI и NDWI, которые визуализировались в виде растровых карт, отражающих распределение растительности и водных поверхностей. Полученные растровые слои конвертировались в линейные объекты в соответствии с пороговыми значениями индексов. После этого проводилась фильтрация линий по значениям, наиболее четко отражающим границу «суша-вода». Такой подход обеспечивает более высокую точность выделения береговой линии, особенно в мелководной северо-восточной части Каспийского моря, подверженной сезонным колебаниям уровня воды и сгонно-нагонным явлениям.

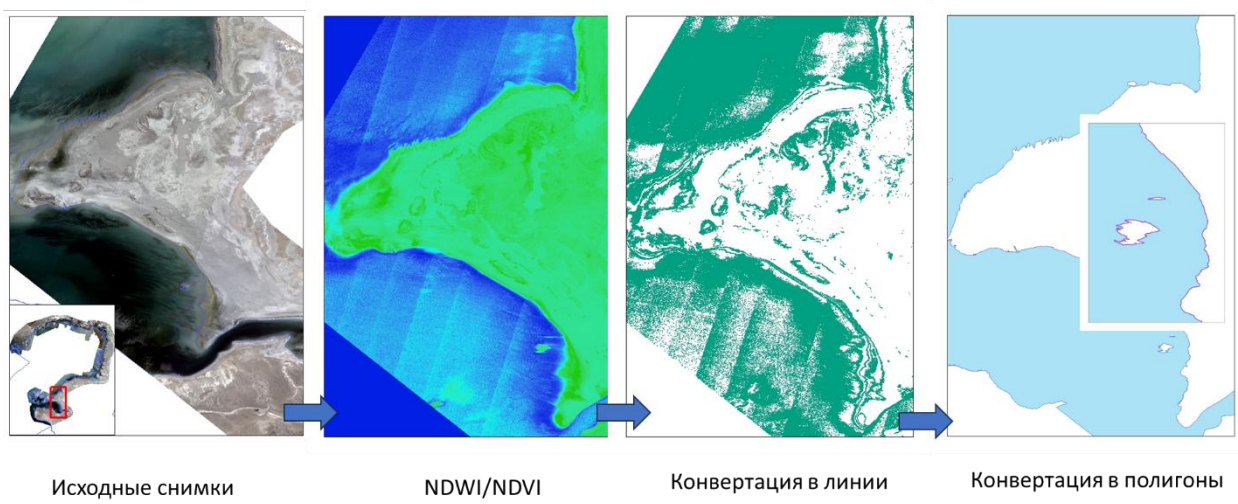


Рисунок 2. Этапы обработки снимков для получения береговой линии

Далее отфильтрованные линии подвергались дополнительной ручной обработке в среде ArcGIS. На данном этапе выполнялось несколько последовательных операций. В первую очередь проводилась оптимизация количества вершин, так как первичная линия, полученная из растровых данных, содержала избыточное количество вершин, что осложняло дальнейший анализ. Для ее упрощения применялся инструмент Simplify Line. Дополнительно также использовался инструмент Smooth Line для сглаживания контуров и устранения «ступенчатости», возникающей при векторизации по пиксельной сетке.

Следующим этапом было устранение топологических ошибок через инструмент Topology, когда проверялись и исправлялись ошибки типа «самопересечения», «разрывы» и «дублирующиеся линии». Лишние артефакты, такие как короткие несвязанные линии, удалялись с использованием выборки по длине объектов.

Далее на основе корректированных линейных объектов выполнялось построение полигонов с помощью инструмента Feature to Polygon. Кроме полигона морской поверхности, дополнительно формировался отдельный слой прибрежных островов для обеспечения

целостного представления береговой зоны. Далее проводилась корректировка морской поверхности с учетом островов. Другими словами, чтобы морской полигон имел правильную геометрию (с «дырками» вместо островов), полигоны островов «вырезались» из полигона «моря» с использованием операция Delite или Clip. В итоге создавалось корректное топологическое представление акватории, где острова являются пустотами внутри основного полигона. Такой подход обеспечил получение высокоточной и единообразной береговой линии северо-восточной части Каспийского моря для всего исследуемого периода. На заключительном этапе осуществлялась проверка корректности геометрии и топологии полигонального слоя и устранение возможных дефектов.

2.3. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря

Для мониторинга и количественной оценки динамики уровня Каспийского моря в настоящем исследовании применялись методы многомиссионной спутниковой альтиметрии. Основным источником информации послужила база данных Database for Hydrological Time Series of Inland Waters (DAHITI), разработанная Немецким геодезическим исследовательским институтом (DGFI-TUM) (Schwatke et al., 2015), которая обеспечивает получение временных рядов уровня воды для внутренних водоемов по всему миру, включая Каспийское море (*Welcome to DAHITI*, 2026).

Исследование базируется на непрерывном массиве данных, охватывающем период с 1992 по 2025 гг. Формирование временных рядов обеспечивалось за счет использования данных ряда последовательных миссий, начиная с первой океанографической платформы TOPEX/Poseidon (1992–2002). Преемственность наблюдений и стабильность параметров точности в последующие десятилетия поддерживались спутниковой серией Jason (миссии Jason-1, Jason-2 и Jason-3), функционирующей на идентичных орбитах. Современный этап наблюдений дополнен данными спутника Sentinel-6 Michael Freilich, оснащенного системой альтиметра и радиометра для достижения высокого пространственного и временного разрешения.

Методология обработки данных в системе DAHITI включает тщательную многомиссионную гармонизацию, направленную на создание однородного продукта. Процесс обработки подразумевает унификацию вертикальной привязки всех измерений и внесение необходимых геофизических коррекций, включая учет задержки сигнала в тропосфере и ионосфере. В качестве целевой высотной системы используются нормальные высоты, получаемые путем преобразования эллипсоидальных высот спутниковой альтиметрии с использованием модели квази-геоида EIGEN6c3stat, основанной на геоиде EGM2008 и дополненной данными миссии GOCE. Для обеспечения сопоставимости результатов различных миссий производится устранение межспутниковых смещений, а для подавления шума и фильтрации аномальных выбросов применяются специализированные алгоритмы, в том числе фильтр Калмана. Применение описанного комплекса процедур позволило сформировать непрерывный и достоверный временной ряд с точностью до нескольких сантиметров, что создало необходимую базу для последующего сопоставления гидрологических параметров с данными дистанционного зондирования береговой линии.

3. Результаты

3.1. Динамика береговой линии северо-восточной части Каспийского моря

Векторизация контуров береговой линии северо-восточной части Каспийского моря выполнялась по материалам летней космической съемки с преимущественным охватом периода июль-август. Временной выбор летнего сезона обусловлен тем, что в этот период уровень моря находится вблизи годового максимума и влияние сезонных колебаний выражено наиболее четко. Рисунок 3 демонстрирует полученные векторные карты северо-восточной части Каспийского моря, на которых четко прослеживается тенденция уменьшения водной поверхности.

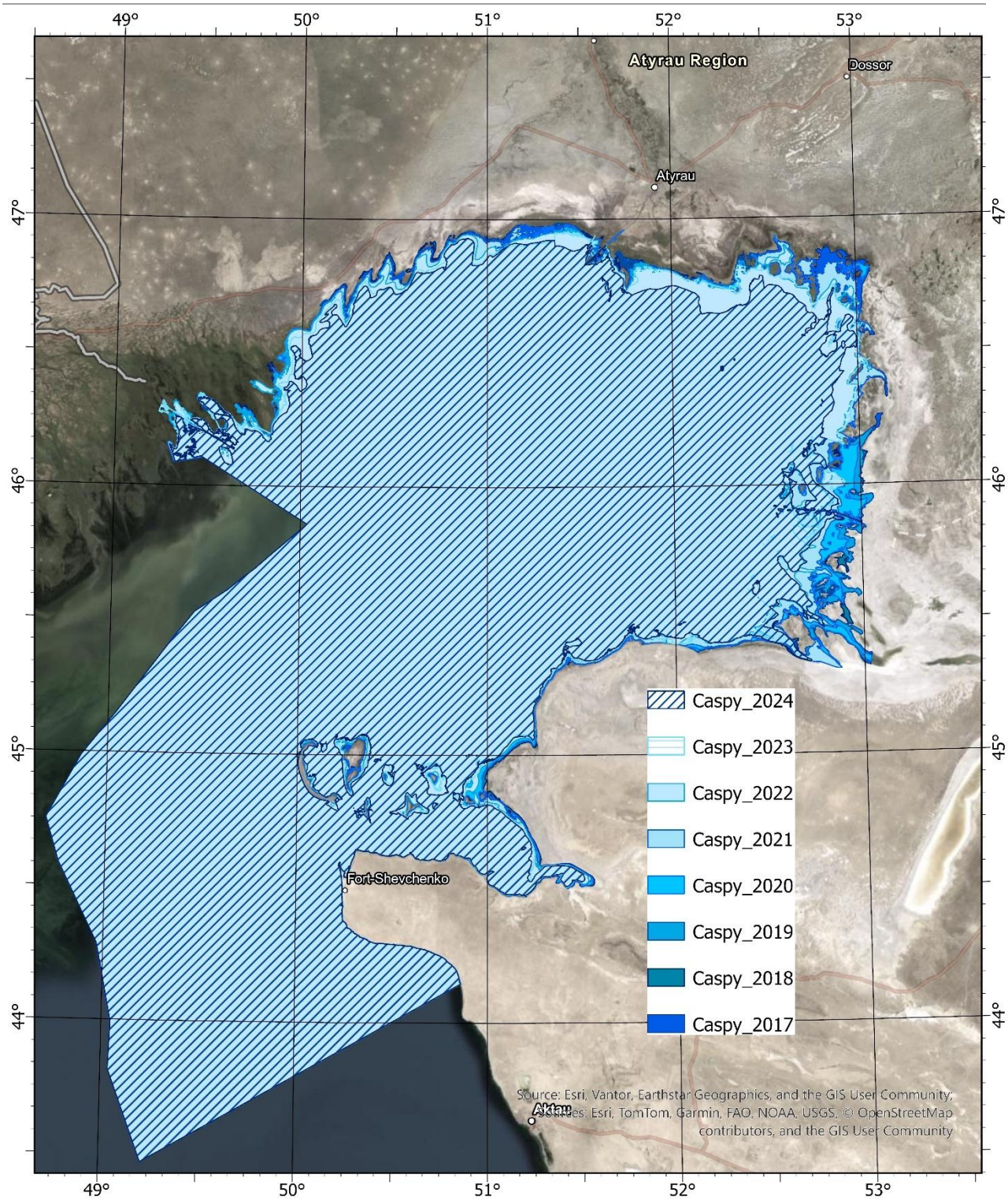


Рисунок 3. Динамика береговой линии северо-восточной части Каспийского моря

Суммарная протяженность векторизованной береговой линии составляет около 3700 км. Рисунок 4 иллюстрирует изменения береговой линии Каспийского моря в районе дельты реки Урал в период с 2017 по 2024 гг. Представленные изображения наглядно демонстрируют ежегодный отход береговой линии, связанный с понижением уровня моря. В прибрежной зоне фиксируется сокращение площади водной поверхности и трансформация контуров береговой линии. Отчетливо прослеживается процесс формирования новых островов. Сравнение крайних временных отметок показывает существенные изменения: если в 2017 г. береговая

линия проходила значительно ближе к устью реки, и акватория занимала обширные прибрежные площади, то к 2024 г. наблюдается ее смещение в сторону моря, при этом в некоторых местах до 8 км. На месте бывшей акватории образовались участки новой суши, что изменило морфологию дельты. Выявленные изменения указывают на высокую динамичность прибрежных процессов в районе дельты Урала, где сочетание колебаний уровня моря и локальных гидроморфологических условий приводит к значительной перестройке береговой зоны.

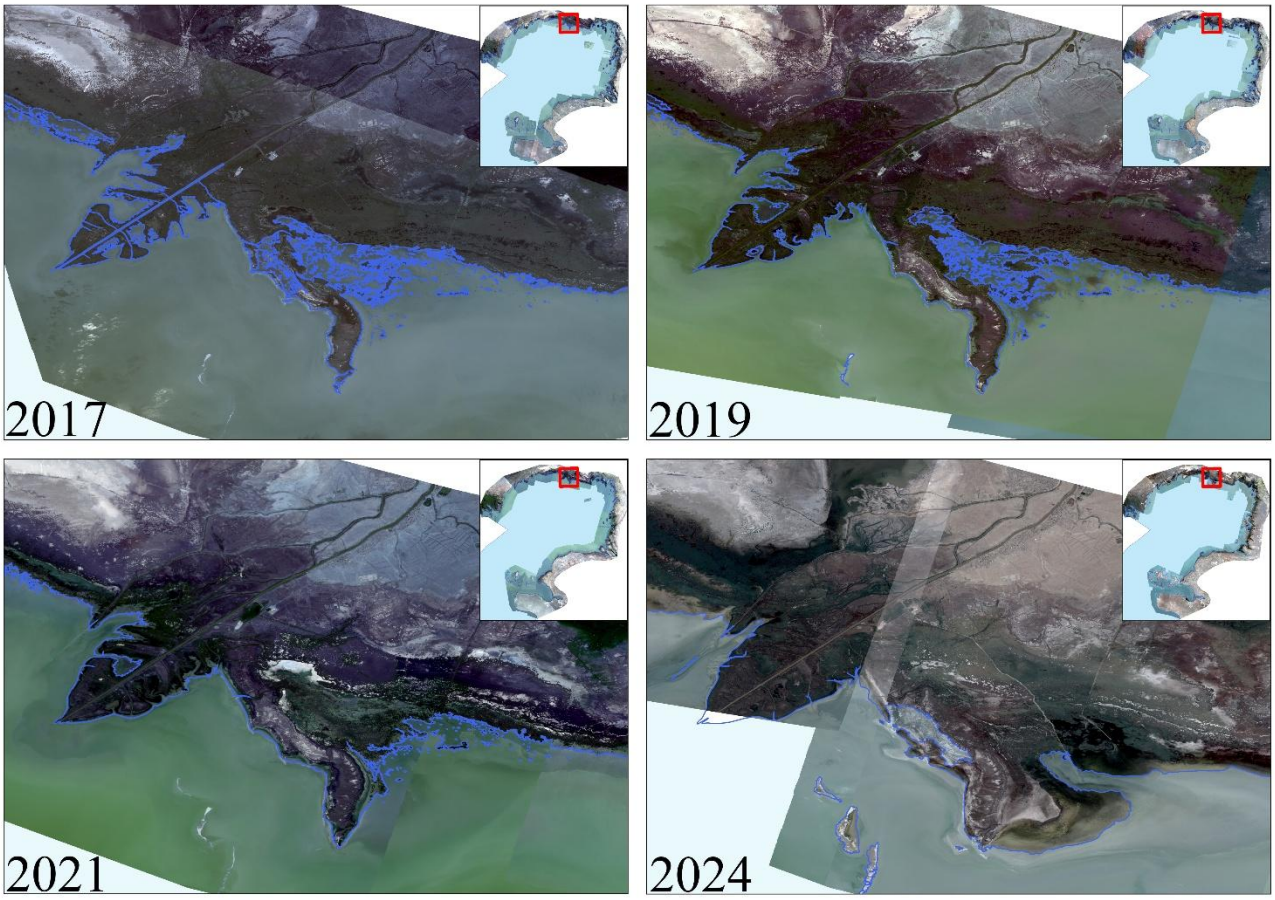


Рисунок 4. Оцифрованная береговая линия Каспийского моря в районе дельты р. Урал

Схожая ситуация фиксируется и в районе Тюленьих островов (см. Рисунок 5). Анализ многолетних спутниковых данных показывает, что год от года здесь происходит увеличение площади суши за счет осушения прилегающих мелководий и формирования новых участков островной территории Особенно наглядно этот процесс проявляется в динамике общей площади архипелага: если в 2017 г. она составляла около 201 км², то к 2024 г. возросла более чем втрое, достигнув 668 км². Рост площади объясняется не только расширением контуров существующих островов, но и появлением новых участков суши, которые постепенно сливаются с основной островной группой. Таким образом, архипелаг Тюленьих островов претерпевает локальную трансформацию, связанную с падением уровня Каспия.

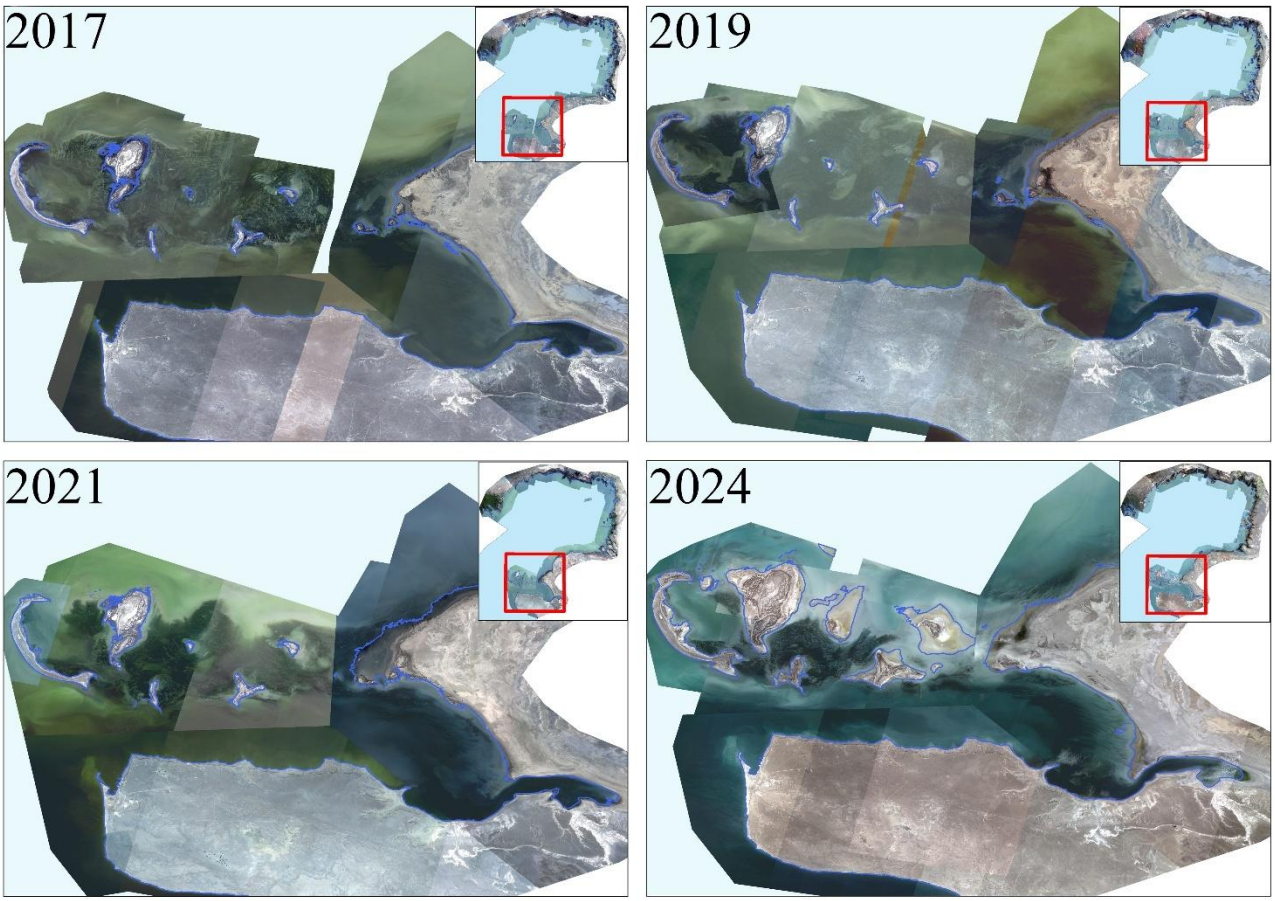


Рисунок 5. Оцифрованная береговая линия Каспийского моря в районе дельты р. Урал

3.2. Анализ данных спутниковой альтиметрии Каспийского моря

В ходе проведенного анализа был получен непрерывный временной ряд среднего уровня Каспийского моря, характеризующийся высокой точностью (в пределах нескольких сантиметров) и временным шагом в 10 дней, соответствующим орбитальным циклам аппаратов Jason и Sentinel-6. Общая динамика изменения уровня Каспийского моря за период с 1992 по 2025 год наглядно отражена на графике, совмещающем фактические измерения и полиномиальную линию тренда (см. Рисунок 6).

Использование спутниковой альтиметрии позволило детально отследить долгосрочные тренды и краткосрочные колебания уровня моря, обусловленные гидрометеорологическими процессами, вне зависимости от сложности доступа к отдельным участкам акватории. На момент начала инструментальных наблюдений в декабре 1992 года средний уровень моря находился на отметке -26,56 м. К началу 2025 года зафиксировано его снижение до -28,83 м, что свидетельствует о суммарном падении уровня на 2,26 м за этот период при средней скорости около 7 см в год. Процесс снижения носил неравномерный характер: после фазы относительной стабильности в первой половине 1990-х годов последовал период умеренного падения, сменившийся в последние 15 лет фазой ускоренного понижения.

Сезонный цикл колебаний уровня моря демонстрирует устойчивую повторяемость с достижением минимумов в зимний период и максимумов в летние месяцы. Эта закономерность отражает гидрологический баланс: летний пик формируется за счет весеннего половодья и максимального речного стока, в то время как осенне-зимнее сокращение притока ведет к достижению минимальных отметок. Статистический анализ повторяемости экстремумов показал, что минимальный уровень в 75 % случаев приходится на декабрь и январь. Большинство максимумов (29 из 31 года наблюдений) зафиксировано в июне и июле.

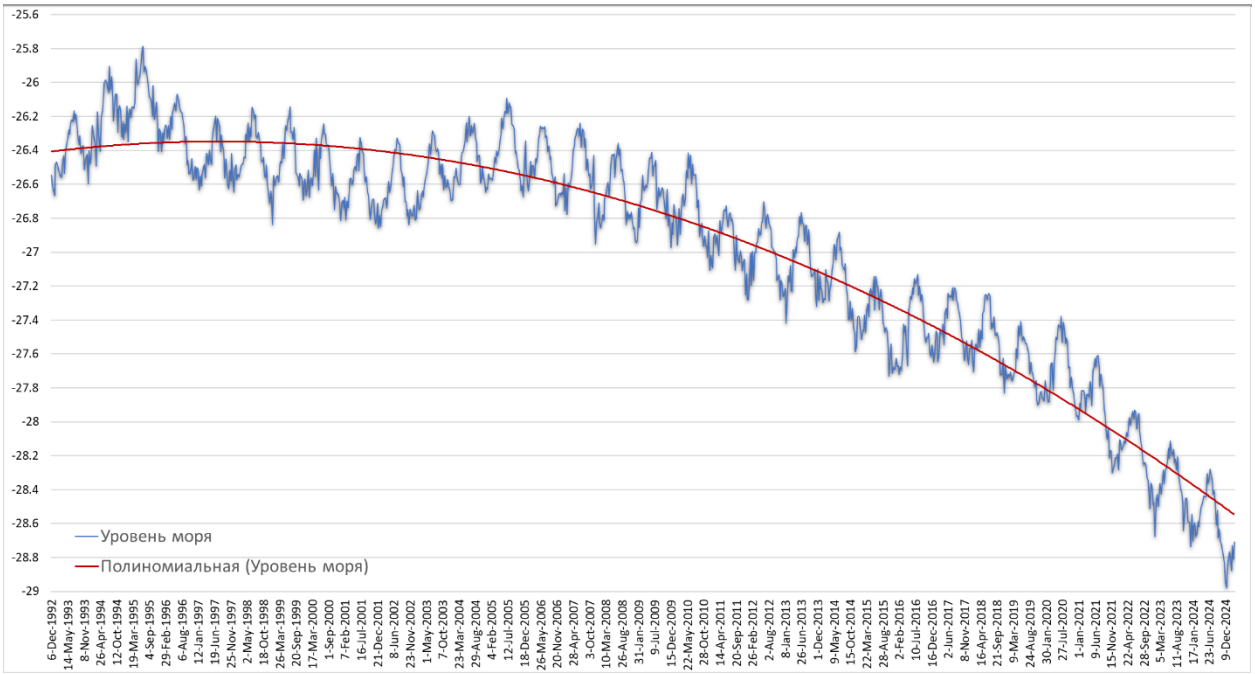


Рисунок 6. Средний уровень Каспийского моря с 1992 по 2025 год по данным спутниковой альтиметрии

3.3. Сопоставление с данными спутниковой альтиметрии

Количественная оценка данных дистанционного зондирования земли и спутниковой альтиметрии позволил выявить прямую корреляцию между падением уровня моря и сокращением площади его водного зеркала в северо-восточной части. Проведенный анализ за период с 2017 по 2024 год подтверждает устойчивую деградацию акватории, в ходе которой абсолютная отметка уровня снизилась с -7,28 м до -28,48 м (см. Таблица 1). Суммарное падение составило 1,2 м всего за семь лет наблюдений, при этом наиболее критическое снижение зафиксировано в интервале между 2023 и 2024 годами, когда уровень опустился на рекордные 32 см.

Таблица 1. Динамика морфометрических показателей северо-восточной части Каспийского моря и данных спутниковой альтиметрии за 2017–2024 гг.

Год	Площадь морской поверхности, км²	Δ площади, по сравнению с последующим годом, км²	Ближайшая дата альтиметирических данных	Уровень моря, м, нормальные высоты DAHITI	Δ уровня моря на моменты фиксации береговой линии, м
2024	62 040,42		22-Aug-2024	-28,48	
2023	63 538,26	1 497,84	12-Jul-2023	-28,16	0,32
2022	64 465,40	927,14	11-Jul-2022	-27,94	0,22
2021	65 948,87	1 483,47	28-Jul-2021	-27,79	0,15
2020	66 792,02	843,15	25-Aug-2020	-27,54	0,25
2019	66 992,94	200,92	15-Aug-2019	-27,60	-0,06

2018	67 145,69	152,75	23-Aug-2018	-27,38	0,22
2017	67 456,36	310,67	21-Aug-2017	-27,28	0,10

Динамика площади водной поверхности демонстрирует соразмерный масштаб потерь акватории, которая сократилась с 67 456,36 км² до 62 040,42 км². Общая площадь осушенного дна в северо-восточном Каспии за рассматриваемый период составила около 5 416 км². Максимальная интенсивность отступания воды наблюдалась в 2024 году, когда в полном соответствии с аномальным падением уровня моря площадь зеркала уменьшилась сразу на 1 497,84 км² за один год.

Особое внимание в структуре данных заслуживает период 2019–2020 годов, который выступает в качестве значимой гидрологической аномалии. В это время по данным альтиметрии был зафиксирован кратковременный подъем уровня на 6 см, однако площадь водного зеркала вопреки общему тренду сократилась еще на 200,92 км².

Визуальное сопоставление полученных береговых линий и уровня моря также подтверждает не всегда линейный отход береговых линии вглубь акватории. В ряде случаев, например, в линии 2020 и 2019 гг.: фиксируется как прямая, так и противоположная реакция контура суши на изменение абсолютных отметок уровня воды (Рисунок 7). Данное расхождение служит доказательством того, что фактическое положение береговой линии в мелководном северо-восточном Каспии определяется не только глобальными изменениями уровня, но и локальными факторами, такими как ветровые нагонные явления и процессы перераспределения донных осадков.

Количественный анализ всей совокупности данных показал, что средний коэффициент чувствительности площади моря к изменению его уровня составил около 45,5 км² на 1 см понижения, однако в 2024 году этот показатель возрос до 47,9 км²/см, что указывает на выход моря на предельно пологие участки батиметрии, где даже незначительные колебания уровня приводят к масштабному осушению побережья.

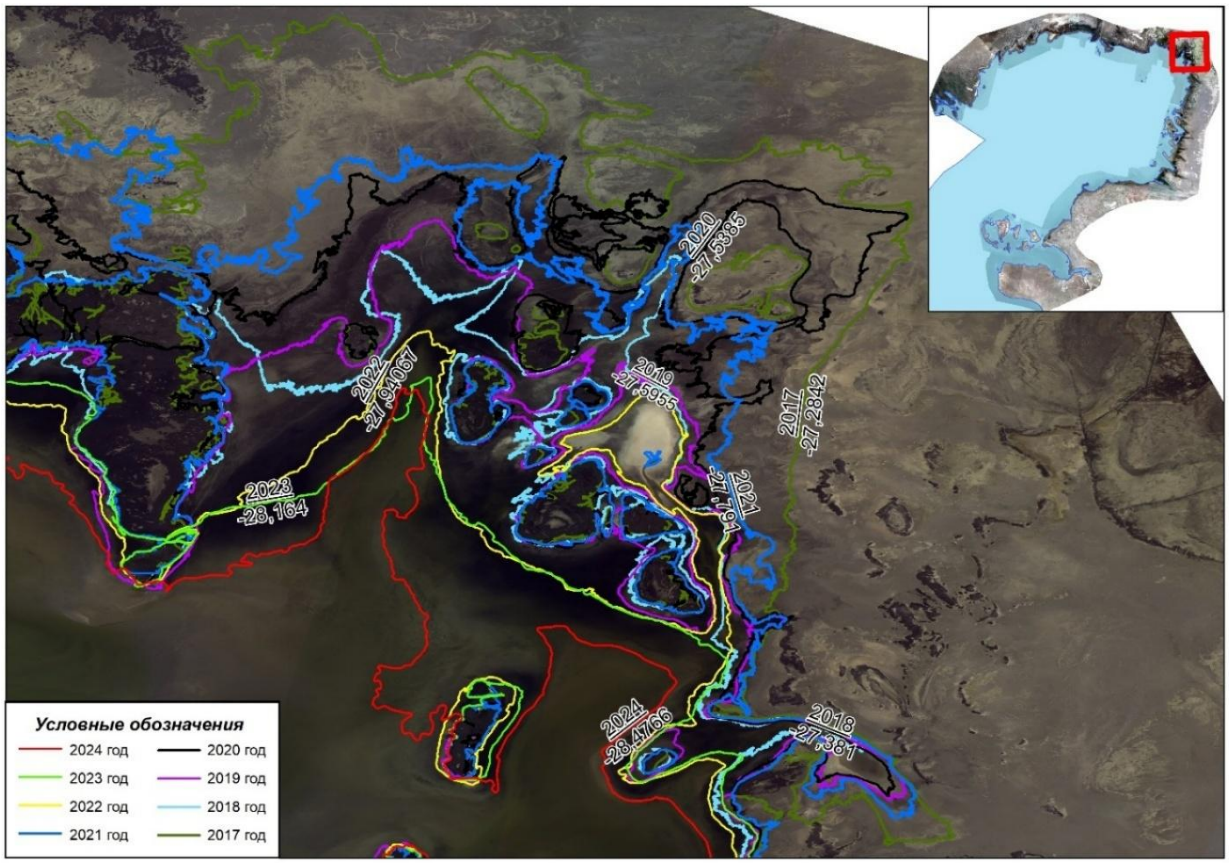


Рисунок 7. Сопоставление береговых линий по снимкам Planet и уровня Каспийского моря по спутниковой альтиметрии

4. Обсуждение

График зависимости уровня Каспийского моря от его площади, представленный на рисунке 8, также подтверждает наличие прямой корреляции, при которой сокращение площади водного зеркала сопровождается закономерным снижением абсолютных отметок уровня. Основная часть данных за период с 2017 по 2024 год выстраивается в четкую линию, отражающую глобальный процесс регрессии моря. Состояние акватории на август 2024 года отражено крайней левой точкой графика, соответствующей минимальному зафиксированному уровню -28,48 м при площади 62 040,42 км². Переход от значений 2023 года к показателям 2024 года характеризуется наиболее крутым наклоном кривой, что визуализирует резкое ускорение темпов падения уровня моря на 32 см всего за один год.

В правой верхней части графика зафиксирована характерная «петля» или излом в районе отметок -27,54 м и -27,6 м. Данный участок иллюстрирует гидрологическую аномалию 2019–2020 годов, когда при кратковременном подъеме уровня на 6 см площадь водного зеркала вопреки общей тенденции продолжила сокращаться, снизившись с 66 992,94 км² до 66 792,02 км². Наличие этого зигзага на графике служит математическим доказательством того, что в условиях экстремального мелководья связь между уровнем и площадью может искажаться под влиянием локальных геоморфологических процессов или ветрового режима. Общий наклон представленной кривой демонстрирует исключительную чувствительность северо-восточной части Каспия, где даже незначительные колебания уровня приводят к масштабному осушению территорий, исчисляемому сотнями квадратных километров.

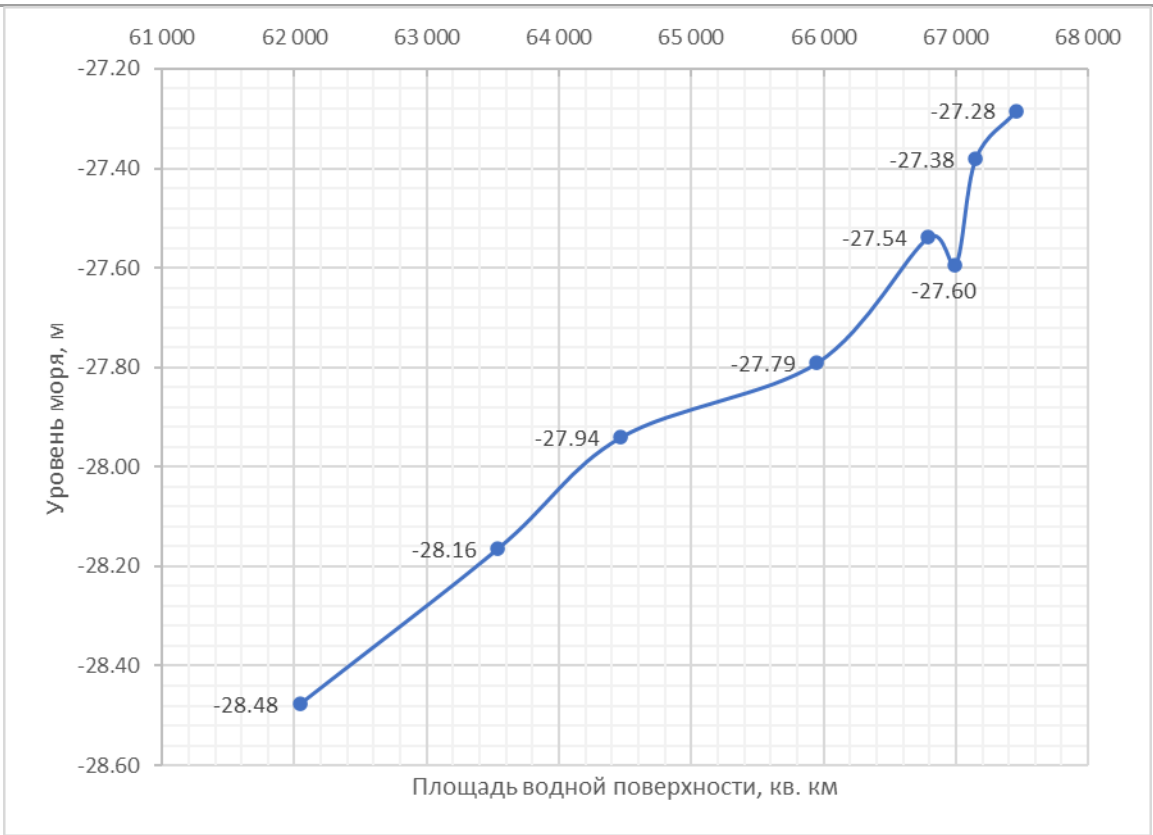


Рисунок 8. График зависимости площади северо-восточной части водного зеркала от уровня Каспийского моря в период с 2017 по 2024 год

Полученные результаты согласуются с современными представлениями о продолжающейся климатически обусловленной регрессии Каспийского моря. На фоне еще большей аридизации региона, включающей снижение атмосферных осадков, повышение температуры воздуха, увеличение испарения с морской поверхности, происходит нарушение водного баланса Каспия и дальнейшее снижение его уровня. В сочетании с уменьшением речного стока это способствует ускоренному осушению мелководных прибрежных зон, чувствительных к даже незначительным колебаниям уровня воды.

Использование данных высокого пространственного разрешения позволило выявить детальные морфологические изменения береговой зоны, включая формирование новых островов, трансформацию дельтовых участков и перераспределение мелководных зон, которые не всегда корректно фиксируются по данным среднего разрешения. Это подчеркивает значимость применения спутниковой съемки высокого пространственного разрешения для мониторинга подобных динамичных природных систем.

Отмеченные расхождения между изменениями уровня моря и положением береговой линии в отдельные периоды свидетельствуют о существенном влиянии локальных факторов, таких как ветровые нагоны, перераспределение донных отложений и сезонная гидродинамика. Это указывает на необходимость комплексного подхода, объединяющего данные дистанционного зондирования, альтиметрии и наземных наблюдений.

5. Заключение

В работе выполнена оценка изменений береговой линии северо-восточной части Каспийского моря за период 2017–2024 гг. на основе данных спутниковой съёмки высокого пространственного разрешения и спутниковой альтиметрии. Применение детализированных оптических данных позволило зафиксировать трансформации береговой зоны, включая формирование новых участков суши и изменение морфологии дельтовых областей.

Полученные результаты свидетельствуют о выраженной тенденции снижения уровня моря, сопровождающейся сокращением площади водной поверхности и смещением береговой линии на расстояния до нескольких километров. За рассматриваемый период уровень моря снизился на 1,2 м, что сопровождалось уменьшением площади акватории более чем на 5400 км². Установлена высокая чувствительность площади водной поверхности к изменениям уровня моря, составляющая в среднем около 45,5 км² на 1 см понижения в пределах исследуемой акватории, что обусловлено мелководным характером региона. Показано, что зависимость между уровнем моря и положением береговой линии является нелинейной и пространственно неоднородной и определяется влиянием локальных гидрометеорологических и морфодинамических факторов.

Полученные результаты могут быть использованы для задач экологического мониторинга, оценки последствий снижения уровня Каспийского моря и разработки мер адаптации при управлении прибрежными территориями.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация - Т.Д., Л.Б.; методология - Т.Д.; программное обеспечение - А.М.; валидация - Л.Б., Н.Б., Г.К.; формальный анализ - Г.К.; исследование - Т.Д.; ресурсы - Н.Б.; курирование данных - А.М.; написание - подготовка оригинального черновика - А.М.; написание - рецензирование и редактирование - Т.Д., Л.Б.; визуализация - Н.Б.; руководство - Б.И.; администрирование проекта - Б.И; получение финансирования - Б.И. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Дедова, Татьяна – заведующая лабораторией, ТОО «Институт ионосферы», СТ «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020; dedova@ionos.kz, https://orcid.org/0000-0001-5310-6931

Балакай, Лариса – ведущий научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы»,СТ «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020; balakay@ionos.kz, https://orcid.org/0000-0001-6660-4796

Баширова, Нурия – старший научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы», СТ «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020; bashyrova@ionos.kz, https://orcid.org/0009-0001-9235-1048

Искаков, Берик –заместитель директора по НИР, ТОО «Институт ионосферы», СТ «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020; berikiskakov@ionos.kz, https://orcid.org/0000-0002-8968-9531

Мерекеев, Айбек – старший научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы», СТ «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020; aibek.merekeyev@ionos.kz, https://orcid.org/0000-0002-9227-4695

Кайранбаева, Гаухар – старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; gaukhar.kairanbayeva@kaznu.edu.kz, https://orcid.org/0000-0002-0250-3184

9. Финансирование: Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR24992964 «Разработка интегрированных энергосберегающих технологий для развития экологической устойчивости и эффективности морских операций в казахстанском секторе Каспийского моря»)

10. Благодарности: нет.

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

12. Список литературы

1. Akbari, M., Baubekova, A., Roozbahani, A., Gafurov, A., Shiklomanov, A., Rasouli, K., Ivkina, N., Kløve, B., & Haghighi, A. T. (2020). Vulnerability of the Caspian Sea shoreline to changes in hydrology and climate. *Environmental Research Letters*, 15(11). https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaad8
2. Akhmetov, S., & Malakhov, D. (2026). Analysis of shoreline changes in the Kazakhstan sector of the Caspian Sea based on remote sensing data in the context of their impact on coastal ecosystems (Analiz izmeneniya beregovoy linii kazakhstanskogo sektora Kaspiyskogo morya na osnove dannykh distantsionnykh sredstv izmereniy v kontekste ikh vliyaniya na ekosistemu pribrezhnoy zony in Russian). *Journal of Ecology and Sustainability*, 154(1), 7–26. https://doi.org/10.32523/8gwpt
3. Chen, J., Cazenave, A., Wang, S. Y., & Li, J. (2023). Caspian Sea level change observed by satellite altimetry. *Remote Sensing*, 15(3). https://doi.org/10.3390/rs15030703
4. Chowdhury, S. J. K., & Yang, C. S. (2025). A study on the coastline extraction and coastal change analysis using sentinel-2 imagery in Funafuti, Tuvalu. *Remote Sensing*, 17(16). https://doi.org/10.3390/rs17162794
5. Christofi, D., Mettas, C., Evagorou, E., Stylianou, N., Eliades, M., Theocharidis, C., Chatzipavlis, A., Hasiotis, T., & Hadjimitsis, D. (2025). A review of open remote sensing data with GIS, AI, and UAV support for shoreline detection and coastal erosion monitoring. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 15, Number 9). https://doi.org/10.3390/app15094771
6. Court, R., Lattuada, M., Shumeyko, N., Baimukanov, M., Eybatov, T., Kaidarova, A., Mamedov, E. V., Rustamov, E., Tasmagambetova, A., Prange, M., Wilke, T., Hassall, C., & Goodman, S. J. (2025). Rapid decline of the Caspian Sea level threatens ecosystem integrity, biodiversity protection, and human infrastructure. *Communications Earth and Environment*, 6(1). https://doi.org/10.1038/s43247-025-02212-5
7. De Mora, S., Sheikholeslami, M. R., Wyse, E., Azemard, S., & Cassi, R. (2004). An assessment of metal contamination in coastal sediments of the Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 48(1–2). https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00285-6
8. Duan, Z., Wang, G., Hu, J., Yu, T., Chen, S., Zhang, Y., Wang, Y., Liu, H., Zhao, X., & Chen, H. (2025). Spatiotemporal dynamics of northern Caspian shorelines (1985–2023) and implications for coastal management: Lessons from the Aral Sea. *PLOS ONE*, 20. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0325546
9. Holzner, J., Strunz, G., Martinis, S., & Plank, S. (2025). Analyzing coastal dynamics by means of multi-sensor satellite imagery at the East Frisian Island of Langeoog, Germany. *Scientific Reports*, 15(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-91306-3
10. Ivkina, N., Terekhov, A., & Naurozbayeva, Z. (2015). Caspian Sea level fluctuations and assessment of contemporary shoreline changes using landsat satellite data for the period 2005–2015 (Kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya i diagnostika sovremennykh izmeneniy polozheniya beregovoy linii po sputnikovym dannym Landsat perioda 2005–2015 godov in Russian). *Hydrometeorology and Ecology*, 2, 89–99. https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/259
11. Kamza, A. T., Kuznetsova, I. A., & Levin, E. L. (2023). Prediction of the flooding area of the northeastern Caspian Sea from satellite images. *Geodesy and Geodynamics*, 14(2). https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.08.003
12. Meirambek, G., Rakhimbaeva, D. Zh., Rysbekov, K. B., & Erzhanqyzy, A. (2024). Monitoring of Caspian Sea shoreline changes using water index methods based on geospatial data (Monitoring izmeneniya beregovoy linii Kaspiyskogo morya metodom vodnogo indeksirovaniya na osnove geoprostvennykh dannykh in Russian). *Gornyy Zhurnal Kazakhstana*, 11, 23–31. https://minmag.kz/wp-content/uploads/2024/12/2411_23-31.pdf

13. NDVI Explained. (2026). https://eos.com/blog/normalized-difference-vegetation-index-or-ndvi/
14. NDWI. (2026). https://eos.com/ru/make-an-analysis/ndwi/
15. Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., & Palomar-Vázquez, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.024
16. Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., & Cabezas-Rabadán, C. (2023). Shoreline analysis and extraction tool (SAET): a new tool for the automatic extraction of satellite-derived shorelines with subpixel accuracy. *Remote Sensing*, 15(12). https://doi.org/10.3390/rs15123198
17. *Planet Labs*. (2026). https://www.planet.com/
18. Samant, R., & Prange, M. (2023). Climate-driven 21st-century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. *Communications Earth and Environment*, 4(1). https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8
19. Safarov, E., Safarov, S., & Bayramov, E. (2024). Changes in the hydrological regime of the Volga River and their influence on Caspian Sea level fluctuations. *Water* (Switzerland), 16(12). https://doi.org/10.3390/w16121744
20. 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). https://doi.org/10.5194/hess-19-4345-2015
21. Tan, B., Cooper, H., Bartley, M. L. F., Johnson, C., Fagherazzi, S., & Fichot, C. G. (2026). Monitoring coastal shoreline change using PlanetScope imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 334. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2026.109783
22. Vos, K., Splinter, K. D., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Kras, E. C., Luijendijk, A. P., Calkoen, F., Almeida, L. P., Pais, D., Klein, A. H. F., Mao, Y., Harris, D., Castelle, B., Buscombe, D., & Vitousek, S. (2023). Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. *Communications Earth and Environment*, 4(1). https://doi.org/10.1038/s43247-023-01001-2
23. Vyruchalkina, T. Yu., Diansky, N., & Fomin, V. V. (2020). The Influence of Long-Term Changes in Wind Regime over the Caspian Region on the Evolution of Caspian Sea Level during 1948–2017 (Vliyanie na evolyutsiyu urovnya Kaspiyskogo morya mnogoletnikh izmeneniy rezhima vetra nad ego regionom v 1948–2017 gg.). *Water Resources*, 47(2), 230–240. https://doi.org/10.31857/s0321059620020194
24. *Welcome to DAHITI*. (2026). https://dahiti.dgfi.tum.de/en/
25. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14). https://doi.org/10.1080/01431160600589179

Жоғары дәлдікті спутниктік деректер негізінде Каспий теңізінің жағалау сызығы динамикасының мониторингі

Татьяна Дедова, Лариса Балакай, Нурия Баширова, Берик Искаков, Айбек Мерекеев, Гаухар Кайранбаева

Аңдатпа: Бұл мақалада 2017 жылдан 2024 жылға дейін Каспий теңізінің солтүстік-шығысындағы жағалау сызығының динамикасын кешенді бақылау нәтижелері ұсынылған. Зерттеу жоғары ажыратымдылықтағы спутниктік суреттерді (PlanetScope) және көп миссиялы альтиметриялық деректерді (DAHITI) талдауға негізделген. Құрлық–су шекарасын және жағалау сызығының векторизациясын анықтау үшін NDVI және NDWI спектрлік индекстерін есептеуді қоса алғанда, автоматтандырылған спутниктік суреттерді өңдеу алгоритмін

пайдалану зерттеу аймағының су бетінің ауданының 5 416 км²-ге азаюы және оның деңгейінің 1,19 м-ге төмендеуі ретінде көрсетілген ірі көлемді теңіз регрессиясын дәл тіркеуге мүмкіндік берді. Гидрологиялық көрсеткіштер мен жағалаудағы морфометриялық өзгерістер арасындағы анықталған корреляцияға ерекше назар аударылады. Деңгейдің өзгеруіне орташа аудан сезімталдық коэффициенті 45,5 км²/см² құрады, ал таяз аумақтардың кебу жылдамдығының үдеуі 2024 жылы тіркелді. Бұл зерттеудің нәтижелері қарқынды климаттың өзгеруі жағдайында су жағдайларының сенімді сандық сипаттамаларын алу үшін спутниктік альтиметрия мен жоғары ажыратымдылықтағы қашықтықтан зондтау деректерін біріктірудің жоғары тиімділігін растайды. Алынған сандық сипаттамаларды экономикалық қызметті жоспарлауда және жағалау аймақтарын теңіз деңгейінің төмендеуінің жалғасуына бейімдеу шараларын әзірлеуде пайдалануға болады.

Түйін сөздер: Каспий теңізі; жағалау сызығы; PlanetScope жоғары ажыратымдылықтағы суреттері; спутниктік альтиметрия; теңіз деңгейінің өзгеруі.

Monitoring the dynamics of the Caspian Sea coastline using high-resolution satellite data

Tatyana Dedova, Larissa Balakay, Nuriya Bashirova, Berik Iskakov, Aibek Merekeyev, Gaukhar Kairanbayeva

Abstract: This article presents the results of comprehensive monitoring of coastline dynamics in the northeastern Caspian Sea from 2017 to 2024. The study is based on the analysis of high-resolution satellite imagery (PlanetScope) and multimission altimetry data (DAHITI). The use of an automated satellite imagery processing algorithm, including the calculation of NDVI and NDWI spectral indices to identify the land-water boundary and coastline vectorization, made it possible to accurately record a large-scale sea regression, expressed as a reduction in the water surface area of the study area by 5 416 km² and a drop in its level by 1,19 m. Particular attention is paid to the identified correlation between hydrological indicators and morphometric changes in the coast. The average area sensitivity coefficient to level changes was found to be 45,5 km²/cm, with an acceleration in the rate of drying of shallow areas recorded in 2024. The results of this study confirm the high efficiency of combining satellite altimetry and high-resolution remote sensing data to obtain reliable quantitative characteristics of water conditions under conditions of intense climate change. The resulting quantitative characteristics can be used in planning economic activities and developing measures to adapt coastal regions to the ongoing sea level decline.

Keywords: Caspian Sea; coastline; high-resolution PlanetScope imagery; satellite altimetry; sea level change.

МРНТИ 06.81.23
Секция: География
Научная статья

Аттракторы как основа территориальной структуры туризма в условиях степных пространств Чуйской межгорной котловины в Российском Алтае

Александр Дунец[1]*, Надежда Курепина[2]

[1]ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»; dunets@mail.ru
[2]ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН; nyukurepina@mail.ru
*Корреспонденция: dunets@mail.ru

Аннотация:
В статье рассматриваются степные пространства Чуйской межгорной котловины Российского Алтая, где в последние годы происходит формирование территориальной структуры туризма на основе аттракторов разного генезиса. Охарактеризованы природные особенности исследуемой территории. Выявлены и систематизированы основные туристские аттракторы, включая геологические, геоморфологические, криогенные, сейсмические, водные, археологические объекты и объекты культуры. Определены возможности их рекреационного использования: создание троп, организация геотуризма, парков и другое. Показано, что традиционное номадное животноводство и современное развитие туристской инфраструктуры в условиях высокой уязвимости ландшафтов требуют сбалансированного пространственного планирования.

Ключевые слова: аттракторы; Чуйская межгорная котловина; межгорная степь; территориальная структура туризма; геотуризм; Алтай.

Цитирование: Дунец, А., Курепина, Н. (2026). Аттракторы как основа территориальной структуры туризма в условиях степных пространств Чуйской межгорной котловины в Российском Алтае. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География, 155(2), 136-146. https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-136-146

Академический редактор: Н.Е. Рамазанова

Поступила: 2.06.2026
Исправлена: 20.06.2026
Принята: 23.06.2026
Опубликована: 30.06.2026

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. Введение

Межгорные степные котловины Русского Алтая представляют значительный интерес для развития туризма в силу своего гипсометрического положения, контрастного рельефа, аридного климата и уникальных степных ландшафтов. Для этих территорий, расположенных среди высоких хребтов, характерно сочетание равнинного рельефа и окружающих гор с расчлененным строением. В зависимости от увлажнения и снежного покрова формируются лугово-степные, черноземно-степные и полупустынные ландшафты. Наиболее крупной является Чуйская котловина, расположенная в Кош-Агачском районе Республики Алтай.

Традиционно рассматриваются возможности степных пространств для организации туристских маршрутов на лошадях, верблюдах, автомобилях, квадроциклах и мотоциклах. Степные ландшафты являются перспективным ресурсом для организации экзотических туристских маршрутов. Есть возможность взаимосвязи

поездок на лошадях с экологическим туризмом и знакомством с культурой местных жителей (Shaifullin, M. R., 2021). В последние годы особой привлекательностью пользуется геотуризм, ориентированный на самые изысканные ландшафтные формы и геологические образования, он популярен в степных территориях Алтайских гор. В настоящее время динамично идет развитие туристской инфраструктуры, и в перспективе Чуйская котловина будет иметь значительный поток туристов. Эта приграничная территория привлекает внимание, прежде всего, степными ландшафтами, геологическими, археологическими объектами, а также традиционной кочевой культурой (Kocheeva, N. A. et al., 2021). В связи с этим актуально провести анализ туристских аттракторов и их соотношение с пространственным развитием туризма.

Цель - выявить основные аттракторы, определяющие территориальную структуру туризма в Чуйской котловине.

2. Материалы и методы

Горные аридные регионы характеризуются пониженной устойчивостью природных геосистем к антропогенным нагрузкам, что требуют особых подходов к развитию туризма. Поэтому межгорные степные котловины можно рассматривать как особые и сложные природно-хозяйственные системы (Chernykh, D. V., & Lubenets, L. F., 2016). Анализ взаимосвязей элементов территориальных туристско-рекреационных систем является традиционным в исследованиях пространства (Mazhar, L. Y., 2021).).

В основу исследования положены статистические, архивные и натурные данные о состоянии компонентов ландшафтов и туристском использовании сухостепных пространств Чуйской котловины.

Для Чуйской степи применялись геоэкологический и ресурсно-географические подходы к развитию туризма. Выявление туристских аттракторов явилось основанием для создания в 2016 г. геопарка «Алтай», имеющего региональное значение (Korf, E. D., 2017). На основе ресурсно-географического подхода разработана база геоданных объектов, что стало основой для активизации туристского использования территории. Работы ученых также посвящены исследованию отдельных видов аттракторов и их рекреационных возможностей. Например, Ахматов С. В. изучал озера этой территории как места туристского притяжения и выделил основные виды туристской деятельности (Akhmatov, S. V. 2010).

3. Результаты

Природные особенности Чуйской котловины определяют территориальную структуру развития туризма. Она является самой крупной межгорной котловиной Республики Алтай (рис.1), расположенной на абсолютной высоте 1750-2000 м. Котловина имеет форму овала, протяженность с запада на восток около 70 км и с севера на юг около 40 км. Со всех сторон окружена горными хребтами: Курайским, Чихачева, Сайлюгем, Южно-Чуйским и Северо-Чуйским, со степной растительностью.

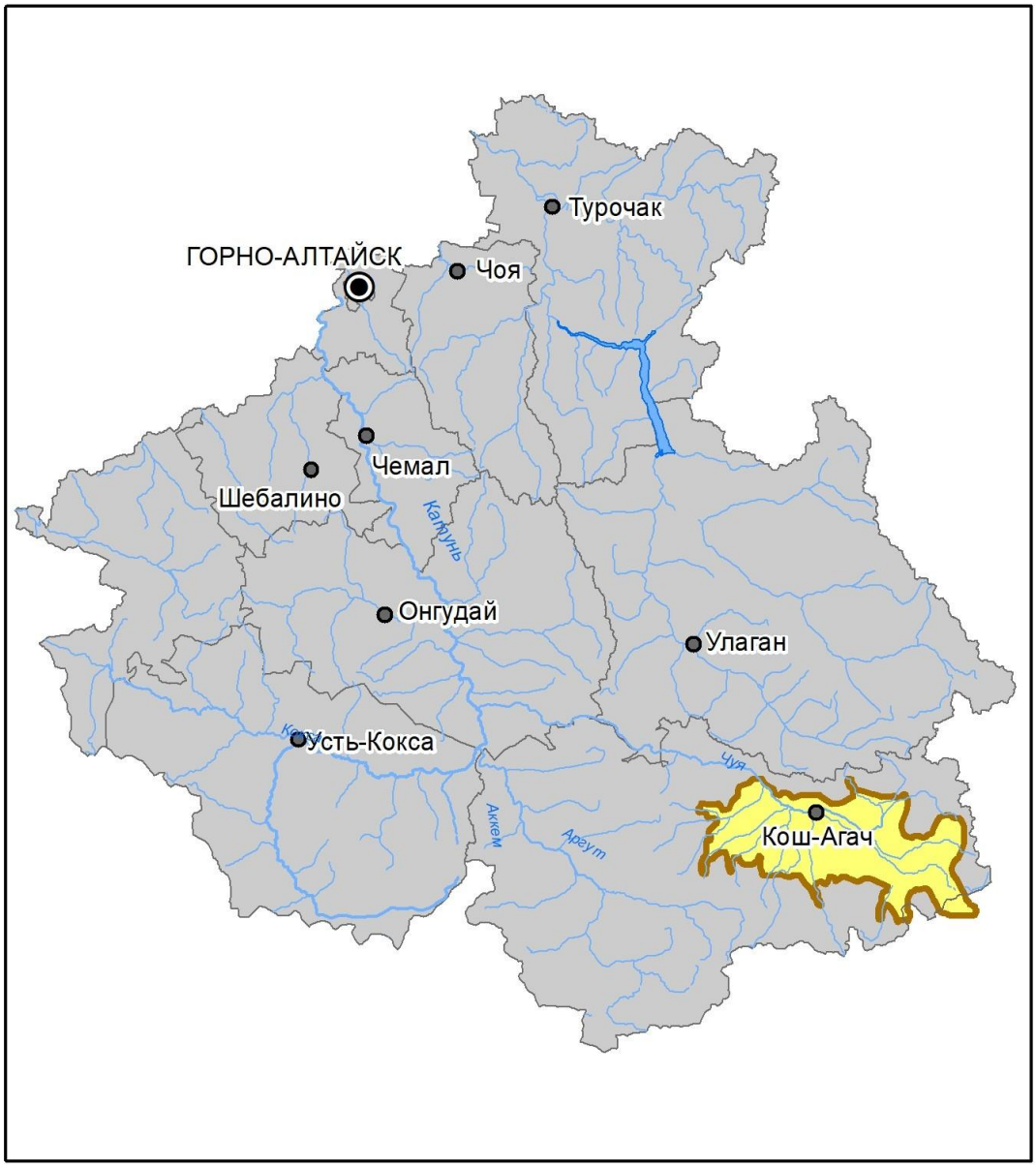


Рисунок 1. Расположение Чуйской котловины в Республике Алтай (выделено цветом). Составлено авторами

Климат Чуйской котловины резко континентальный. Это обусловлено значительной абсолютной высотой, положением внутри материка, соседством с высокогорными областями Центральной Азии и барьером хребтов, препятствующих проникновению влажных воздушных масс (Modina, T. D., 1997). Средние годовые температуры низкие (-6,6°). В особенно суровые зимы температура иногда снижается до -60°C. Отрицательные температуры держатся в течение весны и осени, сильные заморозки нередко отмечаются до середины лета. Температура летом достигает +30˚C. По данным Кош-Агачской метеостанции, число часов солнечного сияния меняется от 106 в декабре до 297 в мае, общее количество часов в год около 2600. Это является благоприятной особенностью климата Чуйской котловины, что имеет большое значение для жизни растений, увеличивая их сезонный цикл развития. От продолжительности солнечного сияния зависит величина солнечной радиации (Sukhova, M. G., & Zhuravleva, O. V., 2017). Наибольшее количество осадков выпадает в летние месяцы, меньше всего осадков – зимой, отчего постоянный снеговой покров практически отсутствует. Сильное промерзание почвы способствует сохранению вечной мерзлоты грунта.

В пределах Чуйской степи расположены села: Чаган-Узун, Ортолык, Мухор-Тархата, Теленгит-Сортогой, Тобелер, Актал, Кокоря, Жана-Аул, Бельтир, Новый Бельтир, Ташанта. Общая численность населения района составляет около 17,5 тыс. чел. Кош-Агач является районным центром.

Межгорные степные пространства важны как неотъемлемые территории для традиционного кочевого хозяйства. Она используется длительное время в хозяйственной деятельности и известна как место торговых связей России, Монголии и Китая. Еще в середине XIX в. здесь были образованы торговые места (Golubev, P. A. Ed., 1890). Проходящая здесь автодорога Р-256 «Чуйский тракт» имеет длительную историю развития и известна как одна из самых живописных туристских маршрутов. Первые торговые контакты купцов в долине р. Чуи датируются 1788-м годом (Podrezov, M. V., 2018). В северной части Чуйскую степь замыкает гора, окрашенная окисью железа в яркий красный цвет. Еще в 1-й половине XIX в. русские купцы, торгующие с Китаем, назвали это природное место «Красной горой» (по-алтайски — Кызыл Таш) (Chikhachev, P. A., 1974).

Сухие пространства межгорных территорий на протяжении многих лет использовались как места лечения заболеваний легких. На основных дорогах в степных котловинах Алтая были образованы небольшие оздоровительные центры (Romanova, L. S., & Korsakova, M. I., 2002).

В настоящее время наблюдается возрождение старых традиций, связанных с языческими обычаями, шаманством. Культура коренных народов основывается на традициях скотоводческих племен, ведущих кочевой образ жизни (номадное животноводство). Основной отраслью экономики является сельское хозяйство, а именно: животноводство (выращивание крупнорогатого скота, яководство, верблюдоводство, козоводство, овцеводство, коневодство) Torushev, E. G. (2020). Это обусловлено тем фактом, что степи по склонам гор, межгорным котловинам, плоскогорьям выступают прекрасными пастбищами для скота, а незначительный снежный покров в степях позволяет выпасать скот и в зимний период.

Природно-климатические условия и рельеф ограничивают возможности для развития земледелия в приграничных районах. Площадь и структура пахотных угодий различна. Выращивание картофеля, овощей и кормовых культур в севообороте производится лишь для удовлетворения нужд личных подсобных хозяйств.

Отгонно-пастбищное животноводство является основой и имеет тысячелетнюю историю. Поголовье скота достаточно быстро увеличивается, поэтому обостряется проблема дигрессии пастбищ. Сельское хозяйство Кош-Агачского района в сравнении с другими в Республике Алтай имеет отличия и имеет сходство по типу хозяйства Монголии. Исследуемая территория расположена в высокогорной части Республики Алтай, где сельскохозяйственные угодья преимущественно представлены пастбищами, отмечается наименьшее содержание гумуса в почве (Dunets, A. N., 2009).

Приграничные части Алтая, где находится Чуйская котловина, отличаются повышенной привлекательностью экологического туризма. За многовековую историю здесь сложилось уникальное, единое экокультурное пространство, органично объединяющее природный, исторический и этнокультурный компоненты. В его пределах синтезированы природный ландшафт, традиционно сложившийся образ жизни, проживающих здесь этносов, основанный на технологии ведения животноводства и переработки его продукции, традиционная архитектура жилищ (юрта), система питания, искусства.

В Чуйской котловине около 40 средств размещения туристов, преимущественно это малые туристские стоянки и юрточные кемпинги. Большая их часть сосредоточена в районном центре – с. Кош-Агач (рис.2). Имеются как комфортные небольшие гостиницы, так и туристские стоянки с минимальным набором услуг. В последние годы существует запрос туристов на комфортное размещение в глемпингах. Их преимущество заключается в функционировании в короткий теплый период года.

Активную работу по развитию экологического туризма ведет Сайлюгемский национальный парк. Он был организован в 2010 г. и визит-центр находится в с. Каш-Агач. Туристские программы парка сочетают посещение мест для знакомства с ландшафтами, флорой и фауной, а также историко-культурным наследием территории (Chudnovsky, A. D et al., 2023).

Уникальное сочетание аридных степных ландшафтов, многолетнемёрзлых пород, криогенных форм рельефа, палеонтологических и геологических объектов делает Чуйскую котловину высокоперспективной территорией для развития экологического туризма. Развитие экологического туризма способствует сохранению уязвимых степных геосистем при условии нормирования рекреационных нагрузок и организации контролируемого доступа к ключевым аттракторам. Этнографический туризм в Чуйской степи базируется на сохранении кочевых традиций теленгитов и казахов, а также на полиэтничном историческом наследии региона. Этнографический туризм в Чуйской котловине органично сочетается с экологическим, поскольку кочевое природопользование исторически является наименее разрушительным для аридных степей (Savchenko, I. M., 2012; Kocheeva, N. A., & Kapchikaev, V. G. (2023).

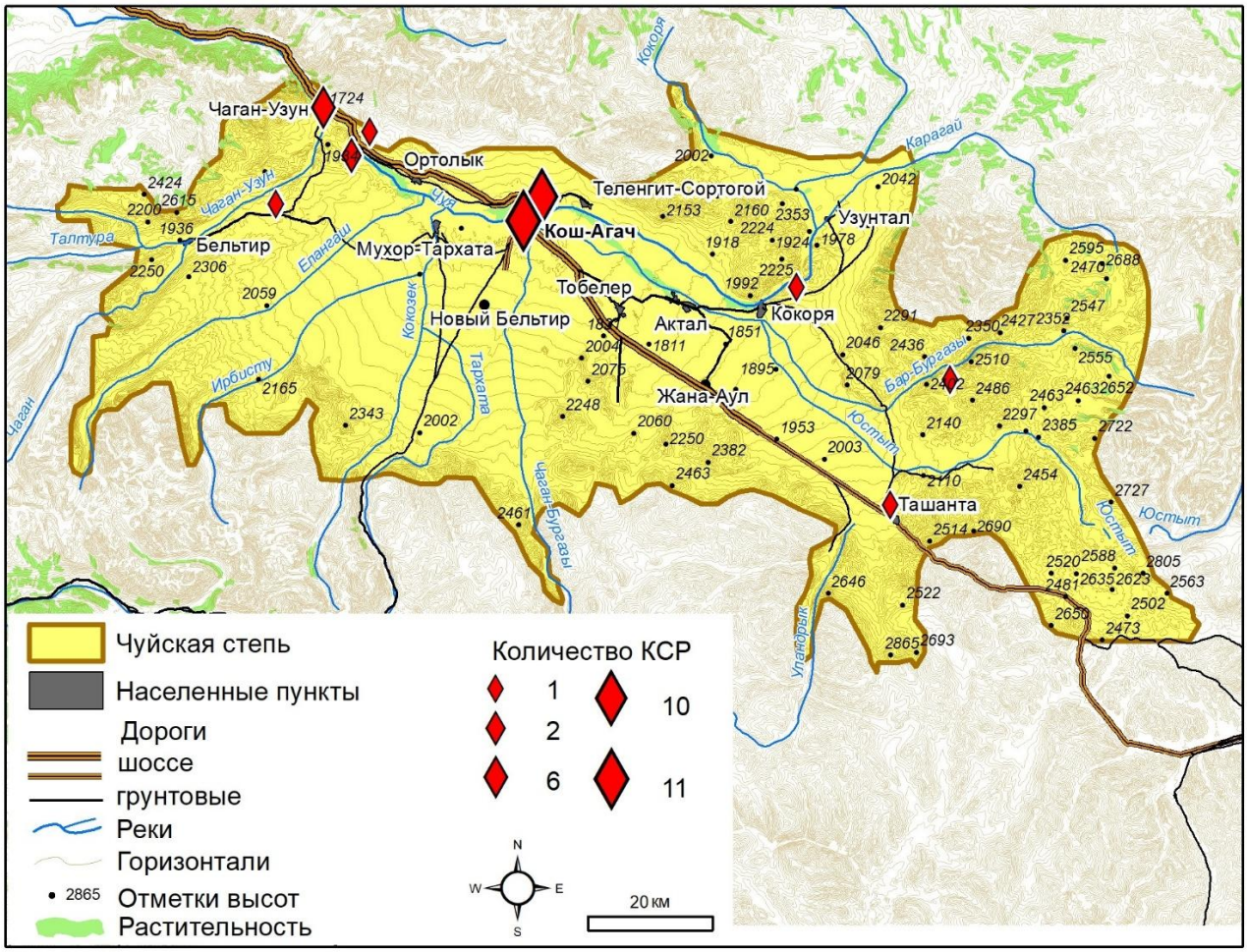


Рисунок 2. Размещение коллективных средств размещения (КСР) в Чуйской котловине (степи). Составлено авторами

Аттракторы как туристские объекты отличаются разными характеристиками, определяющими рекреационные свойства. Туристский объект может являться точкой притяжения или иметь пейзажные характеристики. На исследуемой территории в целях туризма можно использовать: геологические объекты, живописные ландшафты береговых зон озер и рек; криогенные формы рельефа; лечебные воды источников; объекты культуры и др. (Таб. 1)

Таблица 1. Аттракторы Чуйской степи и возможности их туристского использования

Вид аттрактора	Возможности туристского использования	Примеры аттракторов
Геологические	Создание троп, беседок, зон фотографирования	Цветные горы Кызыл-Чин
Геоморфологические	Создание троп, зон фотографирования и охрана мест, имеющих сакральное значение	Тархатинский мегалитический комплекс, следы существования палеоозера
Сейсмические	Создание парка землетрясения с сетью троп	Провалы, обвалы, бугры последствия землетрясения в с. Бельтир
Криогенные формы рельефа	Научные и экологические экскурсии	Гидролакколиты в долинах рр. Чаган, Елангаш, Чуя
Водные объекты	Отдых у воды, гелиотерапия, купание, организация спортивных игр	Долины рр. Чуя, Елангаш, небольшие озера
Растительный покров	Создание парков степи в центральной части сел, троп с информационными табличками	Рядом с глемпингами, удаленными турбазами, у дорог по окраинам Чуйской степи
Археологические объекты	Создание троп, экскурсий, информационных стендов, палеопарков, музеефикация памятников	Долина р. Елангаш, около турбаз
Объекты культуры	Создание центров культуры, музеев культуры на турбазах	с. Жана-Аул, визит-центр Сайлюгемского заповедника

Геологические и геоморфологические объекты. Тархатинский мегалитический комплекс – это круг диаметром 60 м, состоящий из крупных камней. Отдельные каменные глыбы достигают 2-4 м в высоту. Интерес представляет камень, имеющий название «Колыбель Сартакпая», по форме напоминающий детское кресло. Среди других мегалитических комплексов можно отметить: жертвенник у с. Ортолык, мегалиты долины р. Чаган-Узуна, мегалиты урочища Карагаш (Kubarev, G. V., 2023).

Популярным местом является разрез Кызыл-Чин – кора выветривания сформирована здесь из красноцветных песчаников и алевролитов среднего девона (оттенки красного, желтого и оранжевого цветов). Из минералов встречаются гематит, рутил, марказит и др. (Gusev, A. I., 2007). Серпентиновая гора, замыкающая Чуйскую степь с северной стороны, окрашена окисью железа в яркий красный цвет (Mukaeva, L. N., 2022).

Геоморфологическими объектами являются невысокие скальные скопления в Чуйской степи. Многие из них важны как сакральные объекты для местного населения.

К природным аттракторам относится «гигантская рябь катастрофического течения вод», образованная в результате прорыва дамбы (Rudoy, A. N., 2005). Она расположена к северу от котловины и была образована в позднем плейстоцене. В этот период существовал водоем, берегами которого были коренные склоны котловины, речные террасы, моренные комплексы (Zolnikov, I. D. et al., 2024). Гигантская рябь является объектом туристского интереса, находится близко к автодороге, хорошо просматривается и доступна в любое время года.

Криогенные формы рельефа. Чуйская впадина, расположенная на высоте, в значительной степени перекрыта многолетнемерзлыми породами. Сезонные бугры пучения встречаются в долинах рр. Чаган, Елангаш, к северу от с. Кош-Агач на заболоченных частях пойм и низких террасах, по долинам мелких рек и ручьев. Эти бугры имеют округлую или овальную форму, высоту 1–2 м, плоскую или куполовидную вершину и разбиты трещинами. Здесь залегают линзы чистого льда или мерзлых пород. Такие бугры формируются зимой, а летом разрушаются.

Объекты сейсмической активности. Территория является сейсмически активной зоной. Для местности характерны тектонические движения, которые являются причиной землетрясений различного типа. Сильнейшим землетрясением последнего времени стало Чуйское 2003 г. в долине р. Чуя с магнитудой по шкале Рихтера M=7,3. Интенсивность в эпицентре достигала 9 баллов (Emanov, A. F. et al., 2009). Памятником последнего землетрясения является сейсмооползень в долине р. Талдура. Мощность стенки отрыва оползневых масс составила 150 м.

Водные объекты. В Чуйской котловине хорошо выражена речная сеть. Основная р. Чуя протекает с востока на запад, имеет множество притоков: рр. Терехта, Чаган-Узун, Елангаш, Чаган-Бургазы, Ортолык и др. В Чуйской котловине очень много мелких озер, которые часто пересыхают, берега их засолены. Термокарстовые озера центральной части Чуйской котловины – это озера небольшой площади и глубиной, округлой или эллипсовидной формы, что привлекает туристов необычностью пейзажа.

Немаловажное туристское значение имеют воды лечебных источников. Например, в бассейне р. Аккаялу-Озек расположены несколько выходов вод источников разного химического состава, где местное население в летний период устраивает «лечебницу».

На левом берегу р. Чуя, недалеко от с. Кош-Агач, расположены озера со сравнительно высокой степенью минерализации. Их воды имеют сульфатно-кальциевый и содовый состав. Донные отложения представлены серыми и темно-серыми илами, с сильным запахом сероводорода (Akhmatov, S. V., 2010).

Археологические объекты. В межгорных котловинах находятся памятники и объекты исторического и социально-культурного назначения. Археологические памятники представлены, главным образом, остатками древних поселений и производственных центров, погребальными сооружениями, святилищами и т.д. Из погребальных памятников наиболее распространены округлые каменные курганы и небольшие овальные кладки, керексуры с расходящимися в стороны лучами. Этим сооружениям сопутствуют ряды вертикально установленных камней, изваяния, стелы. Наскальные рисунки широко распространены на исследуемой территории. Наиболее известные наскальные изображения находятся в долине р. Елангаш, изображающих человекоподобные фигуры, оленей, козлов, борьбу зверей и пр. Также большой комплекс памятников расположен в долине р. Юстыд, датированный от палеолита до раннего железного века: палеолитические местонахождения, курганы, рисунки, гончарные печи, каменные выкладки (Vodyasov, E. V., & Zaitseva, O. V., 2020).

Объекты культуры и традиций местного населения. С. Кош-Агач – это историческое торговое место, куда привозили свои товары русские, китайцы, монголы, казахи. Наряду с местным алтайским населением (теленгиты) в Чуйской степи находятся традиционные поселения казахов (Akkozhanova, E. S., 2017). Чуйская степь является центром ислама в

российском Алтае, здесь есть мечети. Теленгиты и казахи сохранили свои традиции, обычаи, обряды. Для туристов представляют интерес традиционные местные блюда, которые предлагаются в небольших кафе.

Архитектурный облик сёл (Кош-Агач, Жана-Аул, Ортолык, Теленгит-Сортогой и др.) отражает природно-климатические условия: традиционные дома имеют плоские крыши ввиду малого количества осадков, используются саманные и каменные конструкции. Это создаёт аутентичную сельскую среду, привлекательную для культурно-познавательного туризма. Для туристов организуются посещения юрточных фермерских хозяйств, где можно наблюдать стада овец, лошадей, яков и верблюдов, ознакомиться с технологиями круглогодичного выпаса в экстремальных условиях. В частных музеях и этнографических уголках представлены традиционные предметы быта. Особую ценность представляет Краеведческий музей казахов в селе Жана-Аул, экспозиции которого отражают историю переселения казахов на Алтай, их хозяйственную деятельность, семейные обряды, костюмы и утварь. Музей выполняет функции центра сохранения нематериального культурного наследия и является важным аттрактором для этнографических и образовательных туристских маршрутов.

4. Заключение

Таким образом, степные межгорные пространства Российского Алтая представляют важность не только для традиционного хозяйства кочевников, но и имеют значительные перспективы для туризма. Чуйская степь здесь является самой большой межгорной котловиной и имеет засушливый климат. Значение этой территории связано с тем, что здесь проходит основная транспортная магистраль «Чуйский тракт», связывающая Россию, Монголию и Китай в Алтайском регионе, а в последние годы значительно растет поток туристов и обустраиваются места у основных аттракторов.

Проведен анализ туристских аттракторов Чуйской степи, включающий геологические, геоморфологические, криогенные, сейсмические, водные, археологические объекты и объекты культуры. Для каждого типа аттракторов определены предпочтительные формы туристского использования.

Перспективы пространственной организации туризма связаны с развитием сети малых средств размещения (глемпинги, турбазы), маршрутов на внедорожниках, лошадях и верблюдах, а также с музеефикацией археологических памятников и интеграцией объектов культурного наследия в туристские маршруты. Учитывая хрупкость степных геосистем, необходимо внедрение нормирования рекреационных нагрузок и охрана ключевых аттракторов. Полученные результаты могут быть использованы при территориальном планировании туристско-рекреационных зон в аридных межгорных котловинах Алтая.

5. Вклады авторов

Авторы внесли равноценный вклад в подготовку представленной работы. Полевые исследования и сбор данных выполнено Дунцом А.Н.

6. Информация об авторах

Дунец, Александр - доктор географических наук, профессор кафедры экономической географии и картографии, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», г. Барнаул, Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, 656000; dunets@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3804-6800

Курепина, Надежда - кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории водных ресурсов и водопользования, ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1, 656038; nyukurepina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9871-5976

10. Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00701, https://rscf.ru/project/25-27-00701/

Список литературы

1. Akhmatov, S. V. (2010). Assessment of recreational opportunities in the lake districts of the Chui basin of the Altai Republic. In *Materials of the interregional scientific and practical conference "Opportunities for the development of tourism in the Siberian region and adjacent territories"*(pp. 75–80). Tomsk State University.
2. Akkozhanova, E. S. (2017). The past and the present in the coexistence of customs and traditions of Kazakhs of Kosh-Agach district. In *Materials of the international scientific and practical conference "History and culture of the peoples of southwestern Siberia and adjacent regions (Kazakhstan, Mongolia, China)"*(pp. 267–271).
3. Chernykh, D. V., & Lubenets, L. F. (2016). Fractional natural and economic zoning of the Altai-Sayan mountain region: experience in identifying sub-regional natural and economic systems. *Proceedings of the Altai Branch of the Russian Geographical Society*, 3(42), 13–26.
4. Chikhachev, P. A. (1974). *Journey to the Eastern Altai*, 358
5. Chudnovsky, A. D., Maltseva, M. V., Ofitserova, N. A., & Sadykova, K. R. (2023). Tourist and recreational potential of national parks (on the example of Sailyugemsky National Park, Altai Republic). *Economics of Construction*, 9, 80–83.
6. Dunets, A. N. (2009). *Territorial organization of mountain tourist and recreational systems (on the example of the Altai-Sayan region)*. AltGTU Publishing House.
7. Emanov, A. F., Emanov, A. A., Leskova, E. V., Fateev, A. V., & Filina, A. G. (2009). Chuya earthquake on September 27, 2003, MS = 7.3, K = 17 (Gorny Altai). *Bulletin of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan*, 3, 134–147.
8. Golubev, P. A. (Ed.). (1890). *Altai: historical and statistical collection on economic and civic development of the Altai Mountain District*.
9. Gusev, A. I. (2007). *Polymetallic mineralization of Gorny Altai: prospects and forecast assessment*. Biysk Pedagogical State University. P.7
10. Kocheeva, N. A., & Kapchikaev, V. G. (2023). Ecological or cultural tourism in the Altai Republic. *Information and Education: The Boundaries of Communication*, 15(23), 34–35.
11. Kocheeva, N. A., Iurkova, N. A., Sukhova, M. G., Redkin, A. G., & Zhuravleva, O. V. (2021). Geospatial potential and environmental changes: Case study of complex nature of the Altai Geopark. *Journal of Water and Land Development*, 49(IV–VI), 273–281.
12. Korf, E. D. (2017). Problems and prospects of the Altai Geopark development. *Society. Environment. Development*, 2, 108–115.
13. Kubarev, G. V. (2023). "Megaliths" – Dropstones of the Chuya Steppe as a type of archaeological sites (Southern Altai). *Problems of Archaeology, Ethnography, Anthropology of Siberia and Adjacent Territories*, 29, 668–675.
14. Mazhar, L. Y. (2021). Scientific and methodological foundations of the development of tourist space. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, 7(3), 78–86.
15. Modina, T. D. (1997). *The climates of the Altai Republic*.
16. Mukaeva, L. N. (2022). Chuisky tract - an open-air geological museum. *Preservation and Study of the Cultural Heritage of the Altai Territory*, 28, 421–428.
17. Podrezov, M. V. (2018). Chuisky pack route: The end of the 18th – the first half of the 19th century. *Bulletin of Tomsk State University. History*, 51, 69–73.
18. Romanova, L. S., & Korsakova, M. I. (2002). *Siberian tourism in the documents of V. I.* Novosibirsk Book Publishing House.
19. Rudoy, A. N. (2005). *Giant ripples of the current (History of research, diagnostics, paleogeographic significance)*. Tomsk State Pedagogical University Press.
20. Savchenko, I. M. (2012). The development of ethnographic tourism in Gorny Altai: problems and prospects. *Problems of Regional Ecology*, 5, 95–98.

21. Shaifullin, M. R. (2021). Features of the organization of equestrian routes in steppe landscapes. *Geography and Tourism*, 1, 79–85.
22. Sukhova, M. G., & Zhuravleva, O. V. (2017). Dynamics of air temperature and precipitation changes in the Chuya basin. *News of Higher Educational Institutions. The North Caucasus Region. Series: Natural Sciences*, 1(193), 124–129.
23. Torushev, E. G. (2020). Animal husbandry in economic activity and life support of Kazakhs of the Chui steppe of the Altai Republic. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Humanities*, 5-2, 10–16.
24. Vodyasov, E. V., & Zaitseva, O. V. (2020). The earliest monuments of ferrous metallurgy in Gorny Altai: new data from the Yustyd River valley. *Siberian Historical Research*, 2, 126–147.
25. Zolnikov, I. D., Novikov, I. S., Kurbanov, R. N., Filatov, E. A., Glushkova, N. V., & Levitskaya, P. S. (2024). Age and size of the last glacial dammed lake of the Chuiskaya basin (Gorny Altai). *Limnology and Freshwater Biology*, 4, 753–756.

Attractors as the basis of the territorial structure of tourism in the conditions of the steppe spaces of the Chuya intermountain basin in the Russian Altai

Alexander Dunets, Nadezhda Kurepina

Abstract. The article examines the steppe spaces of the Chuya intermountain basin of the Russian Altai, where in recent years the territorial structure of tourism has been forming based on attractors of different genesis. The natural features of the studied territory are characterized. The main tourist attractions, including geological, geomorphological, cryogenic, seismic, aquatic, archaeological and cultural sites, have been identified and systematized. The possibilities of their recreational use have been identified: the creation of trails, the organization of geotourism, parks, and more. It is shown that traditional nomadic animal husbandry and modern development of tourist infrastructure in conditions of high vulnerability of landscapes require balanced spatial planning.

Keywords: attractors; Chuya intermountain basin; intermountain steppe; territorial structure of tourism; geotourism, Altai.

Ресей Алтайындағы Шу тауаралық қазаншұңқырының дала кеңістігіндегі туризмнің аумақтық құрылымын қалыптастырудағы аттракторлардың рөлі

Александр Дунец, Надежда Курепина

Аңдатпа: Мақалада соңғы жылдары генезисі әртүрлі аттрақторлық нысандар негізінде туризмнің аумақтық құрылымы қалыптасып келе жатқан Ресей Алтайындағы Шу тауаралық қазаншұңқырының дала кеңістіктері қарастырылады. Зерттелетін аумақтың табиғи ерекшеліктеріне сипаттама берілген. Геологиялық, геоморфологиялық, криогендік, сейсмикалық, су нысандары, археологиялық ескерткіштер мен мәдени мұра нысандарын қамтитын негізгі туристік аттрақторлық нысандар анықталып, жүйелендірілген. Оларды рекреациялық мақсатта пайдалану мүмкіндіктері, атап айтқанда туристік соқпақтар ұйымдастыру, геотуризмді дамыту, геопарктер құру және басқа да бағыттар айқындалған. Ландшафттардың жоғары осалдығы жағдайында дәстүрлі көшпелі мал шаруашылығы мен

туристік инфрақұрылымның заманауи дамуы аумақты пайдалануды теңгерімді кеңістіктік жоспарлауды талап ететіні көрсетілген.

Түйін сөздер: аттрактор; Шу тауаралық қазаншұңқыры; тауаралық дала; туризмнің аумақтық құрылымы; геотуризм; Алтай.

МРНТИ 47.49.27; 87.29.91
География
Научная статья

Оценка экологического состояния и антропогенного воздействия в бассейне реки Терис на основе данных ДЗЗ (Жамбылская область)

Құдайберген Қырғызбай[1,2]*, Бақтыбек Дүйсебек[1], Талгат Усманов[1], Иса Рахметов[1,3], Ерболат Муканов[1,4]

[1]Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан; kyrgyzbay.kudaibergen@kbtu-edu.kz; b.duisebek@kbtu.kz; talgat.usmanov@kbtu-edu.kz; issa.rakhmetov@kbtu.kz; yerbulat.mukanov@kbtu-edu.kz
[2]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; kyrgyzbay.K@kaznu.kz
[3]Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина, Алматы, Казахстан; issaraqmet@gmail.com
[4]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; mukanov_yen@enu.kz
*Корреспонденция: kyrgyzbay.kudaibergen@gmail.com

Аннотация: В статье представлена пространственно-временная оценка экологического состояния и уровня антропогенного воздействия в бассейне реки Терис (Жамбылская область) на основе многолетних данных дистанционного зондирования Земли за 2015-2025 гг. Информационной основой исследования послужили спутниковые данные Landsat 8 и 9 (Collection 2 Level 2), обработанные в среде Google Earth Engine с применением процедур атмосферной коррекции, маскирования облачности и нормализации спектральных показателей. Для количественной характеристики ключевых компонентов геосистем рассчитаны индексы NDVI (растительность), WET (влажностная компонента преобразования Tasseled Cap), LST (температура земной поверхности) и NDBSI (сухость и степень антропогенной трансформации). Интеграция стандартизированных индикаторов выполнена методом главных компонент с последующим формированием интегрального индекса экологического состояния RSEI.

Полученные результаты свидетельствуют о выраженной пространственной дифференциации и высокой межгодовой вариабельности экологических условий. В структуре территории на протяжении всего периода исследования доминируют классы «ниже среднего» и «средний», совокупная доля которых в большинстве лет превышает 70 %. Наибольшая доля класса «средний» зафиксирована в 2016 г. (56,88 %), тогда как в 2025 г. отмечено существенное расширение класса «высокий» (34,29 %), отражающее локальное улучшение экологического состояния. Зоны с низкими значениями RSEI занимают ограниченные площади (до 1,34 %), однако пространственно приурочены к участкам интенсивного землепользования и деградированных земель. Результаты непараметрического анализа показали отсутствие статистически значимых долговременных трендов для большинства классов RSEI,

Цитирование: Қырғызбай, Қ., Дүйсебек, Д., Усманов, Т., Рахметов, И., Муканов, Е (2026). Оценка экологического состояния и антропогенного воздействия в бассейне реки Терис на основе данных ДЗЗ (Жамбылская область). Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия Химия. География. 155(2), 147-169. https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-147-169

Академический редактор: Н.Е. Рамазанова

Поступила: 16.03.2026
Исправлена: 22.05.2026
Принята: 8.06.2026
Опубликована: 30.062026

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/)

что свидетельствует о преобладании межгодовой вариабельности экологических условий. Наиболее благоприятные экологические условия характерны для горных и пойменных ландшафтов, тогда как центральные и сельскохозяйственно освоенные районы демонстрируют пониженные интегральные показатели. Результаты исследования подтверждают методическую состоятельность RSEI как интегрального инструмента мониторинга динамики экологического состояния и оценки антропогенной нагрузки в пределах бассейновых геосистем полузасушливых регионов.

Ключевые слова: RSEI; дистанционное зондирование Земли; антропогенное воздействие; экологическое состояние; бассейн реки Терис.

1. Введение

Деятельность человека, связанная с развитием цивилизации, процессами индустриализации и реализацией планов агропромышленного комплекса оказывает прямое воздействие на здоровье и жизнедеятельность человека (Liu Shiliang et al., 2018; J. Wang et al., 2018; Yue et al., 2019). Антропогенно обусловленные изменения растительного покрова приводят к трансформации пространственного распределения местообитаний, а также оказывают влияние на уровень биоразнообразия, ход экологических процессов и температурный режим земной поверхности, что в совокупности изменяет экологические условия и экосистемные функции (H. Wang et al., 2020; L. Wang et al., 2020). В результате данных процессов сформировался широкий спектр экологических проблем, включая опустынивание территорий, развитие почвенной эрозии, загрязнение окружающей среды и деградацию биоразнообразия. Указанные явления способствуют росту уязвимости окружающей среды, что имеет принципиальное значение для устойчивости условий жизнедеятельности человека (Wolters et al., 2016).

Оценка экологического качества окружающей среды (Ecological Environment Quality) имеет решающее значение для целей устойчивого развития (Hasan et al., 2025; Ning et al., 2020). Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года подчёркивает необходимость защищать, восстанавливать и устойчиво использовать наземные экосистемы, рационально управлять природными ресурсами и предотвращать деградацию земель и утрату биоразнообразия. Несмотря на частичный прогресс, Sustainable Development Goals Report 2024 отмечает, что деградация земель, потеря биоразнообразия и ухудшение качества экосистем остаются глобальными вызовами, требующими надежных методов мониторинга и оценки. Современные экологические инициативы также подчёркивают роль пространственных данных и дистанционного зондирования Земли как критического инструмента для количественной оценки состояния экосистем и динамики антропогенного воздействия (United Nations, 2024).

Современное развитие спутниковых систем наблюдения Земли предоставляет эффективные инструменты для мониторинга и управления экосистемами, обеспечивая получение надёжных индикаторов их состояния на локальном, региональном и глобальном уровнях (Willis, 2015). Анализ отражённого от земной поверхности электромагнитного излучения позволяет оценивать экологическую обстановку с использованием данных дистанционного зондирования, охватывая различные компоненты экосистем, включая почвенный покров, растительность и открытые водные объекты (De Araujo Barbosa et al., 2015; Kwok, 2018; Reza & Abdullah, 2011). В связи с этим технологии дистанционного зондирования получили широкое распространение в исследованиях экосистем и практике экологического управления (Kennedy et al., 2014; Xu et al., 2018). Результаты многочисленных работ подтверждают высокую эффективность методов дистанционного зондирования, основанных на применении различных индексов, таких как NDVI, LST, BI и NDBI (Hasan et al., 2025).

Широкоиспользуемый (Liu et al., 2025; Ning et al., 2020; Xu, 2013) дистанционно-зондируемый экологический индекс (Remote Sensing Ecological Index) RSEI предназначен для мониторинга и оценки регионального экологического состояния, а также объединяет нормализованный вегетационный индекс (NDVI), показатель влажности (WET), температуру земной поверхности (LST) и нормализованный индекс застроенных и оголённых поверхностей (NDBSI) с применением метода главных компонент (PCA) для оценки экологического состояния исследуемого региона (Yue et al., 2019).

Использование данного индекса позволяет оперативно выявлять и анализировать изменения экологических условий во времени (Wu et al., 2022). Проведённые исследования показали, что экологическая обстановка формируется под влиянием четырёх ключевых факторов: озеленённости, теплового состояния, сухости и влажности поверхности. Применение индекса RSEI дало возможность по-новому интерпретировать экологические изменения и выявить уязвимые зоны в ряде регионов (Yue et al., 2019). Поиск публикаций в базах Scopus, Web of Science и Google Scholar показывает, что применение индекса RSEI для оценки экологического состояния территорий Казахстана представлено ограниченным числом исследований, тогда как для бассейна реки Терис подобные работы практически отсутствуют. Целью данного исследования является оценка пространственно-временных изменений экологического состояния и антропогенной нагрузки в бассейне реки Терис на основе индекса RSEI.

2. Материалы и методы

2.1. Объект исследования

Объектом исследования является бассейн реки Терис (рис. 1), расположенный в пределах Жуалынского района Жамбылской области и относящийся к бассейну реки Асы. Площадь бассейна реки Терис составляет 200 464,4 га (2 004,64 км^2). Бассейн реки Терис расположен на юге Республики Казахстан, в пределах Жамбылской области, вблизи административной границы с Туркестанской областью, а также в непосредственной близости к государственным границам с Кыргызской Республикой и Республикой Узбекистан (рис. 1а). Географическое положение бассейна обуславливает его транзитный характер и важную роль в региональной водохозяйственной системе.

Река Терис берёт начало на юго-восточных склонах хребта Каратау и, сливаясь с рекой Куркереусу, формирует реку Асы. Длина реки составляет около 51 км, площадь водосборного бассейна – около 485 км². Питание реки преимущественно снегово-дождевое с участием подземных вод, а режим стока характеризуется выраженной сезонной неравномерностью. Основной объём стока формируется в весенне-летний период за счёт снеготаяния и атмосферных осадков в горных районах. Река активно используется для орошения сельскохозяйственных земель, а её гидрологический режим оказывает существенное влияние на пространственную дифференциацию растительного покрова и экологического состояния территории (Wikipedia contributors 2024a; 2024b)

Для визуализации территории исследования на рис. 1б использовалось спутниковое изображение Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м, полученное из программы Copernicus Европейского космического агентства (ESA, 2024). На рисунке отчётливо выделяются сельскохозяйственные угодья, элементы транспортной инфраструктуры, а также участки естественной растительности и водные объекты. Разнородность земного покрова отражает интенсивное хозяйственное освоение равнинных и предгорных частей бассейна, тогда как в горных районах преобладают природные ландшафты с меньшей степенью антропогенного воздействия.

Цифровая модель рельефа бассейна реки Терис (рис. 1в) отражает выраженную высотную дифференциацию территории, обусловленную сочетанием горных, предгорных и равнинных форм рельефа. Абсолютные отметки высот в пределах бассейна варьируются от 866-1500 м над уровнем моря в северной и центральной частях и до 3000-3960 м в южной

горной зоне. Наибольшие высоты приурочены к южной части бассейна, где развиты расчленённые горные массивы с крутыми склонами и значительными перепадами высот (Farr et al., 2007).

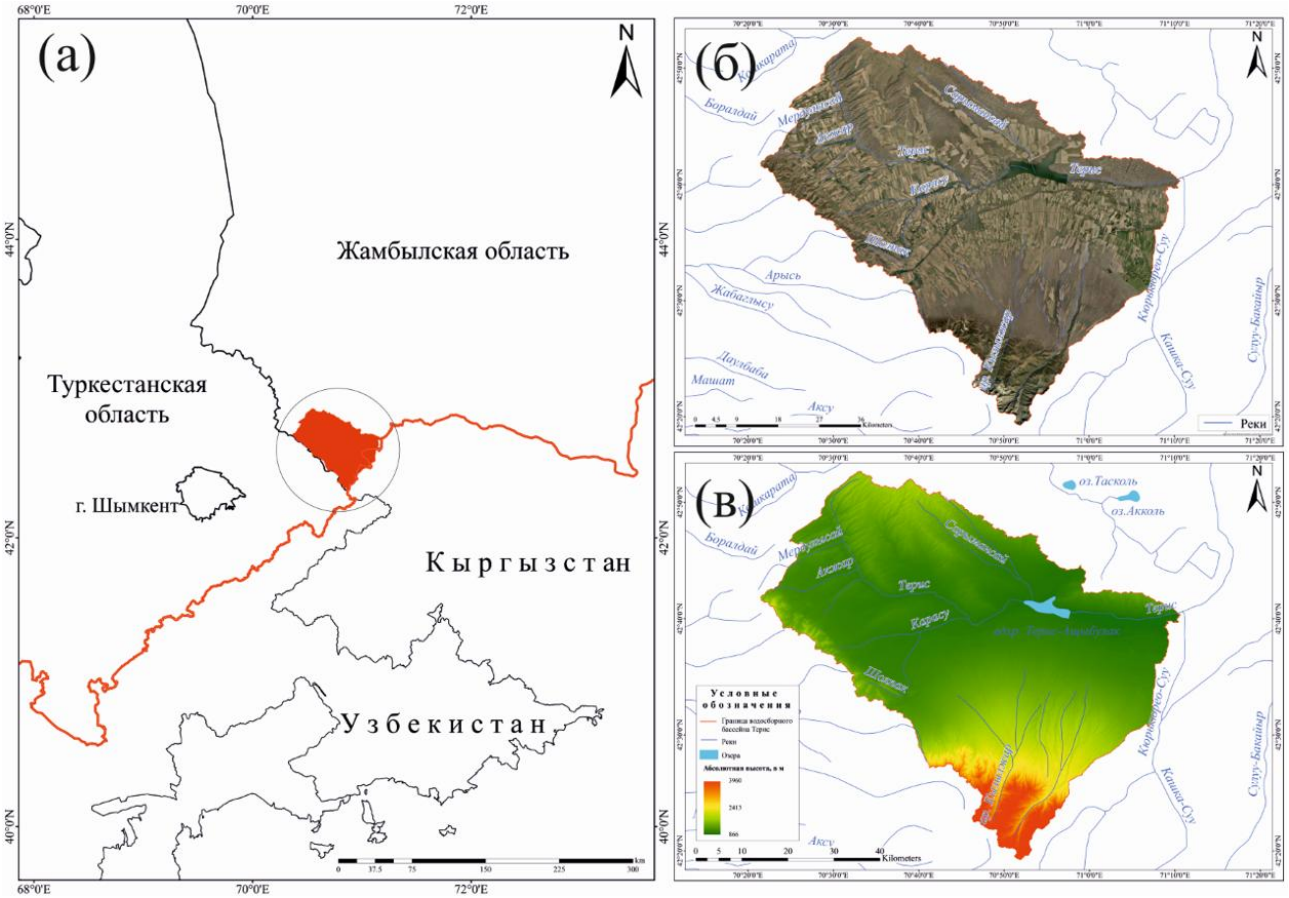


Рисунок 1. Географическое расположение (а), космический снимок (б) и цифровая модель рельефа (в) бассейна реки Терис

Основная площадь бассейна представлена территориями со средними высотами в диапазоне 1500-2500 м, что соответствует предгорным и низкогорным ландшафтам. Эти участки характеризуются более сглаженным рельефом и относительно благоприятными условиями для формирования растительного покрова и хозяйственного освоения. Северная и центральная части бассейна, где абсолютные высоты преимущественно не превышают 1200-1600 м, отличаются слабой расчленённостью поверхности и приурочены к равнинным и слабоволнистым формам рельефа (Mueller et al., 2014; K. Saparov et al., 2023).

2.2. Набор и технологии обработки данных дистанционного зондирования

Пространственные границы бассейна были заданы в виде векторного полигона и использованы в качестве области интереса (AOI) на всех этапах анализа. Полигональный слой водосборного бассейна реки Терис был сформирован на основе цифровой модели рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с пространственным разрешением 30 м (Farr et al., 2007) с использованием гидрологических инструментов модуля Hydrology в среде ArcGIS. В процессе делинеации применялись процедуры заполнения локальных депрессий рельефа (Fill), определения направления стока (Flow Direction) и накопления стока (Flow Accumulation), что позволило выделить границы водосборной территории и русловую сеть бассейна (Esri, 2024). Выделение русловой сети выполнялось на основе порогового значения накопления стока, обеспечивающего корректное отображение основной гидрографической структуры бассейна и согласованность с топографическими картами.

Для уточнения и верификации конфигурации водосбора использовались топографическая карта масштаба 1: 200 000 (K-42-12, K-42-11, K-42-17, K-42-18) и спутниковые изображения высокого разрешения (ESA, 2024). Сопоставление гидрографической сети и особенностей рельефа позволило уточнить положение границ бассейна и минимизировать возможные геометрические несоответствия (рис. 2).

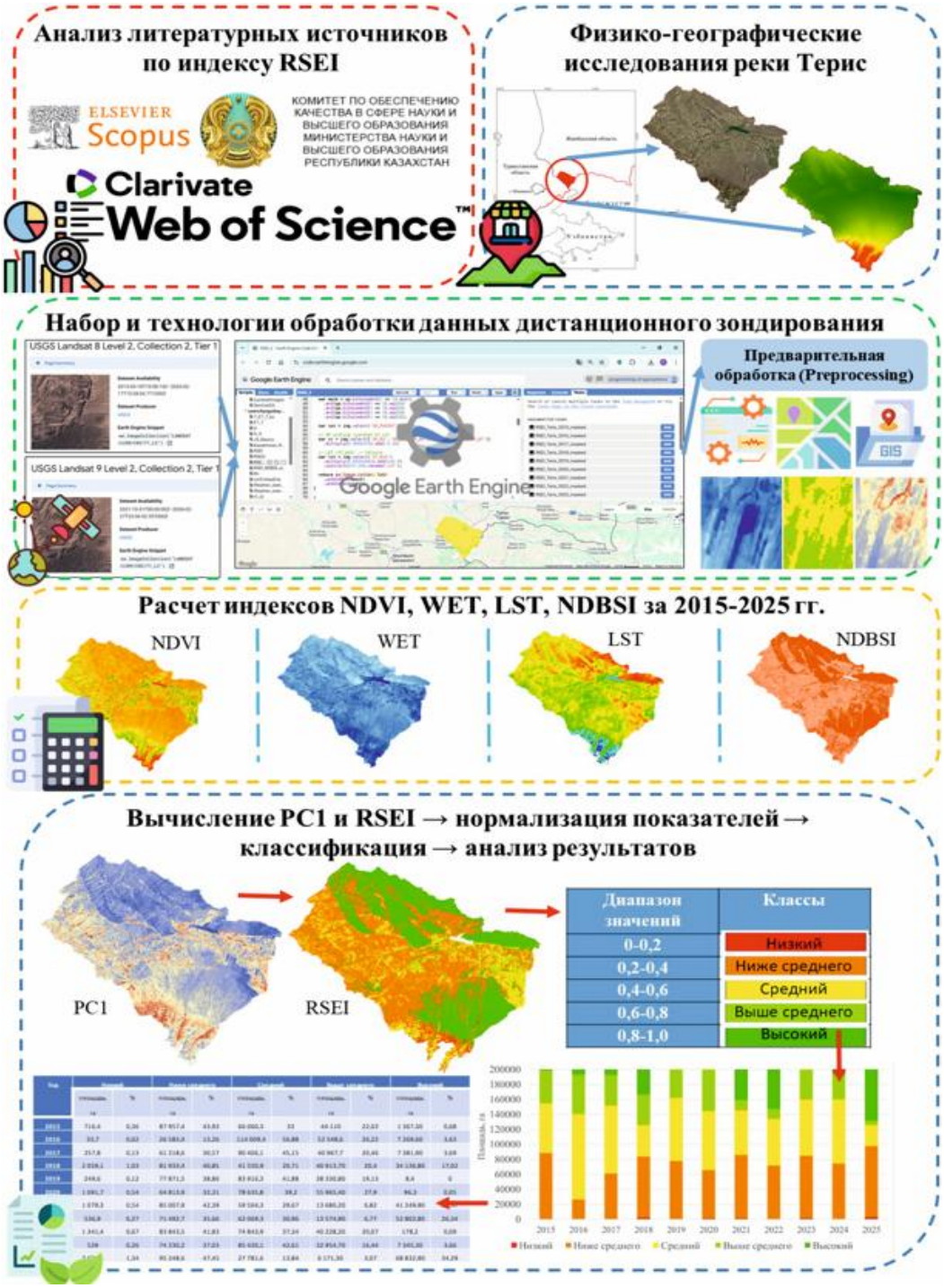


Рисунок 2. Алгоритм расчёта и анализа индекса RSEI на основе данных дистанционного зондирования Земли (2015–2025 гг.)

В работе использованы данные спутников Landsat 8 (OLI/TIRS) и Landsat 9 (OLI-2/TIRS-2) коллекции Collection 2 Level-2 (Surface Reflectance и Surface Temperature), предоставляемые платформой Google Earth Engine (GEE - https://code.earthengine.google.com) (USGS, 2024b).

Анализ охватывает период с 2015 по 2025 гг., при этом для каждого года рассматривался вегетационный сезон с мая по сентябрь, что позволяет минимизировать влияние сезонных факторов и обеспечить сопоставимость межгодовых результатов.

Для снижения влияния атмосферных искажений и шумов применялась маска облаков, облачных теней и снежного покрова на основе битовой информации слоя QA_PIXEL, а также маска насыщенных пикселей QA_RADSAT. Дополнительно выполнялась фильтрация сцен по показателю общей облачности (CLOUD_COVER < 80). Процедура обработки осуществлялась в соответствии со стандартными этапами предварительной обработки, рекомендованными Геологической службой США (USGS) для продуктов Landsat Collection 2 Level-2 (USGS, 2024a). Отражательная способность поверхностных каналов была приведена к физическим значениям с использованием официальных коэффициентов масштабирования Landsat Collection 2. Температура земной поверхности (LST) рассчитывалась по тепловому каналу ST_B10 с переводом значений из кельвинов в градусы Цельсия. Для каждого года формировалось медианное композитное изображение (median composite), что позволило уменьшить влияние остаточной облачности, атмосферных шумов и аномальных спектральных значений отдельных сцен. Использование медианного композита обеспечивает получение статистически устойчивого представления спектральных характеристик земной поверхности и широко применяется при обработке многовременных спутниковых данных в среде Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

2.3. Расчет индекса RSEI

Анализ пространственно-временных изменений экологических условий и антропогенного воздействия оценивались с использованием карт экологического индекса RSEI, являющегося функцией четырёх показателей: озеленённости, влажности, сухости и теплового состояния, которые полностью могут быть получены на основе данных дистанционного зондирования (Hasan et al., 2025; Yue et al., 2019):

$$RSEI = f(NDVI, Wet, LST, NDBSI) \quad (1)$$

На основе ежегодных композитных изображений были рассчитаны четыре ключевых показателя, лежащие в основе Remote Sensing Ecological Index (RSEI):

1. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – показатель состояния и плотности растительного покрова, вычисляемый по красному (Red) и ближнему инфракрасному (NIR) каналам:

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red) \quad (2)$$

2. WET (Tasseled Cap Wetness) – индекс влажности, отражающий водообеспеченность поверхности и рассчитываемый на основе преобразования Tasseled Cap с использованием коэффициентов для сенсора Landsat 8 OLI (Baig et al., 2014):

$$Wet_{OLI} = 0.1511_{\rho blue} + 0.1973_{\rho green} + 0.3283_{\rho red} + 0.3407_{\rho nir} - 0.7117_{\rho swir1} - 0.4559_{\rho swir2} \quad (3)$$

3. LST (Land Surface Temperature) – температура земной поверхности, характеризующая тепловое состояние ландшафта. LST характеризует тепловое состояние и используется в качестве индикатора локальных климатических изменений в ответ на изменения окружающей среды в модели PSR (Pressure–State–Response). Температура земной поверхности (LST) рассчитывалась на основе канала Surface Temperature ST_B10 продукта Landsat 8/9 Collection 2 Level-2. Значения ST_B10 были преобразованы в физические значения температуры с

использованием официальных коэффициентов масштабирования USGS (USGS, 2024a; USGS, 2024b), после чего температура была переведена из Kelvin в градусы Цельсия:

$$LST = (ST_{B10} * 0.00341802 + 149.0) - 273.15 \quad (4)$$

где ST_B10 – канал температуры поверхности продукта Landsat 8/9 Collection 2 Level-2; 0.00341802 и 149.0 – коэффициенты масштабирования USGS; 273.15 – коэффициент перевода температуры из Kelvin в градусы Цельсия.

4. Индекс NDBSI (Normalized Difference Built-up and Soil Index) использовался для характеристики сухости поверхности и степени антропогенной трансформации ландшафтов, включая застроенные и оголённые территории. Рост антропогенной нагрузки и расширение хозяйственно освоенных земель приводят к замещению естественного растительного покрова искусственными поверхностями и деградированными участками, что отражается в изменении спектральных характеристик земной поверхности.

В исследовании индекс NDBSI рассчитывался как среднее значение индекса оголённой почвы (BI) и индекса застроенных территорий (IBI):

$$NDBSI = (BI + IBI)/2 \quad (5)$$

Индекс оголённой поверхности (BI) определялся следующим образом (Rikimaru et a., 2002):

$$BI = \frac{(SWIR+RED) - (\mathrm{NIR} + \mathrm{BLUE})}{(SWIR+RED) + (\mathrm{NIR} + \mathrm{BLUE})} \quad (6)$$

где SWIR – коротковолновый инфракрасный диапазон; RED – красный диапазон; NIR – ближний инфракрасный диапазон; BLUE – синий диапазон спектра.

Индекс застроенных территорий (IBI) вычислялся по формуле (Xu, 2008):

$$IBI = \frac{NDBI - \frac{(NDVI+MNDWI)}{2}}{NDBI + \frac{(NDVI+MNDWI)}{2}} \quad (7)$$

где NDBI - индекс застроенных территорий; NDVI - нормализованный индекс растительности; MNDWI - модифицированный индекс водных объектов.

Для обеспечения сопоставимости показателей все индексы были нормализованы в диапазон от 0 до 1 с использованием минимальных и максимальных значений в пределах бассейна для каждого года. При этом направления индексов были приведены к единой интерпретации, где более высокие значения соответствуют лучшему экологическому состоянию: для LST и NDBSI использовалось инвертирование нормализованных значений. В результате был сформирован четырехканальный стек (NDVI, WET, LST, NDBSI), отражающий основные компоненты экологического состояния территории.

Интегральный индекс RSEI рассчитывался с использованием метода главных компонент (Principal Component Analysis, PCA). На первом этапе было произведено вычисление ковариационной матрицы для нормализационного набора данных (стека), после чего определялись собственные значения и собственные векторы. Первая главная компонента (PC1), объясняющая наибольшую долю дисперсии исходных данных, была интерпретирована как интегральный показатель экологического состояния:

$$RSEI = 1 - PC[f(NDVI, Wet, LST, NDBSI)] \quad (8)$$

Для получения окончательного индекса RSEI значения PC1 были дополнительно нормализованы в диапазон от 0 до 1, где низкие значения соответствуют неблагоприятному экологическому состоянию и высокой антропогенной нагрузке, а высокие – более устойчивым и природно сохранным ландшафтам. Для каждого года были экспортированы растровые слои NDVI, WET, LST, NDBSI, PC1 и RSEI. Все данные сохранены с пространственным разрешением 30 м и использованы для последующего картографического, статистического и сравнительного анализа (Xu Hanqiu et al., 2017; Yue et al., 2019; Liu et al., 2025).

Таблица 1. Классы экологического состояния, выделенные по значениям индекса RSEI (Xu, 2013; Hasan et al., 2025)

Диапазон значений	Классы
0-0,2	Низкий
0,2-0,4	Ниже среднего
0,4-0,6	Средний
0,6-0,8	Выше среднего
0,8-1,0	Высокий

Для оценки статистической значимости межгодовой динамики площадей классов RSEI применялись непараметрический тест Манна–Кендалла (Mann, 1945; Kendall, 1975) и оценка наклона Сена (Sen, 1968). Данные методы широко используются при анализе временных рядов экологического состояния на основе данных дистанционного зондирования и позволяют выявлять наличие монотонных трендов без предположения о нормальности распределения данных.

Статистика Манна–Кендалла рассчитывалась следующим образом:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sgn(x_j - x_k) \quad (9)$$

где x_j и x_k – значения временного ряда; n – число наблюдений; sgn – функция знака.

Для оценки интенсивности изменения показателей использовался наклон Сена:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}, \qquad j>k \quad (10)$$

где Qi – оценка наклона временного ряда; xj, xk – значения показателя в разные моменты времени. Положительные значения наклона Сена отражают тенденцию к увеличению показателя, отрицательные – к его снижению. Статистическая значимость выявленных трендов оценивалась по p-value двустороннего теста Манна–Кендалла при уровне значимости $p<0.05$ (Yang et al., 2023; Aizizi et al., 2023; Liu et al., 2024).

3. Результаты

3.1. Пространственно-временная динамика вегетационного покрова по данным NDVI

Анализ пространственно-временной динамики вегетационного покрова бассейна реки Терис по данным индекса NDVI за 2015-2025 гг. (рис. 3) выявил выраженную территориальную дифференциацию и межгодовую изменчивость состояния растительности. NDVI, отражающий интенсивность фотосинтетической активности и плотность зелёной

биомассы, демонстрирует устойчивую зависимость от орографических условий, степени увлажнения и характера землепользования.

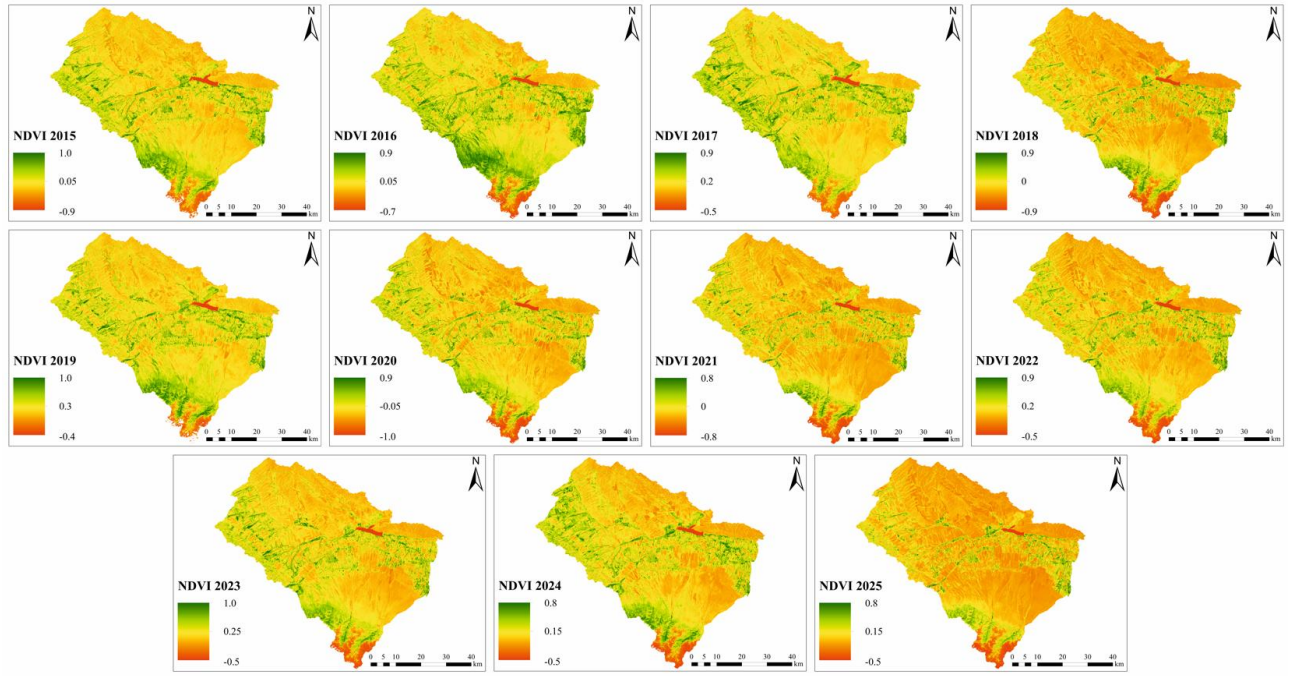


Рисунок 3. Пространственное распределение и межгодовая динамика вегетационного индекса растительности (NDVI) в бассейне реки Терис за 2015–2025 гг.

В пространственном отношении наиболее высокие значения NDVI стабильно приурочены к северной и северо-западной частям бассейна, где распространены сельскохозяйственные угодья и участки с относительно благоприятным гидротермическим режимом. Центральная часть характеризуется мозаичным распределением индекса, что обусловлено сочетанием агроландшафтов, естественной степной растительности и различной интенсивности антропогенного освоения. Наиболее низкие значения NDVI фиксируются в южной части бассейна, представленной горными и предгорными территориями, где рельефная расчленённость, эрозионные процессы и локальный дефицит почвенного покрова ограничивают развитие устойчивой растительности.

Межгодовая динамика NDVI носит волнообразный характер. В период 2015–2017 гг. отмечалась относительная стабильность показателей с сохранением участков высокой биопродуктивности. В 2018 г. наблюдается снижение средних значений индекса, преимущественно в южных и центральных районах, что связано с климатическими колебаниями и засушливыми условиями. В 2019-2021 гг. фиксируется частичное восстановление растительного покрова, выраженное в увеличении площадей со средними и повышенными значениями NDVI. В 2022-2023 гг. усиливается пространственная неоднородность распределения индекса, что свидетельствует о возрастании контрастности между зонами интенсивного землепользования и зонами, менее подверженными хозяйственной деятельности. В 2024-2025 гг. прослеживается тенденция к умеренному снижению интенсивности зелёных оттенков в ряде районов, что может указывать на усиление антропогенной нагрузки либо на влияние неблагоприятных климатических факторов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что вегетационный покров бассейна реки Терис характеризуется высокой чувствительностью к природно-климатическим и антропогенным воздействиям. NDVI отражает как естественную орографическую зональность, так и трансформацию ландшафтов в результате хозяйственной деятельности, что подтверждает его значимость в структуре интегрального индекса RSEI и при оценке экологического состояния территории.

3.2. Пространственные особенности и динамика влажностного режима поверхности (WET)

Анализ пространственно-временной динамики индекса влажности поверхности (WET), рассчитанного на основе преобразования Tasseled Cap (рис. 4), позволил выявить особенности распределения влагообеспеченности территории бассейна реки Терис в 2015-2025 гг. Индекс WET отражает степень увлажнённости почвенно-растительного покрова и является одним из ключевых положительных компонентов интегрального индекса RSEI, поскольку характеризует состояние водного режима экосистем.

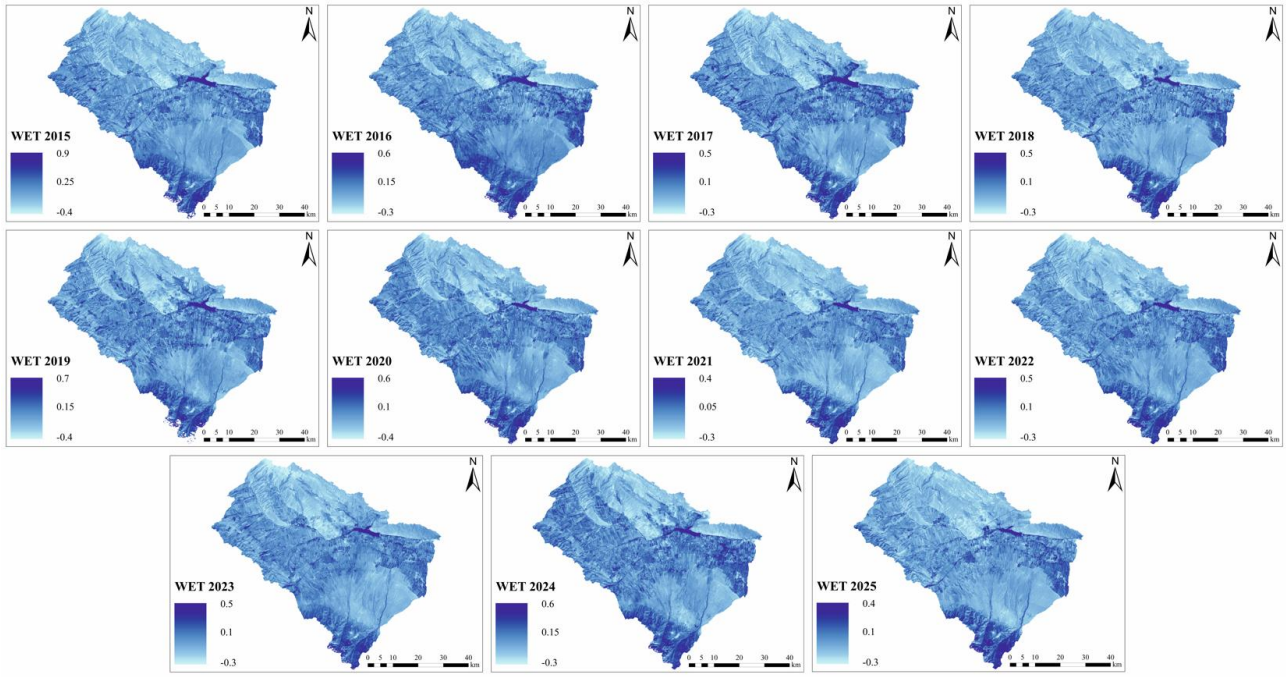


Рисунок 4. Пространственное распределение и межгодовая динамика индекса влажности поверхности (WET) в бассейне реки Терис за 2015-2025 гг.

В пространственном отношении наиболее высокие значения WET стабильно приурочены к русловой сети, прибрежным зонам и участкам с развитым сельскохозяйственным землепользованием, где наблюдается повышенная влажность почв и интенсивное орошение. Особенно чётко выражены зоны повышенных значений в северо-восточной части бассейна вдоль водотоков и водохранилища, что свидетельствует о влиянии гидрографической структуры на формирование локальных центров увлажнения. Центральная часть бассейна характеризуется умеренными значениями индекса, отражающими смешанный тип землепользования и сезонную зависимость влагообеспеченности. Наиболее низкие значения WET фиксируются в южных и юго-западных районах, представленных горными и предгорными ландшафтами, где рельефная расчленённость, поверхностный сток и ограниченная мощность почвенного покрова способствуют снижению накопления влаги.

Межгодовая динамика индекса демонстрирует относительную стабильность пространственного рисунка при варьировании интенсивности значений. В 2015-2017 гг. отмечаются сравнительно высокие показатели увлажнённости, что проявляется в более выраженных тёмно-синих оттенках на картах. В 2018 г. наблюдается некоторое снижение средних значений индекса, что может быть связано с изменением климатических условий или уменьшением объёмов влагонакопления. В 2019-2020 гг. фиксируется частичное восстановление уровня влажности, особенно в долинных участках. В 2021 г. прослеживается снижение интенсивности показателей, тогда как в 2022-2024 гг. влажностный режим вновь стабилизируется с сохранением пространственной структуры распределения. В 2025 г.

отмечается умеренное снижение значений индекса в отдельных частях бассейна, что может свидетельствовать о повышении засушливости или усилении антропогенной нагрузки.

В целом индекс WET отражает устойчивую зависимость влагообеспеченности от гидрографической сети, рельефа и характера землепользования. Пространственная конфигурация индекса остаётся относительно стабильной во времени, однако интенсивность показателей чувствительна к межгодовым климатическим колебаниям и хозяйственной деятельности. В структуре RSEI компонент влажности играет компенсирующую роль по отношению к тепловому и сухостному факторам, повышая интегральную оценку экологического состояния территорий с благоприятным водным режимом.

3.3. Изменение теплового состояния земной поверхности по данным LST

Анализ пространственно-временной динамики температуры земной поверхности (LST) в бассейне реки Терис за 2015-2025 гг. (рис. 5) позволил выявить выраженную орографическую и антропогенную обусловленность теплового режима территории. Индекс LST отражает интенсивность нагрева подстилающей поверхности и является отрицательным компонентом в структуре интегрального индекса RSEI, поскольку значительное повышение температуры, как правило, связано с деградацией растительного покрова, снижением влажности и усилением антропогенной трансформации ландшафтов.

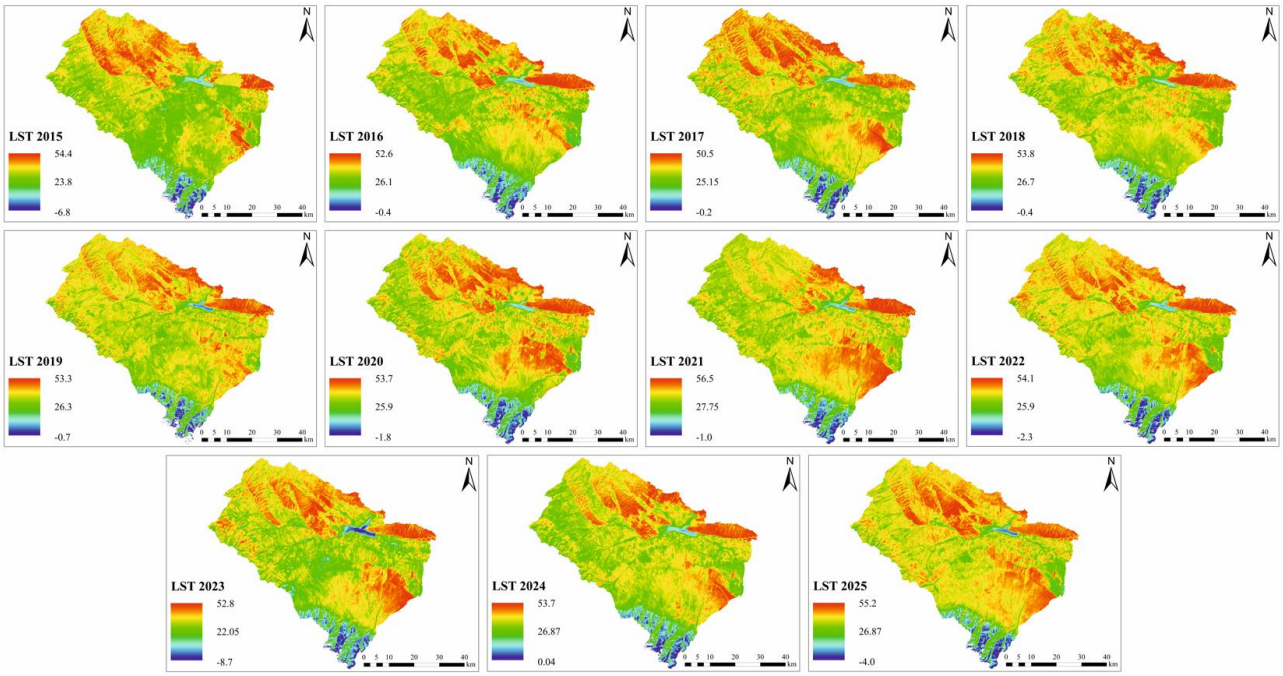


Рисунок 5. Пространственное распределение и межгодовая динамика температуры земной поверхности (LST) в бассейне реки Терис за 2015-2025 гг.

В пространственном отношении наиболее высокие значения LST устойчиво приурочены к северной и северо-восточной частям бассейна, а также к открытым участкам с разреженной растительностью и сельскохозяйственными угодьями. Эти зоны характеризуются повышенной инсоляцией и меньшей способностью поверхности к испарительному охлаждению. Центральная часть бассейна демонстрирует умеренные значения температуры, что связано с сочетанием растительного покрова и мозаичной структурой землепользования. Наиболее низкие значения LST стабильно фиксируются в южной горной части бассейна, где высотная зональность, большая мощность растительного покрова и повышенная влажность способствуют снижению температур поверхности.

Межгодовая динамика LST свидетельствует о колебательном характере теплового режима. В 2015-2017 гг. температурные показатели остаются относительно умеренными при

сохранении чёткой пространственной дифференциации. В 2018–2020 гг. наблюдается усиление температурных контрастов, особенно в северных и восточных районах, что может быть связано с засушливыми условиями и интенсификацией землепользования. В 2021 г. фиксируются одни из наиболее высоких значений температуры за анализируемый период, что свидетельствует о повышенной тепловой нагрузке на экосистемы. В 2022–2023 гг. отмечается некоторое снижение экстремальных значений, однако сохраняется устойчивая зона повышенного нагрева в сельскохозяйственных и открытых ландшафтах. В 2024–2025 гг. вновь прослеживается усиление тепловых аномалий в отдельных районах бассейна, что может указывать на продолжающееся влияние климатических факторов и антропогенного воздействия.

В целом пространственная конфигурация LST остаётся стабильной, однако интенсивность температурных показателей демонстрирует чувствительность к межгодовым климатическим вариациям и изменениям структуры землепользования. Повышенные значения LST коррелируют с пониженными показателями NDVI и WET, что подтверждает взаимосвязь теплового, влажностного и биопродуктивного состояния территории. В структуре RSEI компонент LST выполняет функцию индикатора теплового стресса и деградационных процессов, снижая интегральную оценку экологического состояния в зонах с повышенной температурой поверхности.

3.4. Пространственно-временные изменения сухости и антропогенной трансформации ландшафтов (NDBSI)

Анализ пространственно-временной динамики индекса NDBSI (Normalized Difference Built-up and Soil Index) в бассейне реки Терис за 2015-2025 гг. позволил выявить особенности распределения сухости поверхности и степени антропогенной трансформации ландшафтов. Индекс NDBSI интегрирует показатели застроенных территорий (NDBI) и оголённых почв (SI), отражая долю открытых, малопродуктивных и техногенно нарушенных поверхностей. В структуре RSEI данный показатель относится к негативным факторам и интерпретируется как индикатор экологического давления: увеличение его значений свидетельствует о росте сухости, деградации растительного покрова и усилении антропогенной нагрузки.

В пространственном отношении повышенные значения NDBSI устойчиво приурочены к северной и северо-восточной частям бассейна, а также к районам с развитым сельскохозяйственным использованием и фрагментированной структурой землепользования. Эти территории характеризуются преобладанием открытых почв, распаханных земель и разреженной растительности, что обусловливает более высокие значения индекса. Центральная часть бассейна демонстрирует умеренные значения, отражающие мозаичное сочетание сельскохозяйственных угодий и участков с сохранённым растительным покровом. Минимальные значения NDBSI фиксируются преимущественно в южной горной зоне, где плотный растительный покров и более высокая влажность способствуют снижению показателя сухости.

Межгодовая динамика индекса указывает на относительную устойчивость пространственной структуры сухости при вариациях интенсивности значений. В 2015-2018 гг. наблюдается равномерное распределение повышенных значений по большей части бассейна, что может быть связано с климатическими условиями засушливого типа и активным использованием земель. В 2019-2021 гг. прослеживаются локальные колебания индекса, особенно в центральных и восточных районах, отражающие изменение состояния почвенного покрова и сельскохозяйственной нагрузки. В 2022-2025 гг. сохраняется тенденция к повышенным значениям в северной части бассейна, тогда как горные территории остаются относительно стабильными и менее подверженными антропогенной трансформации.

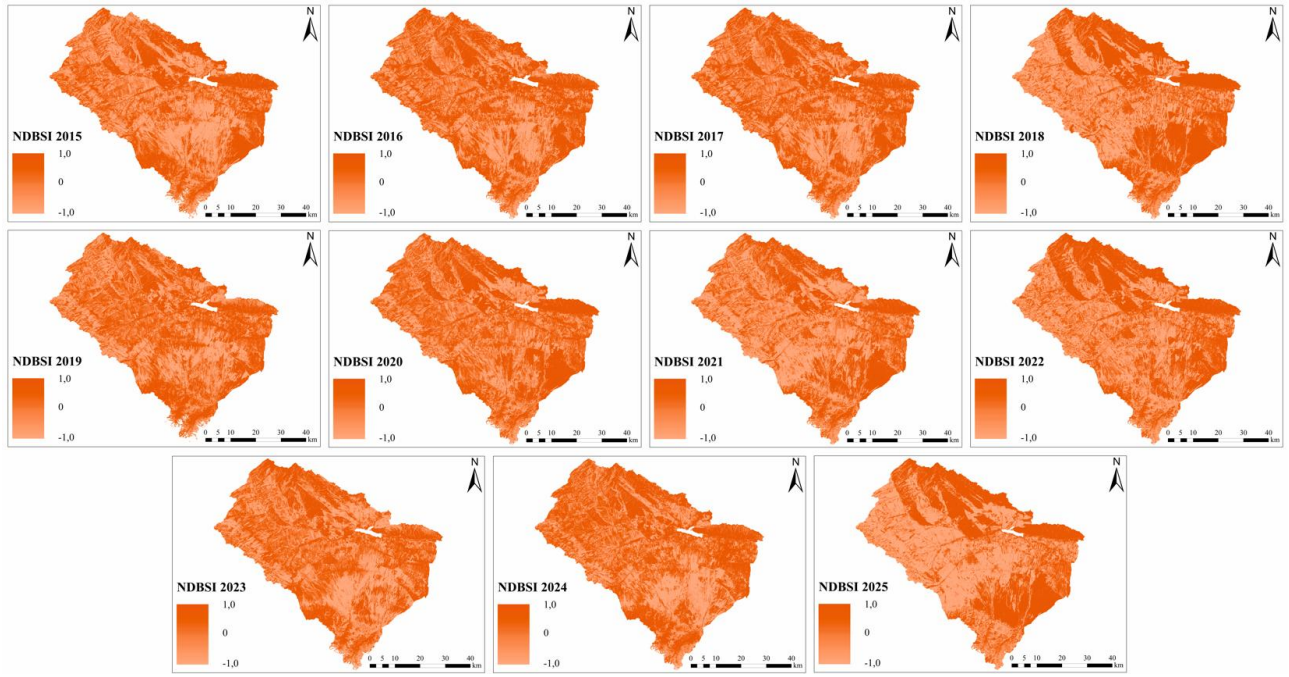


Рисунок 6. NDBSI (2015-2025)

Сопоставление NDBSI с другими компонентами RSEI показывает его обратную корреляцию с NDVI и WET: участки с высокой сухостью и оголёнными почвами характеризуются пониженной биопродуктивностью и меньшей влажностью поверхности. В совокупности это подтверждает, что NDBSI эффективно отражает процессы деградации земель, снижение растительного покрова и рост антропогенной нагрузки. Таким образом, индекс NDBSI является ключевым индикатором пространственно-временных изменений сухости и трансформации ландшафтов в пределах бассейна реки Терис и играет важную роль в формировании интегральной оценки экологического состояния по индексу RSEI.

3.5. Пространственно-временная динамика интегрального экологического состояния по индексу RSEI

Анализ пространственно-временной динамики первой главной компоненты (PC1), полученной методом главных компонент при интеграции NDVI, WET, LST и NDBSI, позволяет оценить совокупное влияние природных и антропогенных факторов на экологическое состояние бассейна реки Терис в 2015–2025 гг (рис. 7). Первая главная компонента аккумулирует наибольшую долю дисперсии исходных нормализованных показателей и отражает интегральный экологический градиент: более высокие значения соответствуют лучшему состоянию среды (высокая биопродуктивность и влажность при низкой температуре и сухости), тогда как пониженные значения характеризуют участки с повышенной антропогенной нагрузкой и деградацией ландшафтов.

В пространственном отношении положительные значения PC1 преимущественно приурочены к южной горной части бассейна и отдельным участкам северо-западной территории, где сохраняется более высокий уровень растительного покрова и благоприятный гидротермический режим. Отрицательные значения концентрируются в центральных и северо-восточных районах, характеризующихся более выраженной сельскохозяйственной освоенностью, фрагментацией ландшафтов и повышенными показателями сухости и температуры поверхности. Таким образом, PC1 чётко отражает морфоструктурную дифференциацию территории и различия в интенсивности антропогенного воздействия.

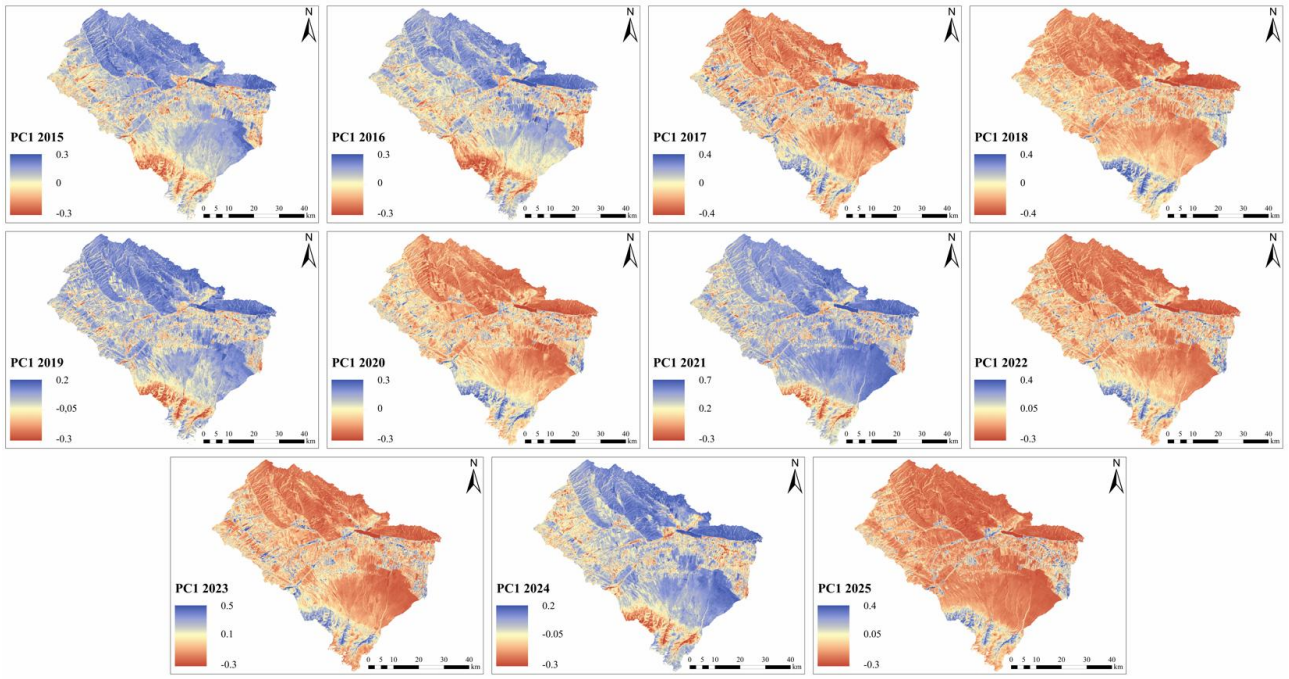


Рисунок 7. PC1 (2015-2025)

Межгодовая динамика PC1 демонстрирует чередование фаз относительного улучшения и ухудшения экологического состояния. В 2015–2016 гг. положительные значения доминируют в северной и центральной частях бассейна, что указывает на сравнительно благоприятные условия. В 2017–2018 гг. отмечается расширение зон с отрицательными значениями, особенно в северных районах, что может свидетельствовать о росте сухости и температурной нагрузки. В 2019 г. наблюдается частичное восстановление положительных значений, тогда как 2020 г. характеризуется усилением негативных тенденций в центральной части бассейна. В 2021 г. фиксируется выраженное улучшение интегральных показателей, отражённое в расширении зон с высокими значениями PC1, однако в 2022–2023 гг. вновь прослеживается преобладание отрицательных значений. В 2024 г. отмечается стабилизация и локальное улучшение экологического состояния, тогда как в 2025 г. наблюдается тенденция к снижению интегральных показателей в северной и центральной частях бассейна.

Полученные результаты подтверждают, что PC1 эффективно интегрирует разнонаправленные компоненты экологической среды и служит основой для формирования индекса RSEI. Пространственная структура PC1 отражает как природно-географические особенности (высотную поясность и климатическую дифференциацию), так и степень хозяйственного освоения территории. Таким образом, анализ PC1 позволяет выявить ключевые зоны экологической уязвимости и определить направления дальнейшего мониторинга и управления природопользованием в пределах бассейна реки Терис.

Анализ пространственно-временной динамики площадного распределения классов RSEI в бассейне реки Терис за 2015–2025 гг. (рис. 8-9; табл. 3) подтверждает выраженную неоднородность экологического состояния территории и его высокую межгодовую вариабельность. Во все годы структура индекса формируется преимущественно классами «ниже среднего» и «средний», совокупная доля которых варьирует от 61,37 % (2025 г.) до 80,71 % (2019 г.).

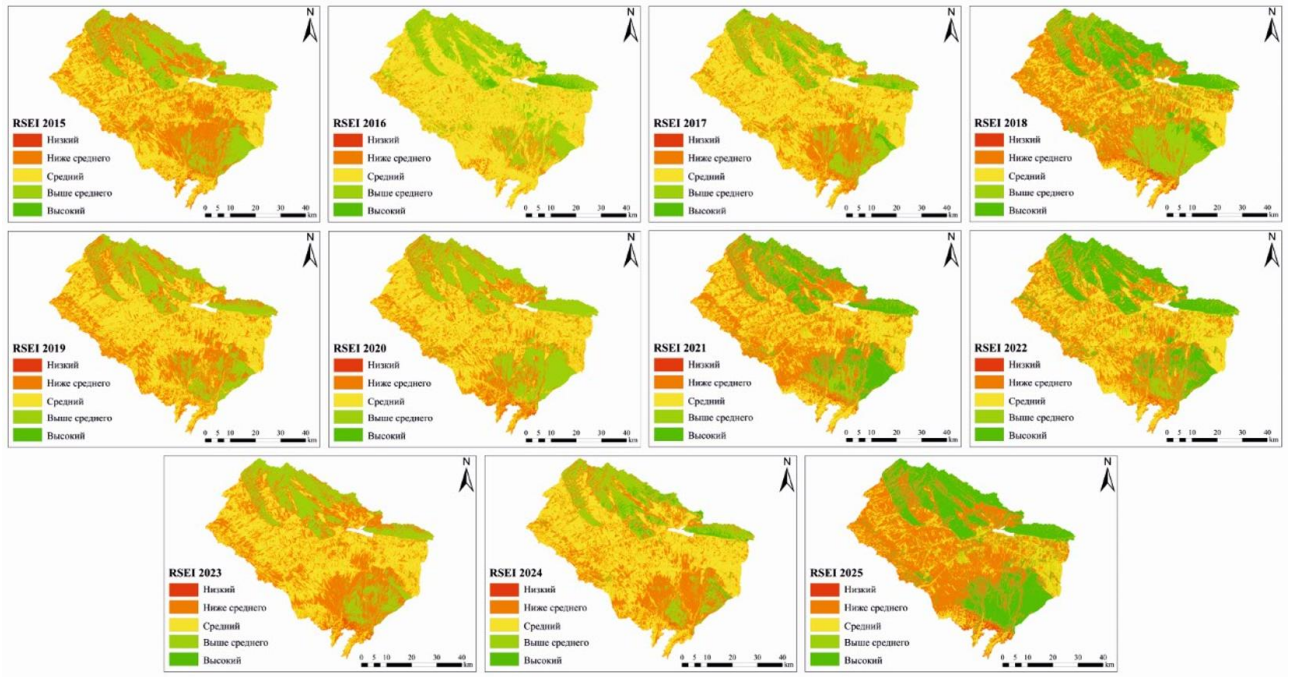


Рисунок 8. RSEI (2015-2025)

Класс «ниже среднего» в большинстве лет занимает наибольшие площади. В 2015 г. его доля составила 43,88 % (87 957,4 га), в 2018 г. – 40,87 % (81 933,4 га), в 2021 г. – 42,41 % (85 007,9 га), а максимальное значение зафиксировано в 2025 г. – 47,51 % (95 248,6 га). Минимальная доля отмечена в 2016 г. – 13,26 % (26 583,4 га), что связано с перераспределением территории в пользу класса «средний». Пространственно данные участки приурочены к центральной и южной частям бассейна и характеризуются фрагментарным распространением. Их доминирование отражает зоны интенсивного сельскохозяйственного освоения и пастбищной нагрузки, что подтверждает связь пониженных значений RSEI с антропогенной трансформацией ландшафтов.

Класс «средний» демонстрирует наибольшую межгодовую амплитуду изменений. Его максимальная доля зафиксирована в 2016 г. – 56,87 % (114 009,4 га), высокие значения также отмечены в 2017 г. – 45,15 % (90 406,1 га), 2019 г. – 41,86 % (83 916,3 га) и 2024 г. – 42,61 % (85 420,1 га). Минимальное значение наблюдается в 2025 г. – 13,86 % (27 781,6 га), что свидетельствует о перераспределении площади в сторону крайних классов. Пространственный анализ показывает, что расширение этого класса сопровождается формированием более сбалансированного водно-теплового режима и относительной стабилизацией растительного покрова.

Классы «выше среднего» и «высокий» занимают меньшие площади, однако их динамика имеет принципиальное диагностическое значение. Доля класса «выше среднего» колеблется от 3,08 % (6 171,3 га) в 2025 г. до 27,85 % (55 826,7 га) в 2020 г. Значительные площади также зафиксированы в 2016 г. – 26,22 % (52 548,6 га) и в 2015 г. – 22,03 % (44 110 га). Класс «высокий» демонстрирует резкие колебания: в 2015 г. его доля составляла 0,81 % (1 620,3 га), в 2016–2017 гг. – около 3,6–3,8 %, в 2018 г. – 16,96 % (34 007,3 га), в 2019–2020 гг. практически отсутствовал (0,05 %), затем резко увеличился в 2021 г. до 20,55 % (41 129,7 га), в 2022 г. – до 26,33 % (52 790,6 га), и достиг максимума в 2025 г. – 34,29 % (68 564,4 га). Пространственно эти территории локализованы в пойменных зонах, орошаемых землях и в горных районах с устойчивым растительным покровом.

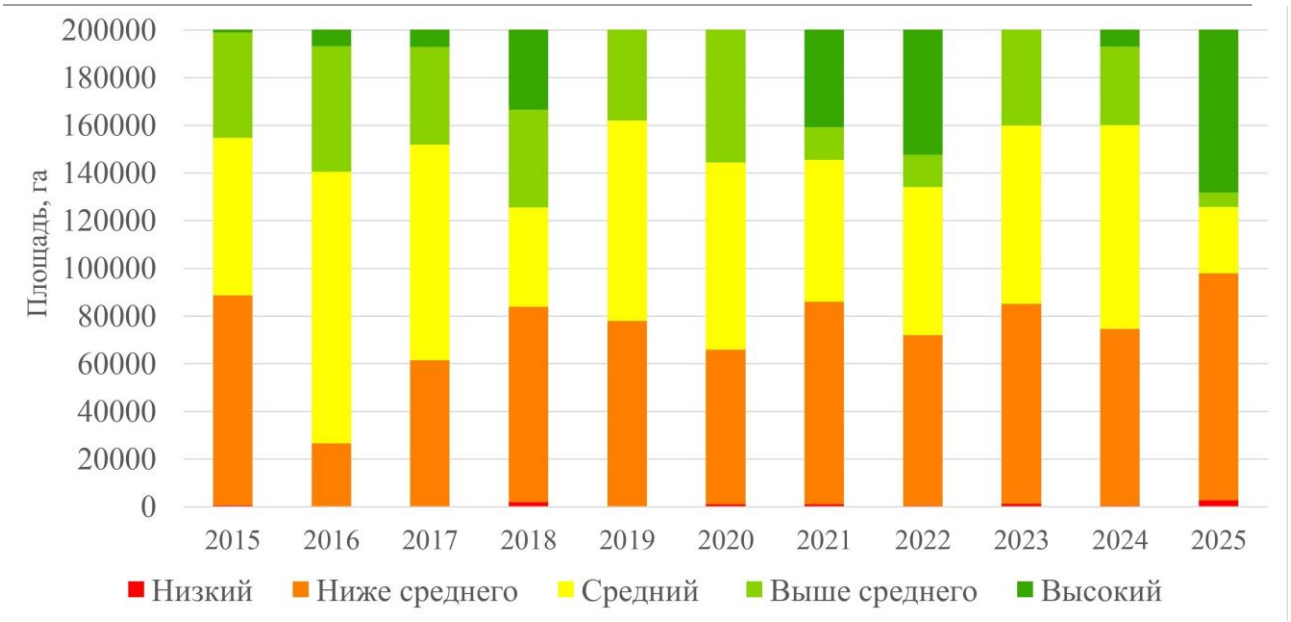


Рисунок 9. Динамика изменения площадей классов RSEI

Класс «низкий» во все годы занимает минимальные площади, однако его динамика отражает формирование очагов неблагоприятного экологического состояния. Минимальное значение зафиксировано в 2016 г. – 0,02 % (33,7 га), тогда как в 2018 г. его доля увеличилась до 1,03 % (2 059,1 га), в 2020–2021 гг. составляла 0,54 %, а в 2025 г. достигла максимума – 1,35 % (2 698,5 га). Пространственно данные участки представлены локальными очагами, совпадающими с зонами интенсивного землепользования и деградированных земель, что указывает на формирование участков повышенной экологической уязвимости.

Таблица 2. Площадное распределение классов RSEI по годам в бассейне реки Терис

Год	Низкий		Ниже среднего		Средний		Выше среднего		Высокий	
	площадь, га	%	площадь, га	%	площадь, га	%	площадь, га	%	площадь, га	%
2015	716,4	0,36	87 957,40	43,88	66 060,30	32,95	44 110,00	22	1 620,30	0,81
2016	33,7	0,02	26 583,40	13,26	114 009,40	56,87	52 548,60	26,21	7 289,30	3,64
2017	257,8	0,13	61 218,60	30,54	90 406,10	45,1	40 967,70	20,44	7 614,20	3,8
2018	2 059,10	1,03	81 933,40	40,87	41 550,90	20,73	40 913,70	20,41	34 007,30	16,96
2019	249,6	0,12	77 871,50	38,85	83 916,30	41,86	38 330,80	19,12	96,2	0,05
2020	1 091,70	0,54	64 813,90	32,33	78 635,80	39,23	55 826,70	27,85	96,3	0,05
2021	1 079,30	0,54	85 007,90	42,41	59 504,30	29,68	13 680,20	6,82	41 192,70	20,55
2022	536,9	0,27	71 492,70	35,66	62 069,30	30,96	13 574,90	6,77	52 790,60	26,33
2023	1 341,40	0,67	83 843,50	41,82	74 843,90	37,34	40 228,20	20,07	207,4	0,1
2024	529	0,26	74 230,20	37,03	85 420,10	42,61	32 954,70	16,44	7 330,40	3,66
2025	2 698,50	1,35	95 248,60	47,51	27 781,60	13,86	6 171,30	3,08	68 564,40	34,2

В целом экологическое состояние бассейна реки Терис характеризуется мозаичностью и высокой динамичностью. Наиболее благоприятными по интегральным показателям можно считать 2021–2022 и 2025 гг., когда суммарная доля классов «выше среднего» и «высокий»

достигала 27,37 %, 33,10 % и 37,28 % соответственно. Наиболее напряжённая экологическая ситуация отмечена в 2015, 2018 и 2023 гг., когда совокупная доля классов «низкий» и «ниже среднего» достигала 44,24 %, 41,90 % и 42,49 % соответственно.

Результаты непараметрического теста Манна–Кендалла и оценки наклона Сена показали отсутствие статистически значимых трендов для большинства классов RSEI ($p > 0,05$), что свидетельствует о преобладании межгодовой вариабельности над устойчивыми долговременными изменениями. Вместе с тем для класса «выше среднего» выявлен статистически значимый отрицательный тренд ($\tau = -0,60$; $p = 0,01$), отражающий сокращение площади территорий с относительно благоприятным экологическим состоянием (табл. 4).

Таблица 3. Результаты теста Манна–Кендалла и оценки наклона Сена для временных рядов площадей классов RSEI

Класс RSEI	Kendall's τ	p-value	Sen's slope	Интерпретация
Низкий	0,33	0,16	0,042	статистически незначимый рост
Ниже среднего	0,27	0,283	0,949	статистически незначимый рост
Средний	-0,27	0,283	-1,620	статистически незначимое снижение
Выше среднего	-0,60	0,01	-1,230	статистически значимое снижение
Высокий	0,33	0,16	1,495	статистически незначимый рост

4. Обсуждение

Применение интегрального индекса RSEI для оценки экологического состояния бассейна реки Терис соответствует современным методологическим подходам, широко представленным в публикациях, индексируемых в Scopus и Web of Science. Методика RSEI, предложенная Xu и соавторами, основана на интеграции ключевых компонентов поверхности – растительности (NDVI), влажности (WET), температуры поверхности (LST) и сухости/антропогенной нагрузки (NDBSI) – путём применения метода главных компонент (PCA) для получения единой оценки экологического качества (Xu et al., 2019).

Результаты исследования бассейна Терис выявляют доминирование классов «ниже среднего» и «средний» в структуре экологического состояния, что согласуется с выводами (Zhang et al., 2021), которые показали, что подобные категории отражают зоны умеренного нарушения природной среды при устойчивой хозяйственной нагрузке.

Высокая межгодовая изменчивость RSEI также найдена в работах по оценке экологической динамики в условиях климатической изменчивости. Исследования демонстрируют, что сезонность и фенологические колебания растительности оказывают существенное влияние на значения индекса, что подчёркивает необходимость унификации временных интервалов при сравнительных исследованиях (Maimaitituersun et al., 2025; Zhang et al., 2021).

Несмотря на широкое применение и относительную простоту расчётов, индекс RSEI обладает рядом ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов. Во-первых, RSEI чувствителен к природно-ландшафтным условиям, не связанным непосредственно с антропогенным воздействием (Tang et al., 2024).

Во-вторых, RSEI не позволяет однозначно разделить вклад природных факторов и антропогенной деятельности, поскольку он отражает интегральное состояние ландшафта без выделения причинно-следственных факторов. Это особенно важно для территорий с выраженной природной неоднородностью, таких как горно-предгорные регионы.

Третье ограничение связано с зависимостью результатов от временного интервала анализа и сезонности данных. Различия в гидрологическом режиме, климатические колебания и межгодовая изменчивость фенологии растительности могут приводить к изменению значений индекса, если даты съёмки не сопоставимы по сезонам. Maimaitituersun et al. (2025) подчёркивают, что это может приводить к ошибочному выводу о долгосрочных тенденциях, если не учитывать сезонный компонент.

Кроме того, RSEI чувствителен к способу нормализации и параметрам PCA. Поскольку интегральный индекс формируется на основе первой главной компоненты, его значение может варьироваться в зависимости от набора исходных показателей, статистических характеристик выборки и границ анализируемой территории, что осложняет прямое сравнение между разными регионами и исследованиями.

Наконец, индекс RSEI, будучи интегральной оценкой, не включает социально-экономические и управленческие параметры (плотность населения, структура землепользования, меры охраны природы), что ограничивает его применение для причинно-следственного анализа изменений экологического состояния. В отличие от концептуальных моделей PSR или DPSIR (Driving forces–Pressure–State–Impact–Response), RSEI не отражает конкретные драйверы изменений, а предоставляет лишь обобщённую картину устойчивости или напряжённости экосистемных процессов.

Следует отметить, что интерпретация причин выявленных пространственно-временных изменений основывается преимущественно на анализе спутниковых индексов и пространственных закономерностей без прямого привлечения независимых климатических и социально-экономических данных. Поэтому выводы о роли антропогенных и климатических факторов носят вероятностный характер. В дальнейшем целесообразна интеграция данных о количестве осадков, температурных аномалиях и структуре землепользования для более детального анализа факторов динамики RSEI.

5. Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что экологическое состояние бассейна реки Терис в 2015-2025 гг. характеризуется выраженной пространственной дифференциацией и высокой межгодовой изменчивостью. На основе интегрального индекса RSEI выявлено доминирование территорий с умеренно пониженным и средним уровнем экологического качества, формирующих основной фоновый тип ландшафтов бассейна.

Определено, что пониженные значения экологического состояния пространственно приурочены к центральным и сельскохозяйственно освоенным районам, где фиксируются повышенные значения сухости поверхности и тепловой нагрузки при сниженных показателях растительного покрова и влажности. В то же время горные и пойменные территории характеризуются более благоприятными экологическими условиями, что подтверждается повышенными значениями NDVI и WET и пониженными значениями LST и NDBSI.

Установлена значительная межгодовая вариабельность площадей классов RSEI. Максимальная доля класса «средний» зафиксирована в 2016 г. (56,87 %), тогда как в 2025 г. отмечено существенное увеличение площади класса «высокий» (34,20 %), отражающее локальное улучшение экологического состояния. Зоны с критически низкими значениями индекса занимают ограниченные площади (до 1,35 %), однако их пространственная локализация совпадает с участками интенсивного землепользования и деградированных земель.

Результаты непараметрического анализа Манна-Кендалла и оценки наклона Сена показали отсутствие статистически значимых трендов для большинства классов RSEI, что свидетельствует о преобладании межгодовой вариабельности над устойчивыми долговременными изменениями. Вместе с тем для класса «выше среднего» выявлен статистически значимый отрицательный тренд, отражающий сокращение площади территорий с относительно благоприятным экологическим состоянием.

Полученные результаты подтверждают высокую информативность индекса RSEI для выявления пространственных контрастов экологического состояния, анализа его динамики и оценки экологически уязвимых территорий в пределах бассейновых геосистем полузасушливых регионов.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация - Қ.Қ., Т.У., Е.М.; методология - Қ.Қ., Б.Д., Т.У.; программное обеспечение - Қ.Қ., Т.У.; валидация - Қ.Қ., Т.У.; формальный анализ - Қ.Қ.; исследование - Қ.Қ., Е.М.; ресурсы - Қ.Қ.; курирование данных - Қ.Қ., Т.У.; написание – подготовка оригинального черновика - Қ.Қ., Б.Д., Т.У., И.Р., Е.М.; написание – рецензирование и редактирование - Қ.Қ.; визуализация - Қ.Қ.; руководство - Қ.Қ.; администрирование проекта - Қ.Қ; получение финансирования - Қ.Қ., Б.Д., Т.У., И.Р., Е.М. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи».

8. Информация об авторах

Қырғызбай, Құдайберген – PhD, ведущий научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (КБТУ), улица Толе Би, 59, Алматы, Казахстан, 050000; доцент-исследователь кафедры картографии и геоинформатики, факультет географии и природопользования, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; kyrgyzbay.kudaibergen@kbtu-edu.kz, kyrgyzbay.K@kaznu.kz, kyrgyzbay.kudaibergen@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4279-6436

Дүйсебек, Бақтыбек – PhD, ведущий научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (КБТУ), улица Толе Би, 59, Алматы, Казахстан, 050000; b.duisebek@kbtu.kz, https://orcid.org/0000-0002-2596-4936

Усманов, Талгат – научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (КБТУ), улица Толе Би, 59, Алматы, Казахстан, 050000; talgat.usmanov@kbtu-edu.kz, https://orcid.org/0009-0005-1882-4272

Рахметов, Иса – научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (КБТУ), улица Толе Би, 59, Алматы, Казахстан, 050000; Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина, Алматы, Казахстан, 050010; issa.rakhmetov@kbtu.kz, issaraqmet@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6269-7734

Муканов, Ерболат – PhD, ведущий научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (КБТУ), улица Толе Би, 59, Алматы, Казахстан, 050000; старший преподаватель, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; yerbulat.mukanov@kbtu-edu.kz, mukanov_yen@enu.kz, https://orcid.org/0009-0003-3132-6388

9. Финансирование: Исследование выполнено в рамках проекта программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан «Инновации снижения последствий наводнений-засух с гидрогеологическими стратегиями управляемого пополнения водоносных горизонтов для Жамбылской, Алматинской, Жетысуской, Абайской и Восточно-Казахстанской областей» (ИРН: BR27197639).

10. Благодарности: Авторы выражают благодарность платформе Google Earth Engine за предоставление доступа к архивам данных дистанционного зондирования Земли и вычислительным ресурсам, использованным при обработке и анализе спутниковых данных. Особая признательность выражается программе Landsat (NASA/USGS) за открытые данные

спутников Landsat 8 и Landsat 9, которые послужили основой для расчёта экологических индексов и формирования временных рядов.

11. Конфликты интересов: нет конфликта интересов

12. Список литературы

1. Aizizi, Y., Kasimu, A., Liang, H., Zhang, X., Wei, B., Zhao, Y., & Ainiwaer, M. (2023). Evaluation of ecological quality status and changing trend in arid land based on the remote sensing ecological index: A case study in Xinjiang, China. *Forests*, 14(9), 1830. https://doi.org/10.3390/f14091830
2. Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423–431. https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434
3. Crist, E. P., & Cicone, R. C. (1984). A physically-based transformation of Thematic Mapper data: The TM tasseled cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(3), 256–263. https://doi.org/10.1109/TGRS.1984.350619
4. De Araujo Barbosa, C. C., Atkinson, P. M., & Dearing, J. A. (2015). Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, 52, 430–443. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.01.007
5. European Space Agency. (2024). *Sentinel-2 mission*. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
6. Esri. (2024). *An overview of the Hydrology tools: ArcGIS Desktop Documentation*. https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm
7. 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
8. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031
9. Hasan, M. M., Ferdous, M. T., Talha, M., Mojumder, P., Roy, S. K., Zim, M. N. F., Akter, M. M., Nasher, N. M. R., Hasher, F. F. B., Boltižiar, M., & Zhran, M. (2025). Analyzing ecological environmental quality trends in Dhaka through remote sensing based ecological index (RSEI). *Land*, 14(6), 1258. https://doi.org/10.3390/land14061258
10. Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4th ed.). Charles Griffin.
11. Kennedy, R. E., Andréfouët, S., Cohen, W. B., Gómez, C., Griffiths, P., Hais, M., Healey, S. P., Helmer, E. H., Hostert, P., Lyons, M. B., Meigs, G. W., Pflugmacher, D., Phinn, S. R., Powell, S. L., Scarth, P., Sen, S., Schroeder, T. A., Schneider, A., Sonnenschein, R., & Zhu, Z. (2014). Bringing an ecological view of change to Landsat-based remote sensing. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(6), 339–346. https://doi.org/10.1890/130066
12. Kwok, R. (2018). Ecology's remote-sensing revolution. *Nature, 556*(7699), 137–138. https://doi.org/10.1038/d41586-018-03924-9
13. Liu, P., Wen, T., Han, R., & Wu, S. (2025). Study on RSEI changes using remote sensing and Markov-FLUS modeling approach. *Sustainability*, 17(22), 10267. https://doi.org/10.3390/su172210267
14. Liu, S., Liu, L., Wu, X., Hou, X., Zhao, S., & Liu, G. (2018). Quantitative evaluation of human activity intensity on the regional ecological impact studies. *Acta Ecologica Sinica*, 38(19). https://doi.org/10.5846/stxb201711172048

15. Liu, Y., Zhou, T., & Yu, W. (2024). Analysis of changes in ecological environment quality and influencing factors in Chongqing based on a remote-sensing ecological index mode. *Land*, 13(2), 227. https://doi.org/10.3390/land13020227
16. Maimaitituersun, A., Yang, H., Aobuliaisan, N., Maimaitiaili, K., & Chenyu, O. (2025). Assessing subtle changes in arid land river basin ecological quality: A study utilizing the PIE engine platform and RSEI. *Ecological Indicators*, 170, 113035. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.113035
17. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
18. Mueller, L., Saparov, A., & Lischeid, G. (Eds.). (2014). *Novel measurement and assessment tools for monitoring and management of land and water resources in agricultural landscapes of Central Asia*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01017-5
19. Ning, L., Jiayao, W., & Fen, Q. (2020). The improvement of ecological environment index model RSEI. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(11), 403. https://doi.org/10.1007/s12517-020-05414-7
20. Reza, M. I. H., & Abdullah, S. A. (2011). Regional index of ecological integrity: A need for sustainable management of natural resources. *Ecological Indicators*, 11(2), 220–229. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.08.010
21. Rikimaru, A., Roy, P. S., & Miyatake, S. (2002). *Tropical forest cover density mapping*. ITTO Technical Report.
22. Saparov, K. T., Shakhantayeva, Z. R., & Yeginbayeva, A. Y. (2023). System of hydrographic terms of the Zhambyl region. *Journal of Geography, Politics and Society*, 13(4), 40–48. https://doi.org/10.26881/jpgs.2023.4.04
23. Saparov, K., Shakhantayeva, Z., & Yeginbayeva, A. (2023). Reflection of the names of artificial and natural water sources in the study of microhydronyms of Zhambyl region. *Bulletin of the L. N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series*, 143(2), 79–89. https://doi.org/10.32523/2616-6771-2023-143-2-79-89
24. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
25. Tang, Q., Hua, L., Tang, J., Jiang, L., Wang, Q., Cao, Y., Wang, T., & Cai, C. (2024). Advancing ecological quality assessment in China: Introducing the ARSEI and identifying key regional drivers. *Ecological Indicators*, 163, 112109. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112109
26. Main Administration of Geodesy and Cartography of the USSR. (n.d.). *Topographic map at a scale of 1:200,000: Sheets K-42-11, K-42-12, K-42-17, K-42-18*. https://maps.vlasenko.net/smtm200/k-42-12.jpg
27. United Nations. (2024). *Sustainable Development Goals Report 2024*. United Nations. https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/
28. U.S. Geological Survey. (2024). *Landsat Collection 2 Level-2 Science Products*. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products
29. U.S. Geological Survey. (2024). *Landsat 8–9 Collection 2 Level-2 Science Product Guide*. https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-collection-2-level-2-science-product-guide
30. Wang, H., Tang, L., Qiu, Q., & Chen, H. (2020). Assessing the impacts of urban expansion on habitat quality by combining the concepts of land use, landscape, and habitat in two urban agglomerations in China. *Sustainability*, 12(11), 4346. https://doi.org/10.3390/su12114346
31. Wang, J., Lin, Y., Zhai, T., He, T., Qi, Y., Jin, Z., & Cai, Y. (2018). The role of human activity in decreasing ecologically sound land use in China. *Land Degradation & Development*, 29(3), 446–460. https://doi.org/10.1002/ldr.2874
32. Wang, L., Tian, F., Wang, X., Yang, Y., & Wei, Z. (2020). Attribution of the land surface temperature response to land-use conversions from bare land. *Global and Planetary Change*, 193, 103268. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103268
33. Wikipedia contributors. (2024). *Teris River*. Wikipedia. https://ru.wikipedia.org/wiki/Терис_(река)

34. Wikipedia contributors. (2024). *Asy River*. Wikipedia. https://ru.wikipedia.org/wiki/Асы_(река)
35. Willis, K. S. (2015). Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biological Conservation*, 182, 233–242. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.12.006
36. Wolters, M. L., Sun, Z., Huang, C., & Kuenzer, C. (2016). Environmental awareness and vulnerability in the Yellow River Delta: Results based on a comprehensive household survey. *Ocean & Coastal Management*, 120, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.009
37. Wu, S., Gao, X., Lei, J., Zhou, N., Guo, Z., & Shang, B. (2022). Ecological environment quality evaluation of the Sahel region in Africa based on remote sensing ecological index. *Journal of Arid Land*, 14(1), 14–33. https://doi.org/10.1007/s40333-022-0057-1
38. Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4269–4276. https://doi.org/10.1080/01431160802039957
39. Xu, H. (2013). A remote sensing urban ecological index and its application. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 7853–7862. https://doi.org/10.5846/stxb201208301223
40. Xu, H., Wang, M., Shi, T., Guan, H., Fang, C., & Lin, Z. (2018). Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI). *Ecological Indicators*, 93, 730–740. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.055
41. Xu, H., Wang, Y., Guan, H., Shi, T., & Hu, X. (2019). Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis. *Remote Sensing*, 11(20), 2345. https://doi.org/10.3390/rs11202345
42. Xu, H., Shi, T., Wang, M., & Lin, Z. (2017). Land cover changes in the Xiong'an New Area and a prediction of ecological response to forthcoming regional planning. *Acta Ecologica Sinica*. https://doi.org/10.5846/stxb201705210941
43. Yang, H., Yu, J., Xu, W., Wu, Y., Lei, X., Ye, J., Geng, J., & Ding, Z. (2023). Long-time series ecological environment quality monitoring and cause analysis in the Dianchi Lake Basin, China. *Ecological Indicators*, 148, 110084. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110084
44. Yue, H., Liu, Y., Li, Y., & Lu, Y. (2019). Eco-environmental quality assessment in China's 35 major cities based on remote sensing ecological index. *IEEE Access*, 7, 51295–51311. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911627
45. Zhang, T., Yang, R., Yang, Y., Li, L., & Chen, L. (2021). Assessing the urban eco-environmental quality by the remote-sensing ecological index: Application to Tianjin, North China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(7), 475. https://doi.org/10.3390/ijgi10070475

Жерді қашықтықтан зондтау деректерінің негізінде Терiс өзенінің бассейніндегі экологиялық жағдайды және антропогендік әсерді бағалау (Жамбыл облысы)

Құдайберген Қырғызбай, Бақтыбек Дүйсебек, Талгат Усманов, Иса Рахметов, Ерболат Муканов

Аңдатпа: Мақалада 2015-2025 жылдардағы Жерді қашықтықтан зондтаудың көпжылдық деректері негізінде Терiс өзені бассейнінің (Жамбыл облысы) экологиялық жағдайы мен антропогендік әсер ету деңгейінің кеңістіктік-уақыттық бағалауы ұсынылған. Зерттеудің ақпараттық негізіне Google Earth Engine ортасында атмосфералық түзету коэффициенттерін, бұлттылықтан тазарту және спектрлік көрсеткіштерді қалыпқа келтіруді қолдану арқылы анықталған Landsat 8 және 9 (Collection 2 Level 2) ғарыштық түсірілімдері жатады. Геожүйелердің негізгі компоненттерін сандық сипаттау үшін NDVI (өсімдік жамылғысы), WET (Tasseled Cap конверсиясының ылғалдылық компоненті), LST (жер бетінің

температурасы) және NDBSI (құрғақтық және антропогендік трансформация дәрежесі) индекстері есептеледі. Стандартталған индикаторлардың интеграциясы негізгі компоненттер әдісімен жүзеге асырылып, RSEI экологиялық жағдайының интегралды индексі қалыптасты.
Алынған нәтижелер айқын кеңістіктік дифференциацияны және экологиялық жағдайлардың жоғары жылдық өзгергіштігін көрсетеді. Зерттеу кезеңінде аумақтың құрылымында «ортадан төмен» және «орта» сыныптар басым болып, жиынтық үлесі көптеген жылдары 70 %-дан асады. «Орта» класының ең үлкен үлесі 2016 жылы тіркелген (56,88 %), ал 2025 жылы экологиялық жағдайдың жергілікті жақсаруын көрсететін «жоғары» класының айтарлықтай артуы (34,29 %) анықталды. RSEI мәндері төмен аймақтар шектеулі аумақтарды қамтып (1,34 % дейін), қарқынды жер пайдалану және тозған жерлер учаскелерімен шектелген.
Ең қолайлы экологиялық жағдайлар таулы және жайылмалы ландшафттарға тән, ал орталық және ауыл шаруашылығы дамыған аудандар интегралдық көрсеткіштердің төмендеуін көрсетеді. Зерттеу нәтижелері RSEI индексінің экологиялық жағдай динамикасын бақылауда және жартылай құрғақ аймақтардың бассейндік геожүйелеріндегі антропогендік жүктемені бағалауда интегралдық құралы ретіндегі әдістемелік жоғары нәтижелерге ие екендігін айқындайды.

Түйін сөздер: RSEI; Жерді қашықтықтан зондтау; антропогендік әсер; экологиялық жағдай; Теріс өзенінің бассейні.

Assessment of ecological condition and anthropogenic impact in the Teris River basin based on remote sensing data (Zhambyl region)

Kudaibergen Kyrgyzbay, Baktybek Duisebek, Talgat Usmanov, Isa Rakhmetov, Yerbolat Mukanov

Abstract: The paper presents a spatiotemporal assessment of the ecological state and the level of anthropogenic impact in the Teris River basin (Zhambyl region) based on long-term data from remote sensing for 2015-2025. The information basis of the study was the satellite data of Landsat 8 and 9 (Collection 2 Level 2), processed in the Google Earth Engine environment using atmospheric correction procedures, cloud masking and normalization of spectral indicators. To quantify the key components of geosystems, the NDVI (vegetation), WET (moisture component of the Tasseled Cap transformation), LST (temperature of the Earth's surface) and NDBSI (dryness and degree of anthropogenic transformation) indices were calculated. The integration of standardized indicators was carried out using the principal component method, followed by the formation of an integrated environmental status index (RSEI).
The results obtained indicate a pronounced spatial differentiation and high interannual variability of environmental conditions. Throughout the entire study period, the structure of the territory was dominated by the «below average» and «average» classes, the combined share of which exceeded 70 % in most years. The largest share of the «medium» class was recorded in 2016 (56.88%), while in 2025 there was a significant expansion of the «high» class (34.29 %), reflecting a local improvement in the environmental condition. Zones with low RSEI values occupy limited areas (up to 1.34 %), but are spatially confined to areas of intensive land use and degraded lands.
The most favorable environmental conditions are typical for mountainous and floodplain landscapes, while central and agriculturally developed areas show reduced integral indicators. The results of the study confirm the methodological viability of RSEI as an integral tool for monitoring the dynamics of the ecological state and assessing anthropogenic load within the basin geosystems of semi-arid regions.

Keywords: RSEI; remote sensing; anthropogenic impact; ecological condition; Teris River basin.

ХҒТАР: 06.81.23
География
Ғылыми мақала

Шаған көлінің соңғы 30 жылдағы гидроэкологиялық динамикасын ғарыштық және геоақпараттық әдістер арқылы зерттеу

Меруерт Мұсабаева, Шалқар Шахарбек*

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; mussabayeva_mn@enu.kz, shalkar.shex111@gmail.com
Корреспонденция: shalkar.shex111@gmail.com

Аңдатпа: Бұл зерттеу мақаласы Шаған көлінің кеңістіктік-уақыттық динамикасын талдауға арналған. Ғылыми зерттеудің негізгі мақсаты - 1995 жылдан 2025 жылға дейінгі кезеңдегі су айдынының аумақтық өзгерістерінің сандық бағасын беру және осы өзгерістерге әсер еткен климаттық детерминанттарды, сондай-ақ көлдің пайда болуына байланысты антропогендік әсер ететін факторларды анықтау. Зерттеу әдістемесі Landsat 5, 8 және Sentinel-2 ғарыштық деректерін қамтиды, олар Google Earth Engine (GEE) платформасында өңделіп, Normalized Difference Water Index (NDWI) есептелді. Нәтижелерді салыстыру ArcGIS Pro геоақпараттық жүйесіндегі Union Overlay кеңістіктік талдау арқылы жүзеге асырылды. Зерттеу жұмысының негізгі нәтижелері көрсеткендей, отыз жыл ішінде көлдің су бетінің ауданы 17,3 %-ға (1,82 км²-ден 1,50 км²-ге дейін) қысқарған. Бұл қысқару аймақтық климаттың жылынуымен және табиғи өзгерістердің артуымен тікелей байланысты. Жүргізілген зерттеудің мәні – Семей полигоны аумағындағы ерекше гидрогеологиялық нысанның экожүйелік тұрақсыздығын дәлелдеу және оның радионуклидтермен (тритий, плутоний) ластану жағдайындағы геоэкологиялық қауіпсіздігін бағалауға қосқан үлес. Жұмыс нәтижелерінің практикалық мәні су ресурстарын орнықты басқару стратегияларын қалыптастыруда маңызды ғылыми-әдіснамалық негіз болады.

Түйін сөздер: Шаған көлі; NDWI; ArcGIS; климаттық өзгеріс; су балансы; геоақпараттық талдау; атомдық мұра.

Дәйексөз: Мұсабаева, М., Шахарбек, Ш. (2026). Шаған көлінің соңғы 30 жылдағы гидроэкологиялық динамикасын ғарыштық және геоақпараттық әдістер арқылы зерттеу. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 155(2), 170-181. https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-170-181

Академический редактор: Н.Е. Рамазанова

Редакцияға түсті: 05.02.2026
Түзетілді: 26.04.2026
Қабылданды: 25.05.2026
Басылымға шықты: 30.06.2026

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

1. Кіріспе

Шаған көлі Қазақстанның гидрологиялық жүйесіндегі ерекше нысан болып табылады, өйткені ол табиғи генезиске емес, 1965 жылы жүргізілген жер асты ядролық сынағының нәтижесінде пайда болған геоинженерлік мұра. Бұл кратерлік көлдің қалыптасуы және одан кейінгі геоэкологиялық эволюциясы климаттық өзгерістердің және Семей ядролық полигонының қалдық радиациялық әсерінің күрделі өзара байланысын көрсетеді. 1965 жылғы 15 қаңтарда қуаты 140 килотонна болатын жер асты ядролық жарылыс нәтижесінде тереңдігі 100 метрден асатын және диаметрі 430 метрді құрайтын кратер пайда болды (Glasstone & Dolan, 1977).

Бұл оқиға КСРО-ның «Халық шаруашылығына арналған

ядролық жарылыстар» (PNE) бағдарламасы бойынша су қоймаларын жасау мақсатында жүргізілген алғашқы сынақ болды. Бұл сынақ АҚШ-тың «Project Plowshare» бағдарламасындағы Sedan кратерлік жарылысының (104 кт) «дерлік клоны» ретінде сипатталды, мақсаты үлкен конустық кратерді жасау болды. Кратер көктемгі сумен толтырылғаннан кейін пайда болған «Атом көлі» бүгінде экологиялық тұрғыда ерекше бақылаудағы аймақ болып табылады (Abdrakhmanov et al., 2019).

Климаттың жаһандық өзгеруі, трансэвапорацияның артуы және аймақтық су ағысының азаюы Шаған көлінің гидрологиялық тепе-теңдігіне айтарлықтай әсер етуде (IPCC, 2021).

Орталық Азияның құрғақ аймақтарындағы су айдындарының мониторингі үшін NDWI (Normalized Difference Water Index) және Google Earth Engine (GEE) сияқты бұлттық есептеу платформаларын қолдану су ресурстарының кеңістіктік-уақыттық өзгерісін бағалаудың тиімді геоақпараттық әдісі ретінде қарастырылады. Алайда, Шаған көлі сияқты техногендік генезисі бар және радиациялық ластануы бар су нысандарының ұзақ мерзімді динамикасын кешенді талдау – экожүйелік қауіпсіздікті бағалау үшін өзекті ғылыми міндет болып қалады. Бұл нысанды Koldobskaya et al. (2018) сияқты зерттеушілер ядролық жарылыстардың гидрогеологиялық салдарын зерттеу контекстінде қарастырған.

Бұл зерттеудің мақсаты - ғарыштық және геоақпараттық талдау негізінде Шаған көлі су айдынының 1995–2025 жылдардағы морфометриялық динамикасын бағалауға байланысты факторлар мен корреляциясын анықтау.

2. Материалдар мен әдістер

2.1. Зерттеу аймағы

Шаған көлі Абай облысының батыс бөлігінде, бұрынғы Семей ядролық сынақ полигоны аумағында (Balapan аймағы) орналасқан (49.9°N, 79.1°E). Көлдің ұзындығы шамамен 1,5 км, ені 400–800 м аралығында, орташа тереңдігі 90–100 м. Аймақтың климаты - шұғыл континенттік, жазы ыстық әрі құрғақ. Бұл климаттық ерекшелік жоғары булануға және су айдындарының үлкен маусымдық ауытқуына әкеледі.

2.2. Деректер көздері

Зерттеу барысында 1995–2025 жылдар аралығын қамтитын көп жылдық спутниктік мәліметтер пайдаланылды. Барлық суреттер Google Earth Engine (GEE) платформасынан алынған. Су айдындарының динамикасын анықтау үшін Normalized Difference Water Index (NDWI) қолданылды. Сонымен қатар, Шаған көлінің айналасында техногендік үйінділер мен минералданған топырақтың басым болуын ескере отырып, су мен құрлық шекарасын, әсіресе таяз сулы аймақтарда дәлірек анықтау мақсатында MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) индексі қосымша зерттеу құралы ретінде қарастырылды.

GEE платформасы бұлттылық пен атмосфералық кедергілердің әсерін азайту үшін медианалық композиттерді құруға мүмкіндік береді, бұл кең ауқымды және ұзақ мерзімді гидрологиялық мониторинг жүргізуде ерекше тиімді құрал болып саналады. Спутниктік деректер алдын ала радиометриялық және атмосфералық түзетулерден өтті. Атап айтқанда, Landsat миссиясының мәліметтері Surface Reflectance (SR) форматында, ал Sentinel-2 деректері Level-2A өнімдері түрінде қолданылды. Бұл форматтар атмосфералық шашырау мен абсорбция әсерін азайтып, жер бетінің нақты шағылысу коэффициенттерін алуға мүмкіндік береді.

Google Earth Engine ортасында деректерді алдын ала өңдеу барысында бұлттылық пен көлеңкелерді жою үшін сапа маскалары (quality masks) қолданылды. Сонымен қатар, әрбір зерттеу жылы үшін бірнеше спутниктік суреттер біріктіріліп, медианалық композиттер қалыптастырылды. Мұндай тәсіл кездейсоқ шумдарды азайтып, су айдыны шекараларын тұрақты түрде анықтауға мүмкіндік береді.

Зерттеуде уақыттық кезеңді таңдау маңызды әдістемелік кезеңдердің бірі болды. Су айдынының көктемгі максималды деңгейін емес, жазғы маусымдағы (шілде–тамыз)

салыстырмалы түрде тұрақты гидрологиялық жағдайды сипаттайтын композиттер пайдаланылды. Бұл кезеңде қар ерігеннен кейінгі маусымдық тасқындар аяқталып, көл деңгейі салыстырмалы түрде тұрақты күйге келеді. Сондықтан жазғы кезеңге негізделген композиттер көпжылдық гидрологиялық трендтерді анықтау үшін анағұрлым репрезентативті болып табылады.

Кесте 1. Су айдындарының динамикасын анықтау

Дерек көзі	Спутник / Сенсор	Уақыт аралығы	Кеңістіктік рұқсат
USGS	Landsat 5 TM Multispectral	1995, 2000, 2005	30 м
Landsat 8	OLI/TIRS Multispectral	2010, 2015	30 м
Copernicus	Sentinel-2A/B MSI	2025	10–20 м

Су айдындарының динамикасын анықтау үшін Normalized Difference Water Index (NDWI) қолданылды (Carlsson, Ramebäck, 2001):

Спектралды комбинациялар:

- Landsat 8 OLI: (Green = Band 3; NIR = Band 5) (Carlsson, Ramebäck, 2001)
- Sentinel-2 MSI: (Green = Band 3; NIR = Band 8)
- Landsat 5 TM: (Green = Band 2; NIR = Band 4)

NDWI > 0.1 болатын мәндер су аймағы ретінде бинарлы жіктеуден өткізілді. Бұл шекті мән NDWI-ді қолдану бойынша Макфитерс ұсынған бастапқы әдістемеге негізделген және су объектілерін фондық шулардан сәтті ажыратуға мүмкіндік берді (Carlsson, Ramebäck, 2001).

ArcGIS Pro бағдарламасында NDWI нәтижелері Union Overlay топологиялық талдауы арқылы көл бетінің кеңістіктік қиылысу картасын жасауға мүмкіндік берді. Overlay талдау әр жылдағы су айдыны полигондарын біріктіру арқылы көл ауданының қанша пайызы тұрақты екенін және қанша пайызы уақытша (транзиттік) сипатта екенін анықтау үшін қолданылады.

Атмосфералық кедергілерді жою үшін келесі алгоритмдер қолданылды:

- LaSRC (Landsat Surface Reflectance Code): Landsat 8 мәліметтері үшін аэрозольдік оптикалық қалыңдықты және су буын ескере отырып, беткі шағылысу коэффициентін (Surface Reflectance) алу үшін пайдаланылды.
- Sen2Cor: Sentinel-2 мәліметтері үшін 2A деңгейіне дейін атмосфералық түзету жасау үшін қолданылды. Бұл алгоритм рельефті, тропосфералық аэрозольдерді және су буын ескереді.

Су мен құрлық арасындағы шекараны дәлірек анықтау үшін Оцу (Otsu) алгоритмі пайдаланылды. Оцу әдісі гистограммадағы класаралық дисперсияны максималдау арқылы әр сурет үшін оңтайлы шекті мәнді автоматты түрде таңдауға мүмкіндік береді, бұл маусымдық жарықтандыру мен топырақ ылғалдылығының әсерін азайтады.

Дәлдікті бағалау (Accuracy Assessment)

Классификация нәтижелерінің дәлдігін тексеру үшін 100-ден астам кездейсоқ таңдалған бақылау нүктелері арқылы Қателіктер матрицасы (Confusion Matrix) құрылды. Landsat 5 (30 м) және Sentinel-2 (10 м) спутниктерінің кеңістіктік рұқсат айырмашылығының нәтижеге әсерін саралау үшін Каппа (Kappa) коэффициенті әр зерттеу кезеңі (1995, 2010, 2025 жж.) бойынша жеке есептелді. Негізгі көрсеткіштер:

- Объектінің шын мәнінде қаншалықты дұрыс жіктелгенін көрсетеді.
- Картадағы ақпараттың сенімділік деңгейі.
- Каппа коэффициенті: Жіктеудің кездейсоқ сәйкестіктен қаншалықты жақсы екенін білдіретін статистикалық өлшем.

Гидрологиялық трендтерді талдау (Mann-Kendall және Sen's Slope)

Көл ауданының көпжылдық өзгеру үрдісін бағалау үшін параметрлік емес

статистикалық тесттер қолданылды:

1. Манн-Кендалл (Mann-Kendall) тесті: Уақыт қатарындағы монотонды трендтің бар-жоғын анықтау үшін пайдаланылды. Статистикалық маңыздылық деңгейі $(p < 0{,}05$ деп алынды.

2. Сен (Sen's Slope) көлбеуінің бағалаушысы: Трендтің қарқындылығын, яғни уақыт бірлігіндегі (жыл/онжылдық) ауданның нақты өзгеру шамасын есептеу үшін қолданылды.

3. Нәтижелер

3.1. Су беті ауданының динамикасы

NDWI талдауы бойынша, Шаған көлінің су беті ауданы 1995 жылдан 2025 жылға дейін ұзақ мерзімді кезеңде 17,3 %-ға қысқарған (2-кесте). Бұл қысқару климаттың құрғақтануының айқын гидрологиялық реакциясы болып табылады, сонымен қатар аймақтағы буланудың күшеюімен және су балансының теріс өзгерістерімен тығыз байланысты. Зерттеу нәтижелері көл экожүйесінің климаттық өзгерістерге жоғары сезімтал екенін көрсетеді.

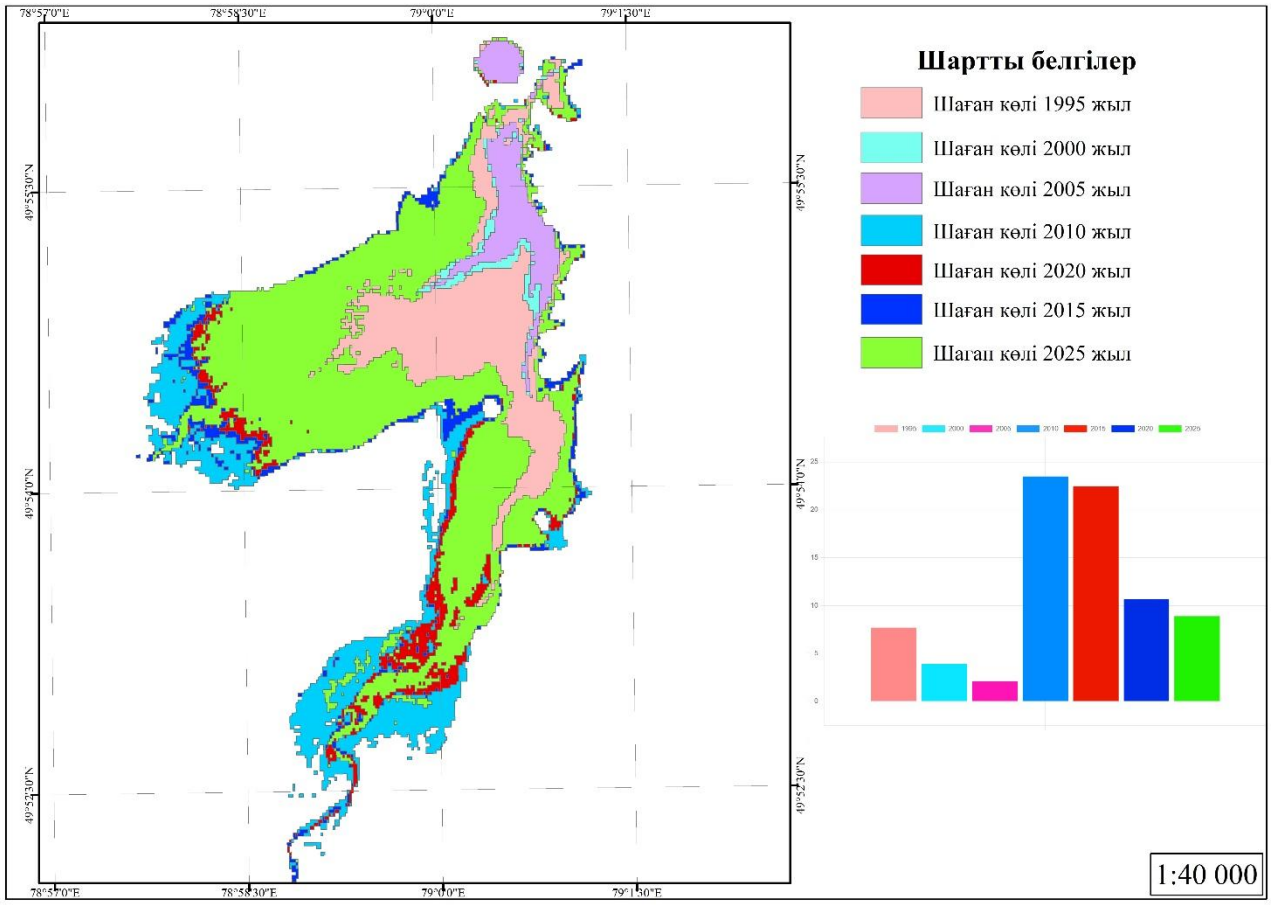
Кесте 2. Шаған көлі су беті ауданының динамикасы (1995–2025 жж.)

Жыл	Су беті ауданы (км²)	Өзгеріс (%)	Ескертпе
1995	1.82	—	Бастапқы кезең
2000	1.94	+6.6	Жауын-шашын жоғары кезең
2005	1.88	–3.0	Қалыпты маусым
2010	1.73	–8.0	Булану артуы
2015	1.62	–6.4	Құрғақ кезең
2025	1.50	–7.4	Климаттық әсер

Көлдің су айдынының кезеңдік өзгерісі 1-суретте айқын көрсетілген.

Манн-Кендалл тесті бойынша Шаған көлінің ауданында айқын теріс тренд анықталды $(p < 0{,}05)$, бұл ұзақ мерзімді су бетінің қысқаруын көрсетеді. Ең үлкен су беті ауданы 2000 жылы тіркелсе, ең төменгі деңгей 2025 жылы байқалды, яғни 25 жыл ішінде көл ауданы шамамен 22.7 % төмендеді. Overlay талдауы бойынша су айдынының 60 %-дан астамы уақытша сипатқа ие, бұл оның климаттық құбылмалылыққа жоғары тәуелділігін растайды.

Маусымдық гидрологиялық талдау көрсеткендей, жазғы құрғақ кезеңдерде көлдің орташа су көлемі қысқарады, ал көктемгі қар еріген кезде уақытша артықшылыққа ие аймақтар пайда болады. Су деңгейінің төмендеуі негізінен жауын-шашын мөлшерінің азаюы мен булану жылдамдығының артуымен байланысты. Алынған нәтижелер Шаған көлінің су қорын тиімді басқару және климаттық өзгерістерге бейімделу стратегияларын әзірлеу қажеттігін көрсетеді.



Сурет 1. Шаған көлі су бетінің уақыттық өзгерісі (1995–2025 жж.)

Шаған көлінің 1995 жылдан 2025 жылға дейінгі аралықтағы су бетінің уақыттық өзгерістеріне жүргізілген картографиялық талдау нысанның айқын гидроморфологиялық трансформациясын көрсетті. 1-суреттегі деректерді ғылыми сараптау нәтижесінде көл акваториясының дамуын екі негізгі функционалдық аймаққа бөліп қарастыруға болады.

Біріншіден, су айдынының ең тұрақты бөлігі немесе гидрологиялық ядросы (hydrological core) көлдің орталық кратерлік зонасында шоғырланған. Бұл сегмент бақылау жүргізілген барлық кезеңдерде өзінің су жинақтаушы қабілетін жоғалтпаған ең терең және гидрогеологиялық тұрғыдан орнықты бөлік болып табылады. Орталық ойпаттың мұндай тұрақтылығы жерасты суларының дренаждық толығуы мен булану үдерістері арасындағы тепе-теңдіктің сақталуымен түсіндіріледі. Бұл «өзектік» зона су деңгейінің ең төменгі регрессиялық фазаларында да статикалық су қабатын ұстап тұрып, нысанның жалпы экожүйесінің деградацияға қарсы буферлік қабілетін айғақтайды.

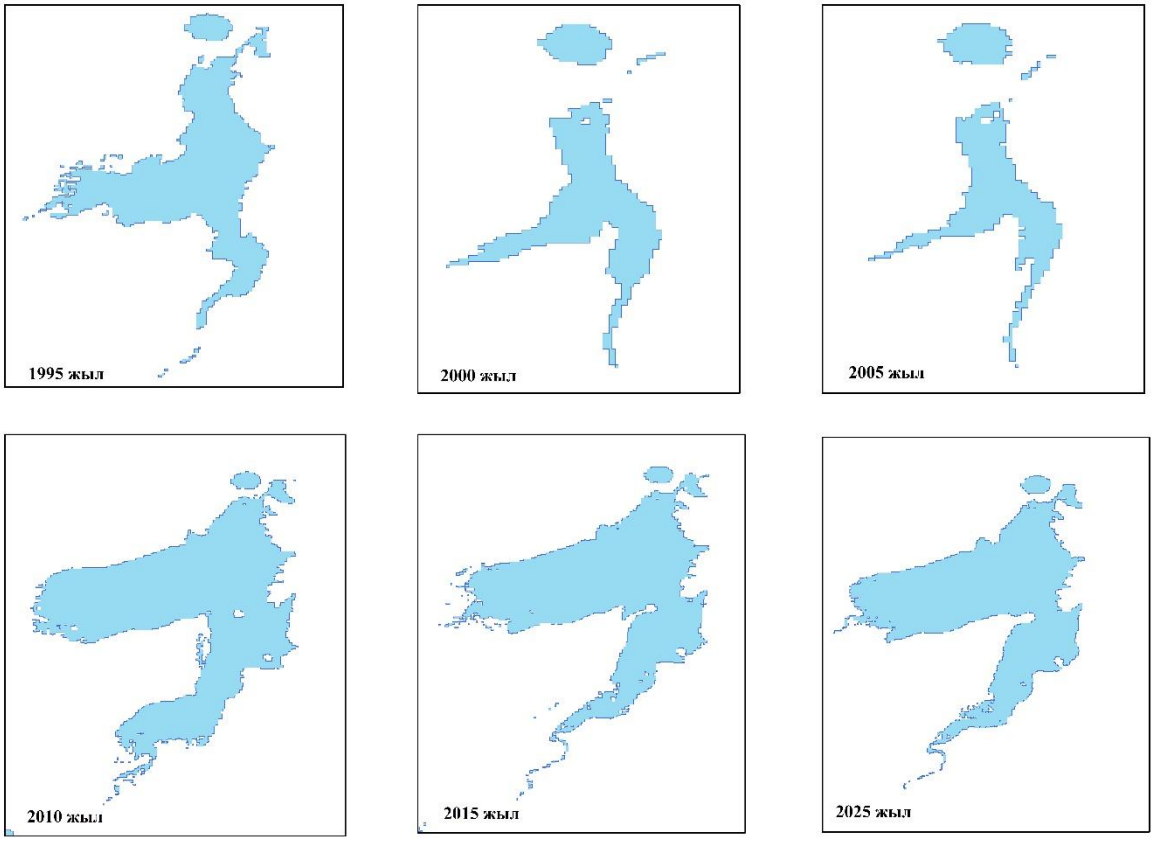
Екінші жағынан, көлдің перифериялық және маргиналды аймақтарында максималды динамикалық тербелістер мен жоғары экодинамикалық градиент байқалады. 1995 жылғы базалық контур мен 2025 жылғы шекаралар арасындағы алшақтық су айдынының эфемерлі сипатын көрсетеді. Гистограммалық мәліметтер бойынша, 2010 және 2020 жылдары орын алған трансгрессиялық фазалар (су бетінің максималды кеңеюі) жауын-шашынның экстенсивті мөлшеріне тәуелді болса, 2005 және 2025 жылдардағы регрессиялық құбылыстар периметрлік құрғаудың басымдылығын айқындайды. Бұл жағдайда таяз жағалаулық зоналарда буланудың инфильтрациядан басым түсуі есебінен «су айнасының» жиырылуы (water mirror contraction) орын алады.

Шаған көлінің су режимі - климаттық аридтену үдерістері мен жергілікті ландшафтық ерекшеліктердің әсерінен қалыптасатын күрделі динамикалық жүйе. Көлдің солтүстік-батыс және оңтүстік бөліктеріндегі таяз сулы аумақтар ылғал тапшылығына бірінші кезекте жауап

беретін индикаторлық зоналар болып табылады.

3.2. Кеңістіктік қиылысу (Overlay) талдауы

Union Overlay талдауы (2-сурет) көлдің аумақтық динамикасындағы кеңістіктік гетерогенділікті нақтылады.



Сурет 2. Шаған көлі су айдыны шекараларының кеңістіктік қиылысуы (Overlay) және аудандық динамикасы (1995–2025 жж)

Union Overlay (біріктіру) талдауының нәтижелеріне сүйене отырып, келесідей негізгі қорытындылар жасауға болады: Көлдің аумағы уақыт өте келе тұрақсыз болғаны байқалады. Динамиканы екі негізгі кезеңге бөлуге болады:

- 1995–2005 жж. (Тартылу кезеңі): Су айдынының ауданы айтарлықтай қысқарған. Әсіресе көлдің батыс және солтүстік-шығыс бөліктерінде су деңгейі төмендеп, жекелеген кішігірім су айдындарына (фрагментация) бөлінгені көрінеді.
- 2010–2025 жж. (Толығу және тұрақтану): 2010 жылдан бастап көл аумағы қайта кеңейген. Батыс шығанағының ауданы ұлғайып, көл біртұтас формаға келе бастаған. 2025 жылғы болжам/көрсеткіш көлдің 2010-2015 жылдардағы қалыпты деңгейін сақтап тұрғанын көрсетеді.

Overlay әдісі арқылы көлдің қай бөліктері жиі өзгеріске ұшырайтынын (гетерогенділік) анықтауға болады:

Тұрақсыз аймақтар: Көлдің батыс жағы мен оңтүстік "құйрығы" ең жоғары кеңістіктік өзгергіштікке ие. Бұл аймақтарда су тереңдігі таяз болуы мүмкін, сондықтан климаттық немесе антропогендік факторларға тез жауап береді.

Тұрақты өзек (Core): Орталық бөлік барлық жылдары сақталған, бұл көлдің негізгі терең қазаншұңқыры осы аймақта орналасқанын білдіреді.

Мүмкін болатын себептер мен салдар: 2000-жылдардың басындағы құрғақшылық

немесе жауын-шашынның азаюы судың тартылуына әкелуі мүмкін. Шаған көлінің (Атом көлі) жасанды шығу тегін ескерсек, су деңгейіне жергілікті өзендердің (Шаған, Ащысу) ағысы мен дамбалардың жай-күйі тікелей әсер етеді. Overlay талдауы су жағалауындағы экожүйелердің (қамыс, жағалау өсімдіктері) де тұрақсыз екенін көрсетеді. Бұл биологиялық әртүрлілікке және ластаушы заттардың концентрациясына әсер етуі мүмкін.

Талдау барысында келесі техникалық принциптер қолданылды:

- Cracking және Clustering: Бұл процесс полигон жиектерінің қиылысу нүктелерінде жаңа төбелерді (vertices) енгізуді және берілген төзімділік шегіндегі (tolerance) түйіндерді біріктіруді қамтиды. Бұл әдіс су айдыны шекараларының уақыттық ығысуын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік берді.
- Кеңістіктік жіктеу: Overlay талдауының нәтижесінде көлдің екі негізгі аймағы анықталды:

Тұрақты су айдыны (Core Water): Барлық зерттелген жылдарда су астында болған аумақтар. Бұл аймақ көлдің орталық кратерлік бөлігіне сәйкес келеді, мұнда тереңдік 80–90 метрді құрайды және су алмасуы шектеулі.

Уақытша (транзиттік) су айдыны (Transient Water): Климаттық факторларға байланысты мезгіл-мезгіл құрғап қалатын немесе су басатын перифериялық аймақтар. Зерттеу мәліметтері бойынша, Шаған көліндегі уақытша су айдындарының үлесі 60 %-дан асады, бұл гидрологиялық режимнің климаттық құбылмалылыққа өте жоғары тәуелділігін көрсетеді. Кеңістіктік қиылысу картасы су деңгейі төмендеген кезде периметрлік құрғаудың негізінен көлдің шығыс және оңтүстік-шығыс жайылмалық бөліктерінде жүретінін көрсетті. Бұл аймақтарда жағалау сызығының шегінуі 30 жылда 100-150 метрге дейін жеткен.

4. Талдау

4.1. Климаттық детерминанттар

Шаған көлінің су айдынының қысқаруы аймақтық климаттың жылынуымен тығыз байланысты. Жылыну эвапотранспирацияны күшейтіп, көлдің су балансындағы тапшылықты арттырады. Сонымен қатар, су көлемінің азаюы CHIRPS деректері бойынша аймақтық жауын-шашын мөлшерінің төмендеуімен де тығыз байланысты, және бұл айнымалылар арасындағы корреляция (Пирсон және Спирмен) климаттық факторлардың су айдынына тікелей әсерін дәлелдейді.

Шаған көліндегі ластану деңгейі судың тереңдігіне байланысты гетерогенді. Тұрақты изотоптарды (^{2}H және ^{18}O) зерттеу көлдің гидрологиялық режимін түсінуге мүмкіндік берді.

Көл суының вертикалды стратификациясы:

- Жоғарғы қабат (0–20 м): Атмосфералық жауын-шашынмен белсенді алмасады. Мұнда тритий (^{3}H) концентрациясы 160–500 Бк/кг, минералдануы 10 г/л.
- Төменгі қабат (20–90 м): Су алмасуы жоқ стагнациялық аймақ. Тритий белсенділігі 20,000 Бк/кг-ға дейін жетеді, минералдану 20 г/л болады.

Зерттеулер Шаған көлінен шығатын жерасты сулары Шаған өзенінің төменгі ағысын (2–14 км) тритиймен (300,000–350,000 Бк/кг) тұрақты түрде ластайтынын растады.

4.2. Техногендік мұра және гидрогеохимиялық қауіптер

1. Көлдің генезисі және биологиялық тұрақсыздығы: Шаған көлінің техногендік генезисі оның бастапқы экожүйесін бұзды. 1960 жылдардың соңында көлде қалдық радиацияның тірі ағзаларға әсерін зерттеу үшін эксперименттер жүргізіліп, 36 балық түрі, 27 моллюска және 150-ге жуық су өсімдіктері енгізілді. Бұл түрлердің 90 %-ы жерсінбей, кейіннен жойылды, бұл көлдің қалдық радиациялық ортасының биологиялық тұрақсыздығын дәлелдейді.
2. Радионуклидтердің ластануы: Balapan аймағындағы топырақ үлгілерінде қарулық плутониймен байланысты плутонийдің және цезийдің жоғары деңгейдегі ластануы анықталған. Көлге су жеткізетін арналарда тритийдің (H) жоғары концентрациясы тіркелген

(S_R19). Тритийдің болуы жерасты суларының және ядролық жарылыспен туындаған жарықтар жүйесі арқылы ластанған ағындардың латералды миграциясының негізгі индикаторы болып табылады.

3. Ауыр металдардың шоғырлануы: Су айдынының 17,3 %-ға қысқаруы судың тұздылығын және ауыр металдардың концентрациясын арттырады. Микроэлементтердің мөлшері әлемдік өзен суларының орташа концентрациясымен салыстырғанда келесідей ретпен таралған: Уран (U) > Қорғасын (Pb) > Мырыш (Zn) > Лантан (La) > Стронций (Sr) > Марганец (Mn) (S_R19).

Гидрологиялық және геопространдықтық интерпретация: Шаған көлі бойынша алынған 17,3 % қысқару нәтижесі (1-кесте) Орталық Азияның аридті аймақтарындағы жалпы климаттық құрғақтану үрдісімен корреляцияланады (Huang et al., 2023). Overlay талдау нәтижесі (2-сурет) су айдынының қысқаруы көлдің терең кратерлік бөлігіне қарағанда, таяз, маргиналды аймақтарда айқынырақ жүріп жатқанын көрсетті. Бұл булануға және ауыр металдардың шөгуіне ең сезімтал аймақтар болып табылады.

Потенциалдық қауіптің жоғарылауы: Көлдегі су көлемінің азаюы ауыр металдардың және радионуклидтердің су-тұнба жүйесіндегі тепе-теңдігін бұзады. Су деңгейінің төмендеуі кезінде маргиналды ластанған аймақтардың (олардың 60 %-дан астамы уақытша сипатқа ие) ашылуы және олардың жел эрозиясына ұшырауы арқылы ластанудың қайталама таралу қаупі туындайды. Су көлемі азайған сайын су-шөгінді жүйесіндегі тритийдің (^{3}H) концентрациялық динамикасы артып, экологиялық тәуекелдерді одан әрі күшейтеді.

4.3. Геоақпараттық мониторингтің болашақ бағыттары

Шаған көлі сияқты техногендік генезисі бар су нысандары үшін ұзақ мерзімді геоақпараттық мониторинг ерекше маңызға ие. Қазіргі уақытта қашықтықтан зондтау технологиялары мен бұлттық есептеу платформалары табиғи және антропогендік процестердің динамикасын жүйелі түрде бақылауға мүмкіндік береді. Google Earth Engine платформасының басты артықшылығы - көпжылдық спутниктік деректер архивіне жылдам қол жеткізу және үлкен көлемдегі деректерді автоматты түрде өңдеу мүмкіндігі. Бұл тәсіл аймақтық және жаһандық деңгейдегі гидрологиялық өзгерістерді салыстырмалы түрде талдауға мүмкіндік береді. Соңғы жылдары жасанды интеллект және машиналық оқыту алгоритмдері су айдындарын анықтау және олардың динамикасын талдау саласында кеңінен қолданылуда. Мысалы, Random Forest, Support Vector Machine және нейрондық желілер сияқты классификация әдістері спектралдық индекстермен бірге қолданылғанда су мен құрлық арасындағы шекараны дәлірек анықтауға мүмкіндік береді. Мұндай әдістер NDWI немесе MNDWI сияқты дәстүрлі индекстердің нәтижелерін толықтырып, суреттердегі спектралдық шудың әсерін азайтады. Болашақта Шаған көлі сияқты күрделі гидрогеологиялық нысандарды зерттеуде гибридті алгоритмдерді қолдану ғылыми нәтижелердің дәлдігін арттыра алады. Сонымен қатар көпспектрлі және гиперспектрлі спутниктік деректердің дамуы су сапасын бағалаудың жаңа мүмкіндіктерін ашуда. Гиперспектрлі сенсорлар судың химиялық құрамындағы өзгерістерді, балдырлардың көбеюін, минералдану деңгейін және ауыр металдардың ықтимал таралуын жанама түрде бағалауға мүмкіндік береді.

Бұл әдістер радионуклидтермен ластанған су жүйелерін зерттеу үшін ерекше маңызды, өйткені мұндай жағдайларда дәстүрлі гидрохимиялық өлшеулермен қатар кеңістіктік деректерді біріктіру қажет. Шаған көлінің жағдайында тұрақты мониторинг жүргізу тек гидрологиялық өзгерістерді бақылау үшін ғана емес, сонымен қатар радиациялық қауіпсіздік тұрғысынан да маңызды. Су деңгейінің төмендеуі кезінде бұрын су астында жатқан жағалау аймақтары ашылып, жел эрозиясының әсеріне ұшырауы мүмкін. Бұл құбылыс радионуклидтердің қайта таралуының әлеуетті көзіне айналуы ықтимал. Сондықтан геоақпараттық талдау нәтижелерін радиологиялық мониторинг деректерімен біріктіру аймақтың экологиялық қауіпсіздігін бағалаудың маңызды элементі болып табылады. Болашақ

зерттеулерде спутниктік деректерді климаттық модельдермен біріктіру маңызды бағыттардың бірі болмақ. Мысалы, жауын-шашын, температура және булану сияқты климаттық айнымалыларды гидрологиялық модельдермен біріктіре отырып, көлдің болашақтағы динамикасын болжауға болады. Мұндай сценарийлік модельдеу су ресурстарын басқару стратегияларын әзірлеуге және экожүйелік тәуекелдерді алдын ала бағалауға мүмкіндік береді. Осылайша, геоақпараттық технологиялар тек бақылау құралы ғана емес, сонымен қатар экологиялық жоспарлау мен басқарудың ғылыми негізі ретінде қарастырылуы тиіс.

5. Қорытынды

Жүргізілген ғарыштық және геоақпараттық зерттеу (1995–2025 жж.) Шаған көлінің гидроэкологиялық жүйесінің күрделі әрі тұрақсыз динамикаға ұшырағанын дәлелдеді. Алынған нәтижелер негізінде келесідей негізгі ғылыми тұжырымдар жасалды:

Морфометриялық және кеңістіктік динамика: NDWI және Overlay талдаулары көрсеткендей, Шаған көлінің су беті ауданы отыз жыл ішінде 17,3 %-ға (1,82 км²-ден 1,50 км²-ге дейін) қысқарған. Overlay талдауы су айдынының ең үлкен өзгерістері (70 % дейін) таяз, перифериялық маргиналды аймақтарда орын алғанын, ал кратердің терең орталық бөлігі («гидрологиялық өзегі») салыстырмалы түрде тұрақты болып қалғанын анықтады.

Климаттық және гидрологиялық детерминанттар: Су көлемінің азаюының негізгі себебі - климаттық жылыну. Трансэвапорацияның күшеюі мен жауын-шашын мөлшерінің азаюы көлдің су балансындағы тапшылықты арттырды.

Техногендік және радиоэкологиялық қауіптер: Су деңгейінің төмендеуі маргиналды ластанған аймақтарды ашып, радионуклидтердің жел эрозиясы арқылы қайталама таралу қаупін арттырады.

Болашақ геоақпараттық мониторинг: Алдағы уақытта зерттеудің әдістемелік базасын кеңейту мақсатында Random Forest және нейрондық желілер сияқты машиналық оқыту (ЖИ) алгоритмдерін қолдану жоспарлануда. Бұл әдістер радионуклидтермен ластанған су жүйелерін кешенді зерттеуде және экологиялық тәуекелдерді болжауда жоғары дәлдікті қамтамасыз етеді.

6. Қосымша материалдар: Қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер:

Концептуализация – Ш.Ш.; әдістеме – Ш.Ш.; бағдарламалық қамтамасыз ету – Ш.Ш.,; зерттеу – Ш.Ш., М.М.; ресурстар – Ш.Ш., М.М.; әдістемені әзірлеу, зерттеу материалдарымен қамтамасыз ету, жетекшілік – М.М.; мәтінді дайындау, өңдеу және талдау жүргізу – Ш.Ш.

8. Авторлар туралы ақпарат

Мұсабаева, Меруерт - г.ғ.д, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; mussabayeva_mn@enu.kz, https://orcid.org/0000-0003-4318-9950

Шахарбек, Шалқар - магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; shalkar.shex111@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-5472-7389

9. Қаржыландыру: Сыртқы қаржыландыру болған жоқ.

10. Алғыстар: Авторлар ғарыштық деректерді ашық қолжетімді түрде ұсынған USGS және Copernicus бағдарламаларына алғыс білдіреді. Сонымен қатар зерттеу барысында консультациялық қолдау көрсеткен кафедра ұжымына ризашылықтарын білдіреді.

11. Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Aktayev, M., Subbotin, S., Aidarkhanov, A., Aidarkhanova, A., Timonova, L., & Larionova, N. (2024). Characterization of geological and lithological features in the area proximal to tritium-contaminated groundwater at the Semipalatinsk test site. *PLoS ONE*, 19(3), e0300971. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300971
2. Bai, J., Chen, X., Li, L., & Zhang, W. (2025). Research on the method of extracting water body information in Central Asia based on Google Earth Engine. *Water*, 17(6), 804. https://doi.org/10.3390/w17060804
3. Bauer, S., Gusev, B. I., Pivina, L. M., Apsalikov, K. N., & Grosche, B. (2005). Radiation exposure due to local fallout from Soviet atmospheric nuclear weapons testing in Kazakhstan: Solid cancer mortality in the Semipalatinsk historical cohort, 1960-1999. *Radiation Research*, 164(4 Pt 1), 409-419. https://doi.org/10.1667/rr3423.1
4. Carlsson, T., Ramebäck, H., & Skålberg, M. (2001). Plutonium and strontium isotopes in soil from the Semipalatinsk nuclear test site. *Journal of Environmental Radioactivity*, 53(1), 45-56. https://doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00115-4
5. Chen, Y., Li, W., Deng, H., Fang, G., & Li, Z. (2016). Changes in Central Asia's water tower: past, present and future. *Scientific Reports*, 6, 35458. https://doi.org/10.1038/srep35458
6. Endo, S., Hoshi, M., & Ivanova, V. (2008). Iodine-129 measurements in soil samples from Dolon village near the Semipalatinsk nuclear test site. *Radiation and Environmental Biophysics*, 47, 359-365. https://doi.org/10.1007/s00411-008-0162-3
7. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031
8. Hoshi, M., Shibata, Y., & Takada, J. (2006). Plutonium and uranium in human bones from areas surrounding the Semipalatinsk Nuclear Test Site. *Journal of Radiation Research*, 47(Suppl A), A85-A89. https://doi.org/10.1269/jrr.47.A85
9. IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896
10. Kadirova, G., Shabdarbayeva, D., Chaizhunussova, N., & Massabayeva, M. (2025). Long-term exposure to ionizing radiation from the Semipalatinsk Nuclear Test Site and risk of cardiovascular mortality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(12), 1781. https://doi.org/10.3390/ijerph22121781
11. Kadyrzhanov, K. K., Lukashenko, S. N., & Kislitsin, S. B. (2005). Plutonium at the Semipalatinsk Nuclear Test Site (SNTS). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 263(1), 229-234. https://doi.org/10.1007/s10967-005-0041-1
12. Larionova, N., Timonova, L., Toporova, A., Krivitskiy, P., Polevik, V., & Aidarkhanova, A. (2026). Tritium in vegetation at various types of radioactive contamination sites under arid climate conditions. *PLoS ONE*, 21(1), e0339645. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0339645
13. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714
14. Minkenova, K., Serik, A., & Panitskiy, A. (2025). Cytogenetic changes in *Rosa spinosissima* L. and *Leymus angustus* (Trin.) Pilg. growing under radioactive contamination conditions at the Semipalatinsk Nuclear Test Site. *PLoS ONE*, 20(5), e0324860. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324860
15. Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62-66. https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076
16. Panitskiy, A., et al. (2023). Vertical distribution of radionuclides in soil at the Semipalatinsk Test Site beyond its test locations. *PLoS ONE*, 18(1), e0278581. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278581

17. Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. https://doi.org/10.1038/nature20584
18. Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., & Hazini, S. (2014). Water feature extraction and change detection using multitemporal Landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(5), 4173-4189. https://doi.org/10.3390/rs6054173
19. Sairike, A., et al. (2026). Ecological monitoring of nuclear test sites over 20 years based on Remote Sensing Ecological Index. *Sustainability*, 18(1), 206. https://doi.org/10.3390/su18010206
20. Simon, S. L., Baverstock, K. F., & Lindholm, C. (2003). A summary of evidence on radiation exposures received near to the Semipalatinsk Nuclear Weapons Test Site in Kazakhstan. *Health Physics*, 84(6), 718-725. https://doi.org/10.1097/00004032-200306000-00002
21. Toktaganov, T., Mamyrbayeva, A., Aidarkhanov, A., Aidarkhanova, A., & Raimkanova, A. (2025). Tritium contamination and hydrological transport in the Shagan River: an isotope hydrology study. *PLoS ONE*, 20(10), e0333260. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0333260
22. Wang, Z., et al. (2020). Effects of irrigation discharge on salinity of a large freshwater lake: a case study in Chagan Lake, Northeast China. *Water*, 12(8), 2112. https://doi.org/10.3390/w12082112
23. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179
24. Yapiyev, V., Sagintayev, Z., Inglezakis, V. J., Samarkhanov, K., & Micklin, P. (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*, 9(10), 798. https://doi.org/10.3390/w9100798
25. Yessimkhanova, K., et al. (2026). Spatial and temporal analysis of climatic zones in Kazakhstan using Google Earth Engine. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 15(2), 57. https://doi.org/10.3390/ijgi15020057

Study of the hydroecological dynamics of Lake Chagan over the last 30 years using remote sensing and gis methods

Meruyert Musabayeva, Shalkhar Shakharbek

Abstract: This research article is dedicated to the analysis of the spatio-temporal dynamics of Lake Chagan. The primary scientific goal is the quantitative assessment of the spatial changes in the water surface area over the period 1995–2025 and the identification of the climatic determinants, as well as the anthropogenic stress factors linked to the lake's nuclear heritage, that influenced these changes. The research methodology involved processing Landsat 5, 8 and Sentinel-2 satellite data on the Google Earth Engine (GEE) platform to calculate the Normalized Difference Water Index (NDWI). Comparative analysis was carried out using the Union Overlay geospatial analysis tool in the ArcGIS Pro environment. The main results of the study reveal that the lake's water surface area decreased by 17.3 % (from 1.82 km² to 1.50 km²) over three decades. This shrinkage is directly linked to regional climatic warming (with an average warming trend in Kazakhstan of 0.31 C per decade) and increased trans-evaporation. The scientific value of the work lies in demonstrating the ecosystem instability of this unique hydrogeological feature within the Semipalatinsk Test Site and contributing to the assessment of its ecological safety in the context of radionuclide (tritium, plutonium) contamination. The practical value of the results provides a crucial scientific and methodological basis for developing sustainable water resource management strategies.

Keywords: Chagan Lake; NDWI; ArcGIS; climate change; water balance; geospatial analysis; nuclear heritage.

Исследование гидроэкологической динамики озера Чаган за последние 30 лет с использованием космических и геоинформационных методов

Меруерт Мусабаева, Шалкар Шахарбек

Аннотация: Данная исследовательская статья посвящена анализу пространственно-временной динамики озера Шаган. Основной научной целью является количественная оценка пространственных изменений площади водной поверхности за период 1995–2025 гг. и выявление климатических детерминант, а также антропогенных стресс-факторов, связанных с ядерным наследием озера, которые оказали влияние на эти изменения. Методология исследования включала обработку спутниковых данных Landsat 5, 8 и Sentinel-2 на облачной платформе GoogleEarthEngine (GEE) с расчетом индекса NormalizedDifferenceWaterIndex (NDWI). Сравнительный анализ результатов был проведен с использованием инструмента пространственного анализа UnionOverlay в геоинформационной системе ArcGISPro. Основные результаты работы показывают, что площадь водной поверхности озера сократилась на 17,3 % (с 1,82 км² до 1,50 км²) за тридцатилетний период. Это сокращение напрямую связано с региональным потеплением климата (со средним трендом потепления в Казахстане 0.31∘C за десятилетие) и увеличением трансэвапорации. Научная значимость работы заключается в доказательстве экосистемной нестабильности этого уникального гидрогеологического объекта на территории Семипалатинского полигона и внесении вклада в оценку его экологической безопасности в условиях загрязнения радионуклидами (тритий, плутоний). Практическая ценность результатов служит важной научно-методологической основой для разработки стратегий устойчивого управления водными ресурсами.

Ключевые слова: озеро Шаган; NDWI; ArcGIS; изменение климата; водный баланс; геопространственный анализ; ядерное наследие.

ХҒТАР 39.21.02
География
Ғылыми мақала

Азық-түлік белдеуін зерттеудегі географиялық алғышарттар жүйесінің әдіснамалық негіздері

Гульнара Оспанова[1], Алим Мылкайдаров[2], Айгерим Сансызбаева[1]*

[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; ospanova_14@mail.ru, sansyzbayeva.ab@mail.ru
[2]әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; mylkaydarov@mail.ru
*Корреспонденция: sansyzbayeva.ab@mail.ru

Аңдатпа: Мақалада азық-түлік белдеуін зерттеудің теориялық және әдіснамалық негізі ретінде географиялық факторлар мен географиялық алғышарттар жүйесі қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі ірі қалалық агломерациялар маңында азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету, өнім жеткізудің тұрақтылығын сақтау және қала мен ауыл арасындағы кеңістіктік-экономикалық байланысты тиімді ұйымдастыру қажеттілігімен айқындалады. Географиялық детерминизмнен бастап қазіргі жүйелік және көпфакторлы талдау тәсілдеріне дейінгі ғылыми көзқарастардың эволюциясы жинақталып, олардың азық-түлік белдеуін бағалаудағы қолданбалы мәні ашылды. Зерттеу әдістемесі салыстырмалы-тарихи талдау, теориялық жинақтау, жүйелеу және көпдеңгейлі факторлық талдау тәсілдеріне негізделді. Жұмыстың негізгі нәтижесі ретінде табиғи-агроэкологиялық, әлеуметтік-экономикалық, кеңістіктік-логистикалық және институционалдық факторларды біріктіретін «факторлар – деңгейлер – көрсеткіштер – нәтиже» қағидасы ұсынылды. Бұл қағида азық-түлік белдеуін облыс, ауыл шаруашылығы аймағы, әкімшілік аудан және кәсіпорын деңгейлерінде бағалауға, көрсеткіштерді нормалау мен салмақтау арқылы интегралды қорытынды жасауға мүмкіндік береді. Ұсынылған тәсіл әсіресе Қазақстан мен Орталық Азиядағы урбандалу үдерісі күшейген, су және жер ресурстары шектеулі, логистикалық тәуекелдер жоғары аймақтар үшін маңызды әдіснамалық негіз бола алады.
Зерттеудің мақсаты - азық-түлік белдеуін зерттеуде географиялық алғышарттар жүйесін әдіснамалық тұрғыдан негіздеу және оны кеңістіктік жоспарлау, агроөнеркәсіп кешенін орналастыру, азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету міндеттерімен байланыстыра қарастыру.

Түйін сөздер: фактор; азық-түлік белдеуі; ресурс; детерминизм; энвайроментализм; орталық-периферия.

Дәйексөз: Оспанова, Г., Мылкайдаров, А., Сансызбаева, А. (2026). Азық-түлік белдеуін зерттеудегі географиялық алғышарттар жүйесінің әдіснамалық негіздері. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 155(2), 182-199. https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-182-199

Академический редактор: Н.Е. Рамазанова

Редакцияға түсті: 19.02.2026
Түзетілді: 18.05.2026
Қабылданды: 11.06.2026
Басылымға шықты: 30.06.2026

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

1. Кіріспе

Әлемдік география ғылымында тарихи тұрғыдан адамзатқа көпқырлы әсер ететін географиялық жағдайлардың құрылымы, құрамы мен жалпы мазмұнын түсіндіретін бірнеше нұсқа

қалыптасты. Соның нәтижесінде географиялық ортаны әртүрлі қырынан түсіндіретін бағыттардың ықпалы 1970 жылдары «қоршаған орта» ұғымының кең қолданысқа енуіне алып келді. Адамзат қоғамы мен географиялық ортаның өзара әрекеттесуіне қатысты проблемалар кешенінде екі аспект айқындалады, олардың әрқайсысына деген қызығушылық қоғам дамуына қарай өзгеріп отырды (Zaitsev, 2019).

Табиғи жағдайлар мен табиғи ресурстар қоғамның жеке және ұжымдық қызметінің алғышарты болып табылады. Зерттеушілер мен ғалымдардың еңбектерінде «географиялық алғышарттар» және «географиялық факторлар» ұғымдары көбінесе әлеуметтік, экономикалық және мәдени өмірдің түрлі қырларына, сондай-ақ әртүрлі мәдениеттер мен ұлттардың ойлау тәсілдеріне ықпалы тұрғысынан қарастырылады (Nisbett, 2004).

Сондай-ақ климат, ресурстарға қолжетімділік және табиғи кедергілер сияқты географиялық факторлар өркениеттердің тарихи дамуына, сондай-ақ елдердің даму деңгейіндегі айырмашылықтардың қалыптасуына әсер етті (Diamond, 1999).

Қоғам дамуындағы географиялық (табиғи) факторларға деген көзқарас дәуірден дәуірге өзгеріп отырады деген тұжырым айтылады. Бұл өзгеріс ғылым мен қоғамның дамуына, сондай-ақ табиғи жағдайлардың өзгеруі мен табиғи ресурстардың азаюына байланысты түсіндіріледі.

Қазақстан мен Орталық Азия жағдайында бұл мәселе ерекше мәнге ие. Аймақта урбандалу қарқынының өсуі, астана және ірі қалалар агломерацияларының кеңеюі, су ресурстарының шектеулілігі, ауыл шаруашылығы жерлерінің әркелкі орналасуы және сыртқы нарықтарға тәуелді логистикалық арналар азық-түлік белдеулерін ғылыми негізде жоспарлауды талап етеді. Сондықтан зерттеудің қолданбалы бағыты географиялық алғышарттарды тек теориялық категория ретінде емес, Қазақстандағы қалалық агломерациялардың азық-түлікпен тұрақты қамтамасыз етілуін бағалайтын кеңістіктік-әдіснамалық құрал ретінде қарастыруға негізделеді.

2. Материалдар мен әдістер

Мақала әдіснамалық шолу және тұжырымдамалық модель ұсыну сипатына ие. Сондықтан зерттеу аясында нақты өңір бойынша толық эмпирикалық есептеу жүргізілмейді; ұсынылған модельді апробациялау келесі зерттеу кезеңінің міндеті ретінде қарастырылады. Болашақ эмпирикалық тексеруде ресми статистика, әкімшілік деректер, кәсіпорындық ақпарат, жер пайдалану қабаттары, көлік желісі, су ресурстары және нарыққа қолжетімділік көрсеткіштері пайдаланылуы мүмкін. Көрсеткіштерді салыстыру үшін min-max нормалау, сараптамалық немесе аналитикалық салмақтау, сондай-ақ салмақтардың өзгеруіне сезімталдық талдауы қолданылуы ұсынылады.

Қоғам мен табиғаттың арақатынасы туралы ғылыми ойдың бастаулары ежелгі дәуірден қалыптаса бастады. Қоғамның рухани өмірінде табиғат бейнесі әрдайым маңызды орын алғанымен, оны философиялық-теориялық деңгейде жүйелі түсіндіру кейінгі кезеңдерде күшейді. Осыған байланысты зерттеуде географиялық фактордың қоғам дамуына ықпалы жөніндегі көзқарастардың тарихи эволюциясы кезеңдеу, салыстырмалы-тарихи талдау және логикалық жинақтау тәсілдері арқылы қарастырылды. Әдебиеттерді іріктеу барысында «географиялық фактор», «географиялық орта», «қоршаған орта» ұғымдарының мазмұны және оларды түсіндіру логикасы салыстырылды. Төмендегі 1-кестеде әр дәуірде географиялық фактор жөніндегі түсінікті қалыптастыруға ықпал еткен негізгі ойшылдар мен еңбектердегі өзекті тұжырымдар жүйеленіп, олардың қазіргі қолданбалы зерттеулердегі әдіснамалық мәні көрсетілді.

Кесте 1. Ғылыми географиялық мектептердегі географиялық негізгі факторлар

Ғылыми географиялық мектептердегі географиялық фактор		
Көрнекті өкілдер мен кезеңдер	Негізгі идея	Әдіснамалық маңызы
Антик дәуір (б.з.д. V-I ғғ.)		
Аристотель (б.з.д. 384-322), Полибий (б.з.д. 200-120), Посидоний (б.з.д. 135-51), Страбон (б.з.д. 64/63-23/24), Гиппократ (б.з.д. 460-370), Витрувий (б.з.д. I ғ.)	Климат пен табиғи жағдайлардың халықтың дене бітімі, әдет-ғұрпы, шаруашылығы және саяси формаларына ықпалы (табиғи орта - қоғам ерекшелігі)	Факторлық түсіндірудің бастапқы логикасын береді: табиғи шарттарды көрсеткішке (климат, су, жер) айналдыруға және себеп-салдар байланысын құруға негіз
Орта ғасыр		
Ибн Халдун (1332-1406)	Халықтар мен тайпалардың табиғаты мен әдет-ғұрпындағы айырмашылықтарды табиғи және климаттық жағдайлардың ықпалымен түсіндіру	Табиғи ортаны әлеуметтік құбылыстармен байланыстыру тәжірибесі: қазіргі жүйелік үлгіде табиғи және әлеуметтік-экономикалық блоктарды байланыстыруға әдіснамалық негіз
XVI ғасыр		
Жан Боден (1530-1596), «Мемлекет туралы алты кітап»	Географиялық факторды мемлекет пен басқару мәселесіне енгізу (орта мемлекеттік құрылым)	Институционалдық өлшемдерді (жер пайдалану, жоспарлау, мемлекеттік қолдау) факторлық талдауға қосудың логикасын қалыптастырады
XVIII ғасырдағы көзқарастардың дамуы		
Ж.Ж. Руссо (1712-1778), А.Р. Тюрго (1727-1781), Ш. Монтескье (1689-1755), «Заңдар рухы туралы»	Табиғат - өркениет қатынасы; әлеуметтік ұйымның шаруашылық тәсілдермен шартталуы; географиялық және әлеуметтік-саяси факторлардың байланысы (детерминизм элементтері)	Факторларды көпқырлы түсіндіруді күшейтеді: табиғи + шаруашылық + саясат. Бұл қазіргі «блоктарға бөлу» және көрсеткіштерді жүйелеу қағидасына негіз
XIX ғасырдың бірінші жартысындағы көзқарастардың дамуы		
Карл Риттер (1779-1859), «Жер туралы ғылым»; Виктор Кузен (1792-1867)	География мен тарих байланысы; елдің тарихтағы рөлін географиялық ерекшеліктерімен байланыстыру	Аймақтарды салыстыру мен зоналауға негіз: аумақтарды «қолайлы, шектеулі» зоналарға бөлу логикасын қалыптастырады
XIX ғасырдың екінші жартысындағы көзқарастардың дамуы		
Генри Бокль (1821-1862)	Географиялық факторды қоғам құрылымы, дін, мораль сияқты өлшемдермен байланыстырып түсіндіру; детерминизм идеяларын дамыту	Әлеуметтік-мәдени айнымалыларды енгізу тәжірибесі: қолданбалы зерттеуде әлеуметтік блок көрсеткіштерін (еңбек, тұтыну, кооперация) таңдауға негіз

XIX ғ.Марксистік мектеп		
Г.В. Плеханов (1856-1918), «Тарихқа монистік көзқарасты дамыту мәселесіне»	Географиялық факторды мемлекет тағдыры мен қоғамдық дамудағы шарттардың бірі ретінде түсіндіру	«Бір ғана себеп» емес, шарттардың жиынтығы идеясы: факторларды жүйе ретінде өлшеу және салмақталған индикаторлармен бағалауға негіз
XX ғасырдың басындағы зерттеу бағытының өзгеруі		
Герберт Спенсер (1820-1903), Фридрих Ратцель (1844-1904)	Ғылымдар тоғысы, тәсілдердің жаңаруы; географиялық фактордың қоғам дамуына ықпалын әртүрлі пәндермен бірге түсіндіру	Кеңістіктік талдау мен жүйелік синтездің (картографиялау, модельдеу) қажеттілігін әдіснамалық тұрғыда ақтайды
Қазіргі зерттеулер (XX-XXI ғасырдың басы)		
Арнольд Тойнби (1889-1975), «Тарихты түсіну»; Карл Витфогель (1896-1988), «Шығыс деспотизмі» (1957)	Өркениеттер теориясы; географиялық жағдайлардың (әсіресе су ресурстарының) саяси құрылымдар мен басқаруға ықпалын сипаттау	Табиғи ресурс (су) мен институт байланысын көрсетеді: су ресурсы, ирригация және басқару индикаторларын әдістемелік модельге енгізуге негіз

Ескерту - Әдебиеттер негізінде авторлар құрастырған (Hippocrates, 1994; Montesquieu, 2011; Mukitanov, 1985)

Жоғарыда берілген 1-кестеде географиялық фактор туралы көзқарастардың дамуы үш ірі үрдіс арқылы байқалады. Бірінші кезеңде (антик-орта ғасыр) табиғи ортаның, әсіресе климаттың қоғам өміріне әсері бастапқы себептік байланыс ретінде түсіндірілді: табиғи жағдай → халық ерекшелігі → шаруашылық және басқару формалары. Екінші кезеңде (XVI–XIX ғғ.) географиялық фактордың мазмұны кеңейіп, табиғи шарттар мемлекет құрылысы, қоғамдық ұйым, өркениеттік даму сияқты ірі категориялармен байланыстырылды, осы арқылы географиялық орта бір ғана «табиғи фон» емес, қоғам дамуын түсіндіретін көпқырлы шарттар жиынтығы ретінде қарастырыла бастады. Үшінші кезеңде (XX ғ. басынан бүгінге дейін) ғылымдар тоғысы күшейіп, географиялық факторды талдауда әлеуметтік-экономикалық және институционалдық өлшемдермен бірге қарастыру қажеттігі айқындалды.

Осы тарихи эволюция қазіргі қолданбалы зерттеулер үшін маңызды әдіснамалық қорытынды береді. Географиялық факторды «бір себеп» ретінде емес, көпдеңгейлі жүйе ретінде ұғыну қажет. Сондықтан азық-түлік белдеуін зерттеу барысында географиялық алғышарттарды жүйелеу (табиғи-агроэкологиялық, әлеуметтік-экономикалық, кеңістіктік-логистикалық, институционалдық блоктар), әр блокты өлшенетін көрсеткіштермен сипаттау және нәтижені кеңістіктік шешімге айналдыру (картографиялау, зоналау, басымдық аймақтарды белгілеу) негізгі әдіснамалық талапқа айналады.

Осы тұрғыдан алғанда, «факторлар – деңгейлер – көрсеткіштер – нәтиже» қағидасы тарихи теориялық ұстанымдарды қолданбалы бағалау тіліне көшіреді, факторлар жүйесі нақты индикаторлар арқылы өлшенеді, деңгейлер бойынша (жергілікті-аудандық-аймақтық) салыстырылады, ал интегралды нәтиже кеңістіктік жоспарлау мен басқару шешімдерін негіздеуге қызмет етеді. Демек, кестеде берілген идеялар эволюциясы азық-түлік белдеуін бағалаудың қазіргі әдіснамалық үлгісін негіздейтін теориялық іргетас ретінде қарастырылады.

Бұл бөлімде мақала аясында алынған негізгі теориялық және әдіснамалық нәтижелер беріледі: географиялық фактор ұғымының эволюциясы, оны көпфакторлы жүйе ретінде түсіндіру логикасы және азық-түлік белдеуін бағалауға бейімделген тұжырымдамалық-әдіснамалық негіз.

3. Нәтижелер

Белгілі бір елдің әлеуметтік-экономикалық дамуы табиғи факторларға тікелей тәуелді деген болжамға сүйенген дүниетанымдық тұжырымдама дәстүрлі түрде *географиялық*

детерминизм деп аталады. Табиғаттың ықпалына басымдық берген бұл бағыттың өкілдері Ш. Монтескье мен Д. Дидро халықтың табиғатын ең алдымен климаттық жағдай арқылы анықтауға болады деген пікірді ұсынды (Montesk'e, 1955).

Географиялық детерминизм идеялары қайта өрлеу дәуірінен бастап жаңа серпін алып XVI ғасырда Жан Боденнің еңбектерінде айқын көрініс тапты. Ол халықтардың ерекшеліктерін климаттық және өзге де географиялық жағдайлармен түсіндірумен қатар, осы факторлардың әртүрлі мемлекеттердің әлеуметтік-саяси құрылымының қалыптасуындағы рөлі жөнінде қорытындылар жасады. Кейінірек XVIII ғасырда Монтескье географиялық және әлеуметтік-саяси факторлардың байланысын жүйелі түрде талдап, бұл бағыттың теориялық негізін кеңейтті.

Қоғам мен қоршаған орта арасындағы байланыс мәселелері 1960-1970 жылдары ерекше өзектілікке ие болды. Осы кезеңде географиялық факторлардың қоғамға ықпалын түсіндіретін жаңа теориялық бағыттардың бірі ретінде *энвайронменталист* қалыптасып, батыс ғылыми мектептерінде дамыды.

Нәтижесінде қоғам мен табиғаттың өзара әрекеттесуін зерттеуде географиялық фактордың рөлін жүйелі түрде бағалау және оны қазіргі әлеуметтік-географиялық үдерістермен байланыстыра талдау ғылыми тұрғыдан маңызды міндетке айналды (Anuchin, 1982).

Қоғам мен табиғаттың өзара әрекеттесуін түсіндіретін біртұтас географиялық-детерминистік тұжырымдамалардың бірі XIX ғасырдың бірінші жартысында К. Риттердің еңбектерінде қалыптасты. Осы кезеңнен бастап географияда түрлі бағыттар мен ғылыми мектептер пайда болып, олардың едәуір бөлігі детерминистік ұстанымға сүйенді. Солардың ішіндегі ең ықпалды бағыттардың бірі – антропогеография, ол К. Риттердің идеяларымен сабақтасып, кейін Г. Спенсер мен әсіресе Ф. Ратцельдің еңбектерінде жүйеленді (Gladkii et al., 2021).

XX ғасырдың екінші жартысында Еуразиялық географиялық детерминизм мектебі қайта жанданды. Бұл үрдіс XIX – XX ғасырдың басындағы орыс географиялық мектебінің ғылыми мұрасы мен посткеңестік кезеңдегі орыс әлеуметтік ойында қалыптасқан географиялық детерминизм бағыттарының идеялық сабақтастығымен тығыз байланысты болды (Abdurazakov, 2011).

Осы тұрғыдан Ресейдің белгілі географы В.А. Анучин өз зерттеулерінде табиғи жағдайлар мен техносфераның адамзат қоғамына тікелей ықпалын *географиялық фактор* ретінде сипаттайды. Сондай-ақ, И. Мечников қоғамның дамуында су кеңістігі әрқашан шешуші фактор болғаны туралы пікір айтты (Mechnikov, 1995).

4. Талдау

XIX ғасырдың аяғы мен XX ғасырдың басындағы қалыптасқан ресейлік ғылыми-географиялық мектептердің көзқарастары географиялық фактор мен географиялық алғышарттар ұғымдарын қалыптастыруда маңызды рөл атқарады. Бұл кезеңде аталған ұғымдардың дамуына үлес қосқан көптеген ғалымдардың еңбектері төмендегі кестеде жүйеленіп берілген.

Кесте 2. Ресейлік ғылыми мектептердің көрнекті өкілдерінің географиялық факторларға көзқарастары

Көрнекті зерттеген ғалымдар	Ғылымға қосқан үлесі	Географиялық факторға көзқарас
П. П. Семенов Тян-Шанский географиялық мектебі		

П.П. Семенов Тян-Шанский, Н.М. Пржевальский, С.В. Обручев, И.В. Мушкетов, А.П. Федченко, П.А. Кропоткин, Н.Н. Миклухо-Маклай, И.Д. Черский	Ресейдің кешенді географиялық зерттеуінің негізін қалады	Антропоцентризм идеялары және табиғаттағы заңдылықтардың байланысы
Анучин университетінің мектебі (1884 ж.)		
А.С. Барков, Л.С. Берг, В.В. Богданов, М.С. Боднарский, А.А. Борзов, С.Г. Григорьев, А.Н. Джавахишвили, Б.П. Дитмар, Б.Ф. Добрынин, А.А. Ивановский, П.Г. Игнатов, А.А. Крубер, И.М. Крашенинников	Ландшафттарды, елтану мен физикалық географияны зерттеуге кешенді көзқарасты дамытқан	Географиялық фактордың әсері табиғи және қоғамдық элементтерде, қоғамдық және табиғи заңдардың өзара әрекеті
Докучаев географиялық мектебі (XIX ғ.аяғы)		
А.Н. Краснов, Г.И. Танфильев, Н.М. Сибирцев, К.Д. Глинка, В.И. Вернадский, Г.Ф. Морозов, Г.Н. Высоцкий, Л.С. Берг *топырақтанушы-географтар* Б.Б. Полынов, С.С. Неуструев	Мектеп топырақтың тәуелсіз биокосты дене екенін дәлелдеді, топырақтың зоналылық заңдылықтарын орнатты және физикалық география, геоботаника және геоморфология негіздерін қалыптастырды	Қоғам табиғаттың материалдық әлемінің бөлігі ретінде, оның компоненттері мен адам арасындағы байланыстарды бөлектеу
Кеңестік экономикалық аудандастыру мектебін құрушылар (1920-1930 жж)		
И.Г. Александров, Н.Н. Баранский, Н.Н. Колосовский	Экономикалық географияның негізгі әдістемелік мәселелерін зерттеумен айналысты	Н.Н. Баранский, Н.Н.Колосовский географиялық фатализмнің рөлі, тағдыры асыра айтылған жағдайда жағымсыз құбылыс бар деп тұжырымдады елдер көп жағдайда табиғи жағдайларға тәуелді болмауы мүмкін деген көзқарас танытты
Берг-Борзов физикалық-географиялық мектебі		
Я.А. Солнцев, С.В. Калесник, Д.Л. Арманд	Кеңестік физикалық географияның ландшафтық бағытын дамытты	Ландшафттардың объективі арқылы табиғаттың көптеген компоненттерін географиялық тұрғыдан қарастырумен және табиғаттың белгілі бір компоненттерінің тарихы мен географиясының заңдылықтары аясында ландшафттарды зерттеумен сипатталады.
Ескерту - (Anuchin, 1982; Baransky, 1980; Kolosovsky, 1958; Saipov et al., 2016; Kolosovsky, 2006; Kuzyakov, 2019)		

Кестеде Ресей және Кеңес дәуіріндегі ғылыми-географиялық мектептердің «географиялық фактор» ұғымын түсіндіру эволюциясы жинақталып берілген. П. П. Семенов Тян-Шанский мектебі экспедициялық-елтанулық және кешенді зерттеу дәстүрін қалыптастырып, табиғат заңдылықтарын адам қоғамымен байланыстыра қарастыруға негіз қалады. Анучин университеті мектебі географиялық факторды табиғи және қоғамдық элементтердің өзара әрекеті ретінде түсіндіріп, физикалық география мен елтануда интегративті ұстанымды күшейтті. Докучаев мектебі топырақтың дербес табиғи дене екендігін және зоналылық заңдылықтарын дәлелдеу арқылы табиғи-ғылыми іргетасты нығайтып, қоғамды табиғи жүйенің құрамдас бөлігі ретінде қарастыру тәсілін бекітті. Ал

кеңестік экономикалық аудандастыру мектебінде (И.Г. Александров, Н.Н. Баранский, Н.Н. Колосовский) географиялық фатализм сынға алынып, елдердің дамуы тек табиғи жағдайларға тәуелді емес, әлеуметтік-экономикалық ұйымдасу мен басқарудың рөлі жоғары екені айқындалды. Берг-Борзов физикалық-географиялық мектебі ландшафтық бағытты дамытып, географиялық факторды табиғат компоненттерінің кеңістіктік-тарихи заңдылықтарын кешенді талдау арқылы түсіндіруге ұмтылды. Жалпы алғанда, кесте географиялық факторды біржақты детерминистік түсіндіруден жүйелік өзара байланыс пен көпфакторлы талдау қағидатына қарай ауысқан ғылыми үрдісті көрсетеді.

XIX ғасырдың екінші жартысы XX ғасырдың басында *географиялық детерминизм* кең таралып, ғылыми дискурста жоғары ықпалға ие болды. Бұл бағытқа әртүрлі деңгейде үлес қосқан зерттеушілер қатарына Ж.Ж. Элиза Реклу, Карл Риттер, Генри Томас Бокл, Эллсворт Хантингтон, А.П. Паршев және т.б. ғалымдарды атауға болады.

XX ғасырдың басында экономикалық географтар географиялық деректердің алуан түрлілігін жинақтап, жүйелеудің бірыңғай әдістемелік тәсілдерін іздестіруге айтарлықтай күш салды. Осы ізденістер кеңестік экономикалық-әлеуметтік география аясында Н.Н. Баранский мен Н.Н. Колосовский еңбектерінде нақтыланып, экономикалық аудандастыру теориясының қалыптасуына негіз болды (Tikhomirov, 2023).

Н.Н. Баранскийдің көптеген еңбектерінде адамзат қоғамының табиғатқа ықпалы, табиғи ортаның «қоршаған ортаға» айналу үдерісі, сондай-ақ географиялық ортаның қоғам дамуына кері әсер ету тетіктері талданады.

XX ғасырдың екінші жартысында география ғылымдарының философиялық және әдіснамалық мәселелерін дамытуға бағытталған зерттеулер күшейді. Бұл кезеңде В.А. Анучин, И.П. Герасимов, Ю.Г. Саушкин, В.Б. Сочава, П. Хаггет, Д. Харвей және басқа ғалымдардың еңбектері географиялық теорияның нысаны мен пәнін нақтылауға, кеңістіктік талдау мен жүйелік синтез тәсілдерін дамытуға ықпал етті.

Соңғы жылдары экономикалық, әлеуметтік, мәдени және саяси үдерістерді өзін-өзі ұйымдастыру тетіктері тұрғысынан географиялық кеңістік факторының рөлі жиі талқылануда. Қоғамның дамуындағы географиялық фактордың рөлі туралы көзқарастардың өзгеруі практикалық әрі теориялық мәнге ие, өйткені бұл рөлді түсіну қоғам мен табиғи орта арасындағы қатынастардың заманауи идеологиясын қалыптастыруға және қоғам-табиғи орта жүйесіндегі басымдықтарды анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар табиғи жағдайлар, ресурстарға қолжетімділік, көлік-кеңістіктік орналасу және саяси-әлеуметтік институттар сияқты географиялық алғышарттар мемлекеттер мен өркениеттердің экономикалық дамуына, саяси шешімдеріне және әлеуметтік өзгерістеріне елеулі ықпал етеді (Rahman et al., 2015). Географиялық факторлардың ықпалы артқан сайын, олардың қоғамдық жүйедегі орны, әсіресе өндіргіш күштер құрылымындағы үлесі күшейеді (Czuczor et al., 2023).

География ғылымдары аясында географиялық фактордың мемлекеттердің тарихы мен саясатына ықпал ету дәрежесін түсіндіруге бағытталған ой ағымы қалыптаса бастады. Мемлекеттер мен халықтардың тарихи дамуына географиялық жағдайлардың әсерін талдаған Ш.Л. де Монтескьенің еңбектерінен бастау алған географиялық детерминизм кейінірек сыртқы саясат саласында да қолданылып, геосаяси пайымдаулардың теориялық негізіне айналды. Географиялық факторды саяси талдауға енгізу сыртқы саяси стратегияны негіздеуге және айқындауға, сондай-ақ жаһандық саяси үдерістерді түсіндіруге бағытталған геосаяси теориялар мен үлгілердің қалыптасуына ықпал етті (Artamoshin et al., 2024).

Географиялық ортаның қоғам дамуына ықпалын талдауда неміс ғылыми дәстүрінің орны ерекше болды. Неміс географы Фридрих Ратцель елдің тарихы мен мәдениетін түсіндіру үшін алдымен оның географиялық орналасуы мен кеңістіктік жағдайларын зерттеу қажеттігін атап көрсетіп, мәдени байланыстарды да географиялық орта арқылы пайымдауға болады деген идеяны алға тартты.

Жалпы геосаяси ойдың дамуына Хэлфорд Макиндер елеулі үлес қосты, ол әлемдік кеңістікті тұтас жүйе ретінде қарастырып, жаһандық деңгейдегі геосаяси сценарий ұсынды.

XX ғасырдың 1960-жылдарынан бастап географияда жүйелік тәсіл қалыптаса бастады, ол табиғи және қоғамдық құбылыстарды өзара байланысқан жүйе ретінде түсіндіруге мүмкіндік беріп, «жер туралы ғылымдардың» синтезіне ықпал етті. Осы бағыттағы теориялық-әдіснамалық ізденістер батыс географиясында да дамып, кеңістіктік талдаудың жаңа құралдарын күшейтті (мысалы, кеңістіктік үлгілер, аймақтық жүйелер, желілер және т.б.).

Ауыл шаруашылығы өндірісін зерттеуде саланың мамандануы мен орналасуы көбіне кеңістіктік (географиялық) факторлармен айқындалады: табиғи жағдайлар, су мен жер ресурстарына қолжетімділік, ірі тұтыну нарықтарына (қалаларға) жақындық және инфрақұрылымның даму деңгейі. Осыған байланысты өндіргіш күштердің ауыл шаруашылығында оңтайлы орналасуын талдауда кеңістіктік-аумақтық тәсілдің мүмкіндіктері жоғары. Бұл бағытта «кеңістіктік аграрлық экономика» желісі қалыптасып, оның классикалық негіздерінің бірі Иоганн Генрих фон Тюнен ұсынған аграрлық орналасу үлгісімен (1826) байланыстырылады, кейін бұл ойлар Вильгельм Лаунхардт және Альфред Вебер еңбектерінде орналастыру теориялары деңгейінде дамытылды (Thünen, 1826). Й. Фон Тюненнің көпжылдық практикалық бақылауларға сүйене отырып, шартты орталыққа қатысты ауыл шаруашылығы өндірістерінің аумақтық орналасу ерекшеліктерін сипаттайтын бірқатар қағидаларды тұжырымдады, бұл үлгіде аталған орталық аймақтың негізгі қаласы (нарық орталығы) ретінде қабылданады (Poljan, 2001).

Й. Фон Тюнен үлгісінде қала (нарық орталығы) айналасындағы жер ресурстарын пайдалану және ауыл шаруашылығы өндірістерінің кеңістіктік орналасуы жүйелі түрде модельденеді. Бұл кеңістіктік орналастыру логикасы кейін А. Маршалл еңбектеріндегі агломерациялық түсініктермен толықтырылды: ол өндіріс ауқымынан туындайтын сыртқы үнемнің (сыртқы тиімділіктің) қалалық шоғырланудың өсуін жеделдететін негізгі қозғаушы фактор екенін көрсетеді (Marshall, 1919). Сонымен қатар Дж. В. Хендерсон қалаларды өзара байланысқан қалалар жүйесі ретінде қарастырып, қала өлшемдері мен мамандану типтерін экономиканың кеңістіктік ұйымдасуымен байланыстырады (Henderson, 1974). Аталған теориялық негіздер азық-түлік белдеуін бағалауда «нарыққа жақындық–тасымал шығыны–инфрақұрылым–агломерациялық тиімділік» байланысын көрсеткіштер арқылы өлшеуге мүмкіндік береді.

Әлеуметтік-экономикалық географиядағы зерттеулер ішінде аймақтардың экономикасы мен әлеуметтік саласының даму заңдылықтарын түсіндіруге арналған еңбектер ерекше орын алады. Әлеуметтік және экономикалық үдерістерге біртұтас тұжырымдамалық ұстанымды айқындау аймақтық даму мәселелерін шешуге бағытталған географиялық зерттеулерде арнайы әдіснаманы қолдануды талап етеді. Әлеуметтік-экономикалық география саласындағы зерттеулердің ішінде аймақтардың экономикасы мен әлеуметтік саласының даму заңдылықтарын түсіндіруге арналған еңбектер ерекше орын алады (Kuznetsova, 2014).

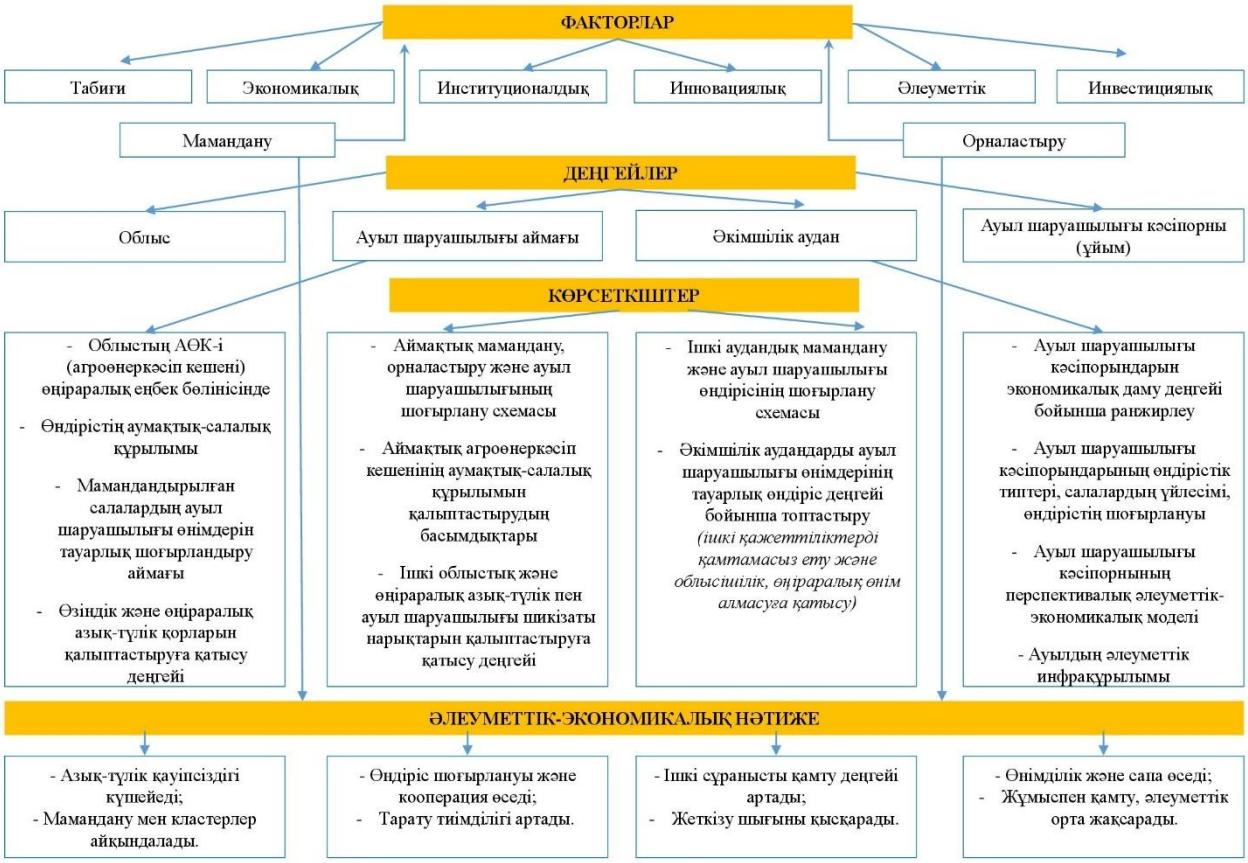
Зерттеу барысында әлеуметтік-экономикалық дамуды түсіндіретін теориялық-әдіснамалық еңбектерді шартты түрде үш топқа бөліп қарастыруға болады:

Бірінші топқа аймақтық өсу теорияларын және аймақтық дамудың жалпы модельдерін құруға бағытталған іргелі теориялық зерттеулер жатады. Бұл қатарға орталық–перифериялық қатынастар, кумулятивті өсу және полюстік даму тұжырымдамаларына арналған еңбектерді енгізуге болады. Аталған бағыттардың қалыптасуына Жан-Рене Будвиль, Гуннар Мюрдал, Франсуа Перру, Пьер Потье, Джон Фридман және басқа ғалымдар елеулі үлес қосты.

Екінші топқа әлеуметтік-экономикалық география аясында өңірлердің даму факторларын нақты кеңістіктік және институционалдық параметрлер арқылы талдайтын зерттеулер жатады. Бұл бағытта Н.В. Зубаревич өңірлік дамуды түсіндіретін факторларды кеңірек пайымдап, оларды үш ірі өлшем арқылы сипаттайды: *density* - халық пен экономикалық белсенділіктің кеңістіктік шоғырлануы және ауқым (масштаб) әсері; distance - географиялық орналасу мен инфрақұрылым сапасына тәуелді «экономикалық қашықтық» (нарыққа қолжетімділік, тасымал шығыны, уақыт); *division* - кең мағынадағы

институционалдық кедергілер (әкімшілік шекаралар, реттеу, нарықтың бөлшектенуі, келісім немесе кооперациядағы шектеулер) (Zubarevich, 2010).

Сонымен қатар кеңістіктік дамуды бағалауда факторларды маңыздылығы және оларға ықпал ету мүмкіндігі тұрғысынан жіктеу өзекті. Географиялық факторлардың «қайсысы базалық, қайсысы туынды» екенін жүйелеу үшін Абрахам Маслоу ұсынған «қажеттіліктер иерархиясы» үлгісін сараптамалық аналогия ретінде пайдалануға болады. Бұл тәсілде факторлар төменнен жоғары қарай шектеуші базалық жағдайлардан (табиғи-климаттық алғышарттар, су және жер ресурстары), одан кейін кеңістіктік ұйымдасу (қоныстану жүйесі), инфрақұрылыммен қамтамасыз етілу, экономиканың құрылымы мен даму деңгейі, сондай-ақ институционалдық және субъективті факторларға дейін төмендегі 1-суретте сатыланып қарастырылады (Kuznetsova, 2013).



Сурет 1. Ауыл шаруашылығының мамандану және орналастыру факторлары мен жүйесі көрсеткіштері

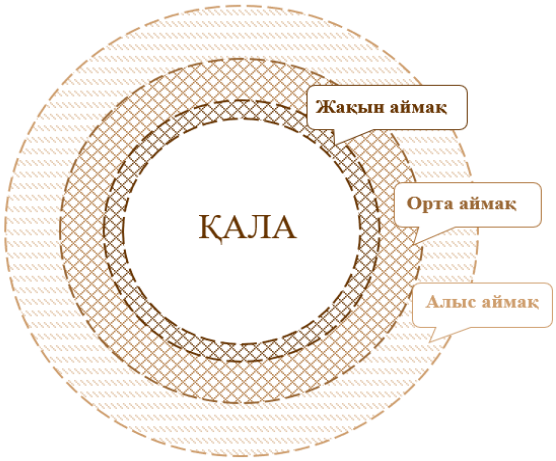
Ұғымдарды қолданудың әдіснамалық негізі ретінде сызбада көрсетілген «факторлар – деңгейлер – көрсеткіштер – нәтиже» логикасы алынады. Мұнда факторлар (табиғи, экономикалық, институционалдық, инновациялық, әлеуметтік, инвестициялық) агроөнеркәсіп кешенінің (АӨК) мамандануы мен орналастырылуын айқындайтын алғышарттар жүйесі ретінде қарастырылады. Талдау көпдеңгейлі форматта жүргізіледі: облыс, ауыл шаруашылығы аймағы, әкімшілік аудан және кәсіпорын деңгейлерінде әр деңгейге тән көрсеткіштер іріктеліп, олар арқылы аумақтық айырмашылықтар мен ішкі құрылымдық ерекшеліктер бағаланады. Бұл көпдеңгейлі құрылым нәтижені «төменнен жоғары» (кәсіпорын → аудан → аймақ → облыс) жинақтау және «жоғарыдан төмен» (аймақтық саясат немесе нарық → инфрақұрылым → кәсіпорындық шешім) ықпал ету арналары арқылы түсіндіруге мүмкіндік береді.

Әдіснамада көрсеткіштер жүйесі тек «өндіріс көлемі» индикаторымен шектелмей, оны нарыққа кірігу, тауарлылық, өндірістің шоғырлануы, өңдеу және сақтау қуаты, көлік-

логистикалық байланыс, сондай-ақ әлеуметтік инфрақұрылым сияқты параметрлермен толықтыру қажеттігі негізделеді. Әртүрлі өлшем бірліктеріндегі деректерді салыстыру үшін көрсеткіштер нормаланады, факторлық блоктар бойынша салмақталып, көпкритерийлі бағалау арқылы интегралды индекстер есептеледі, осының нәтижесінде аймақтар мен деңгейлер бойынша салыстырмалы «күшті немесе әлсіз» аймақтарды айқындау және кеңістіктік басымдықтарды нақтылау мүмкін болады.

Түпкі қорытынды өлшем ретінде әлеуметтік-экономикалық нәтиже қарастырылады. Ол интегралды көрсеткіш ретінде операцияланып, (а) халықтың сапалы тағамға физикалық және экономикалық қолжетімділігі, (ә) баға мен жеткізудің тұрақтылығы, (б) логистикалық сенімділік (жеткізу уақыты, шығын, балама арналардың болуы), (в) жұмыспен қамту мен табыс өсімі, (г) өңірлік теңгерім және (д) өмір сапасының жақсаруы сияқты нәтижелер жиынтығымен сипатталады. Осы тұрғыдан азық-түлік белдеуінің функциясы қала халқын өніммен қамтамасыз етуімен ғана шектелмей, төтенше жағдайларда (табиғи-климаттық, макроэкономикалық, әлеуметтік және сыртқы экономикалық тәуекелдер) жеткізудің үздіксіздігін сақтайтын төзімділік қабатын қалыптастыру екені нақтыланады. Сондықтан мониторинг, шекті мәндерді белгілеу, қор қалыптастыру және логистикалық әртараптандыру сияқты механизмдерді қолданудың өзектілігі көрсетіледі.

Қазіргі таңда бірқатар географиялық зерттеулер кеңістіктік дамуды түсіндіруде экономист, эконом-географ Пол Кругман ұсынған тұжырымдамалық негіздерге сүйенеді (Krugman, 1991). Оның дәлелі ретінде 1990 жылдардың басында қалыптасқан «орталық-периферия» үлгісін және соның аясында кең танылған «Жаңа экономикалық география» бағытын атауға болады. Бұл тәсіл шеңберінде Пол Кругман сауда, кеңістіктік шоғырлану және әлеуметтік-экономикалық теңсіздік арасындағы өзара байланысты, сондай-ақ агломерациялық әсерлер мен көлік шығындарының рөлін талдауға басымдық береді. Толығырақ төмендегі сурет 2 – азық-түлік белдеуінің агроөндірістік құрылымы қарастырылған.



Сурет 2. Азық-түлік белдеуінің агроөндірістік құрылымы

2-суретте қала мен оған ықпал ететін кеңістік арасындағы байланыс «жақын - орта - алыс» аймақтар арқылы көрсетілген. Бұл жерде «қала маңы аймағы» мен «азық-түлік белдеуі» ұғымдарын тең мағынада қолдануға болмайды: қала маңы аймағы көбіне қалаға іргелес аумақты білдіреді, ал азық-түлік белдеуі қала сұранысын қамтамасыз ететін өндіріс, өңдеу, сақтау және жеткізу жүйелерін қамтитын кең функционалдық кеңістік болуы мүмкін. Сондықтан азық-түлік белдеуінің шекарасы әкімшілік қала маңымен шектелмей, кей жағдайда бірнеше аудан немесе облысаралық байланыстарды қамтиды. Ортасында «қала» – ядро, ал

сыртқа қарай Жақын аймақ → Орта аймақ → Алыс аймақ деп ықпал ету күші мен байланыс сипаты біртіндеп өзгереді.

1) *Жақын аймақ*

- Қалаға ең тығыз байланысқан белдеу: күнделікті қатынау, қызмет көрсету, логистика ең жоғары.

- Жер бағасы жоғары, сондықтан жерді пайдалану интенсивті: жылыжай, көкөніс, сүт өнімдерін жедел жеткізу, қойма-тоңазыту, өңдеу, көтерме тарату тораптары сияқты функциялар жиі орналасады.

- Азық-түлік белдеуі тұрғысынан бұл аймақ "жаңа және тез бұзылатын өнімдерді" (көкөніс, сүт, құс өнімдері) қалаға тез жеткізуге ең қолайлы.

2) *Орта аймақ*

- Қаламен байланыс тұрақты, бірақ жақын аймақтан әлсіздеу; апталық немесе мерзімді жеткізу жиірек.

- Жер пайдалану аралас: аграрлық өндіріс, өңдеу және сақтау, сондай-ақ тұрғын немесе өндірістік функциялар қатар жүруі мүмкін.

- Азық-түлік белдеуінде бұл аймақ көлемді өндіріс пен логистиканы (ірі шаруашылықтар, қойма, өңдеу, көлік тораптары) орналастыруға ыңғайлы.

3) *Алыс аймақ*

- Қаланың тікелей ықпалы төменірек, байланыс сирек немесе маусымдық болуы мүмкін.

- Негізінен экстенсивті ауыл шаруашылығы (астық, мал азығы, жайылым), табиғи ландшафт, кейде рекреация басым.

- Азық-түлік белдеуі үшін бұл аймақ көбіне шикізаттық база қызметін атқарады (ұзақ сақталатын өнімдер, мал азығы, т.б.).

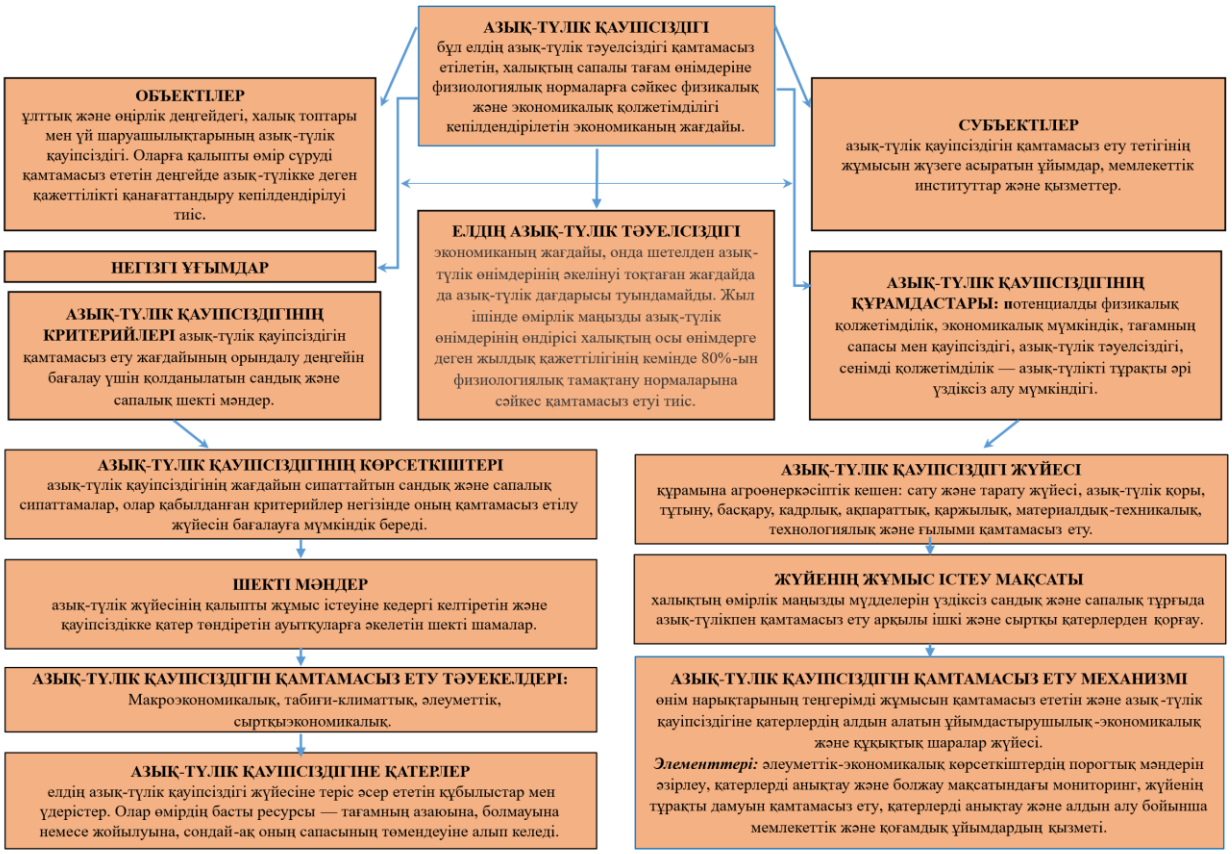
Суреттегі негізгі "идея" қалаға жақындаған сайын: байланыс күшейеді, логистика жылдамдайды, өнім "жаңа және тез бұзылатын" жаққа ауысады, жерді пайдалану интенсивті болады. Сонымен қатар қалаға алыстаған сайын: өндіріс көлемі үлкен, бірақ жеткізу жиілігі төмен; шикізаттық немесе кең аумақты шаруашылық үлесі артады.

Төмендегі 3-суретте азық-түлік қауіпсіздігі жүйесінің негізгі ұғымдары, құрамдастары, тәуекелдері мен қамтамасыз ету тетіктері жинақталып берілді.

3-сурет зерттеудің түсініктемелік-терминологиялық аппаратын нақтылайды. Азық-түлік қауіпсіздігі халықтың физиологиялық нормаларға сәйкес сапалы тағамға тұрақты физикалық және экономикалық қолжетімділігімен сипатталса, азық-түлік тәуелсіздігі сыртқы жеткізілім тоқтаған жағдайда да негізгі өнімдер бойынша ішкі қажеттілікті қамтамасыз ету қабілетін білдіреді.

Осы ұғымдар азық-түлік белдеуін зерттеу үшін базалық негіз қалыптастырады: объектілер мен субъектілер басқару жүйесінің қатысушыларын, критерийлер мен көрсеткіштер бағалау өлшемдерін, шекті мәндер қауіп деңгейін, ал тәуекелдер мен қатерлер жүйенің тұрақтылығына әсер ететін сыртқы және ішкі шектеулерді көрсетеді.

Жұмыстың негізгі нәтижелерінің бірі зерттеудің тұжырымдамалық рамкасы ретінде алынған «факторлар – деңгейлер - көрсеткіштер - нәтиже» қағидасының ғылыми-тәжірибелік тиімділігін көрсету. Табиғи, экономикалық, институционалдық, инновациялық, әлеуметтік және инвестициялық факторлардың АӨК мамандануы мен орналасуын қалыптастыратыны дәлелденіп, талдаудың облыс-ауыл шаруашылығы аймағы-әкімшілік аудан-кәсіпорын деңгейлерінде жүргізілуі аумақтық айырмашылықтарды нақты ашуға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Эмпирикалық бөлімде бұл тәсіл ресми статистика, әкімшілік деректер, кәсіпорындық ақпарат және кеңістіктік қабаттар негізінде іске асырылып, нәтижелер өзара тексеру және сезімталдық талдауы арқылы расталады.



Сурет 3. Азық-түлік қауіпсіздігі жүйесінің негізгі түсініктері мен құрамдас бөліктері

Ұсынылған тұжырымдамалық-әдіснамалық негіздің ғылыми жаңалығын нақтылау үшін оны қолданыстағы кеңістіктік және аймақтық даму тәсілдерімен салыстыру маңызды. Мұндай салыстыру модельдің тек теориялық шолу емес, азық-түлік белдеуін бағалауға бейімделген қолданбалы құрал ретінде ерекшелігін көрсетуге мүмкіндік береді. Осыған байланысты ұсынылған әдіснамалық модельдің қолданыстағы тәсілдерден негізгі айырмашылықтары төмендегі 3-кестеде берілді.

Кесте 3. Ұсынылған әдіснамалық модельдің қолданыстағы тәсілдерден айырмашылығы

Салыстыру бағыты	Қолданыстағы тәсілдердегі басымдық	Ұсынылған модельдегі ерекшелік
Классикалық орналастыру теориялары	Нарыққа жақындық, тасымал шығыны және жер пайдалану логикасы басым қарастырылады.	Бұл логика азық-түлік қауіпсіздігі, инфрақұрылым, сақтау және институционалдық басқару көрсеткіштерімен толықтырылады.
Аймақтық даму факторлары	Зубаревич пен Кузнецова еңбектерінде тығыздық, қашықтық, институционалдық кедергілер және факторлар иерархиясы талданады.	Осы факторлар азық-түлік белдеуіне бейімделіп, өндіріс, өңдеу, сақтау, логистика және қолжетімділік нәтижелерімен байланыстырылды.

Теориялық және қолданбалы жаңалық	Бұрынғы зерттеулер көбіне жалпы өңірлік даму немесе ауыл шаруашылығын орналастыру мәселелеріне бағытталады.	Модель азық-түлік белдеуін бағалаудың дербес рамкасын ұсынады: табиғи-агроэкологиялық, әлеуметтік-экономикалық, кеңістіктік-логистикалық және институционалдық блоктар бөлек деңгей ретінде қарастырылады.

Ескерту - Ұсынылған әдіснамалық модель қолданыстағы теориялық және аймақтық даму тәсілдерін салыстырмалы талдау негізінде авторлар тарапынан құрастырылды (Thünen, 1826; Krugman, 1991; Zubarevich, 2010; Kuznetsova, 2013; Kuznetsova, 2014)

Кестеде көрсетілгендей, ұсынылған модельдің жаңалығы қолданыстағы теорияларды механикалық қайталауда емес, оларды азық-түлік белдеуінің нақты функцияларымен байланыстырып, бағалау бірлігін «фактор - көрсеткіш - кеңістіктік нәтиже» тізбегі арқылы құруында көрінеді.

5. Қорытынды

Осы зерттеуде азық-түлік белдеуін қалыптастыру мен бағалаудың әдіснамалық негізі ретінде «факторлар – деңгейлер – көрсеткіштер - нәтиже» логикасы ұсынылды. Зерттеу нәтижесінде азық-түлік белдеуі қала маңы ауыл шаруашылығының қарапайым кеңістіктік көрінісі емес, табиғи-агроэкологиялық ресурс базасын, өндірістік мамандануды, көлік-логистикалық қолжетімділікті, өңдеу-сақтау инфрақұрылымын және институционалдық басқаруды біріктіретін көпдеңгейлі жүйе екені негізделді.

Біріншіден, азық-түлік қауіпсіздігі, азық-түлік тәуелсіздігі, азық-түлік белдеуі және қала маңы аймағы ұғымдарының мазмұны нақты ажыратылды. Бұл ажырату зерттеу нысанының кеңістіктік шекарасын дұрыс белгілеуге мүмкіндік береді: азық-түлік белдеуі қалаға жақын аумақпен ғана шектелмей, қала сұранысын қамтамасыз ететін өндіріс, сақтау, өңдеу және жеткізу байланыстарының толық жүйесін қамтиды.

Екіншіден, географиялық алғышарттар табиғи-климаттық жағдайлармен ғана шектелмейтіні дәлелденді. Ұсынылған модельде табиғи-агроэкологиялық, әлеуметтік-экономикалық, кеңістіктік-логистикалық және институционалдық блоктар өзара байланысқан жүйе ретінде қарастырылады. Бұл тәсіл географиялық детерминизмнен көпфакторлы кеңістіктік талдауға өтудің әдіснамалық негізін көрсетеді.

Үшіншіден, көпдеңгейлі талдау қағидасы негізделді. Облыс, ауыл шаруашылығы аймағы, әкімшілік аудан және кәсіпорын деңгейлерін бір жүйеде қарастыру аумақтық айырмашылықтарды, өндірістік мамандануды, нарыққа қолжетімділікті және логистикалық шектеулерді салыстырмалы бағалауға мүмкіндік береді.

Төртіншіден, әдіснамалық модельдің түпкі нәтижесі әлеуметтік-экономикалық әсерлер арқылы түсіндірілді: халықтың сапалы азық-түлікке қолжетімділігі, баға мен жеткізудің тұрақтылығы, ауылдық аумақтардағы жұмыспен қамту, өңірлік теңгерім және логистикалық төзімділік азық-түлік белдеуін бағалаудың негізгі қорытынды өлшемдері ретінде айқындалды.

Бесіншіден, мақала нақты эмпирикалық есептеуді емес, оны жүргізуге арналған әдіснамалық негізді ұсынады. Сондықтан келесі кезеңде модельді Ақмола, Алматы немесе басқа агломерациялық өңірлер мысалында апробациялау, көрсеткіштерді шекті мәндер бойынша қалыпқа келтіру арқылы салыстыру, салмақтардың өзгеруіне сезімталдық талдау жүргізу және нәтижелерді картографиялық түрде көрсету қажет.

Негізгі терминдердің бірі – *азық-түлік қауіпсіздігі*. Ол халықтың физиологиялық нормаларға сәйкес сапалы тағам өнімдеріне физикалық және экономикалық қолжетімділігі тұрақты қамтамасыз етілетін жағдайды білдіреді. Осы ұғыммен мазмұндас әрі өзара байланысты категория – елдің азық-түлік тәуелсіздігі: бұл сыртқы жеткізілімдер шектелген жағдайда да елдің (өңірдің) өмірлік маңызы бар өнімдер бойынша ішкі қажеттілікті өтеу қабілеті. Азық-түлік қауіпсіздігі жүйелік сипатқа ие болғандықтан, оның объектілері ретінде

ұлттық және өңірлік деңгейдегі халық топтары мен үй шаруашылықтары, ал субъектілері ретінде қауіпсіздікті қамтамасыз ететін мемлекеттік институттар, ұйымдар мен қызметтер қарастырылады. Қауіпсіздіктің негізгі құрамдастары – өндірістік әлеует (физикалық мүмкіндік), экономикалық қолжетімділік, тағамның сапасы мен қауіпсіздігі, тәуелсіздік және сенімді (үздіксіз) қолжетімділік. Бұл құрамдастарды бағалау үшін зерттеуде критерийлер, көрсеткіштер және шекті мәндер ұғымдары қолданылады: критерийлер – бағалау өлшемі, көрсеткіштер – өлшенетін индикаторлар жиыны, ал шекті мәндер – жүйенің қалыпты жұмыс істеуін бұзатын қауіп аймағын айқындайтын межелер. Сонымен қатар азық-түлік қауіпсіздігіне әсер ететін тәуекелдер (макроэкономикалық, табиғи-климаттық, әлеуметтік, сыртқы экономикалық) және нақты қатерлер (жеткізудің үзілуі, тапшылық, баға тұрақсыздығы, сапаның төмендеуі және т.б.) ажыратылады. Оларды басқару азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету механизмі арқылы іске асады, яғни мониторинг, реттеу, қор қалыптастыру, нарық теңгерімін қолдау және ұйымдастырушылық-құқықтық шаралар жүйесі ретінде түсіндіріледі.

Кеңістіктік тұрғыдан зерттеудің өзекті ұғымы – *азық-түлік белдеуі*. Бұл зерттеуде азық-түлік белдеуі деп қала агломерациясын азық-түлік өнімдерімен қамтамасыз етуге бағытталған, қала маңында орналасқан мамандандырылған ауыл шаруашылығы өндірісі, өңдеу, сақтау және жеткізу инфрақұрылымы шоғырланған аумақтық жүйе түсіндіріледі. Осы ұғымға жақын категория – қала маңы аймағы: ол ядро-қалаға географиялық жақын орналасып, онымен еңбек көші-қоны, нарық, қызмет көрсету және көлік ағындары арқылы тығыз функционалдық байланыста болатын кеңістік. Азық-түлік белдеуі ұғымын нақтылау үшін зерттеуде агроөнеркәсіптік кешен (АӨК) түсінігі де маңызды орын алады: АӨК – ауыл шаруашылығы өндірісі, өңдеу, сақтау, тасымалдау және өткізу буындарының өзара байланысқан жиынтығы. Демек, азық-түлік белдеуін талдау АӨК құрылымын кеңістікте ұйымдастырумен тікелей астасады.

Жүргізілген зерттеу урбандалу мен агломерациялық дамудың күшеюі жағдайында азық-түлікпен қамтамасыз ету мәселесі тек өндірістік көлемді арттырумен шектелмейтінін дәлелдейді. Қазіргі жағдайда азық-түлік қауіпсіздігі мен қала маңы ауыл шаруашылығының тиімділігі, ең алдымен, өндірістің кеңістікте қалай ұйымдастырылғанына, көлік-логистикалық қолжетімділікке, сақтау-өңдеу инфрақұрылымына, институционалдық реттеуге және нарықтық байланыстардың тұрақтылығына тәуелді. Осы тұрғыдан алғанда, азық-түлік белдеуі ұғымы аграрлық өндірістің белгілі бір аумаққа шоғырлануы ғана емес, кеңістіктік, әлеуметтік-экономикалық және басқарушылық үдерістердің өзара байланысқан кешені ретінде қарастырылды.

Зерттеудің теориялық-әдіснамалық бөлігі қала маңы кеңістігін талдаудың ғылыми негіздерін жүйелеуге мүмкіндік берді. Кеңістіктік ұйымдастыру туралы классикалық тұжырымдамалар (И. Тюнен, В. Кристаллер, А. Лёш) азық-түлік белдеулерін қалыптастыруда нарыққа жақындық, көлік шығындары, жер ресурстарының сапасы мен агломерациялық артықшылықтар шешуші факторлар екенін айқындайды. Бұл теориялар қала маңы ауыл шаруашылығы өндірісінің құрылымы мен мамандануын түсіндіруде де маңызды: қалаға жақын аумақта тез бұзылатын әрі жиі жеткізуді қажет ететін өнімдер басым болуы заңды құбылыс. Сонымен бірге, өсу полюстері, инновацияның кеңістікке таралуы және аймақаралық еңбек бөлінісі теориялары азық-түлік белдеуін тек өндіріс аймағы емес, инновациялық-технологиялық жаңару, кластерлену және логистикалық тораптану орын алатын даму кеңістігі ретінде бағалауға негіз береді.

Астана агломерациясы контексінде азық-түлік белдеуін кеңістіктік тұрғыда "жақын–орта–алыс" аймақтарға бөліп қарастыру практикалық мәнге ие. Жақын аймақ, негізінен, күнделікті жеткізілетін тез бұзылатын өнімдерді (жылыжай көкөнісі, сүт, құс өнімдері т.б.) өндіру мен таратудың жоғары интенсивті белдеуі ретінде түсіндіріледі; орта аймақ – сақтау мен өңдеуге бағдарланған, жоспарлы жеткізілетін өнімдер мен көлемді өндіріс үшін қолайлы кеңістік; ал алыс аймақ – ұзақ сақталатын өнімдер мен шикізаттық базаны (астық, жемшөп,

жайылымдық бағыт) қамтамасыз ететін тұрақтылық белдеуі. Мұндай жіктеу азық-түлік белдеуін жобалауда өнім түрлерін, инфрақұрылым басымдықтарын және логистикалық шешімдерді кеңістікте дәл үйлестіруге мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері азық-түлік белдеуін дамыту әлеуметтік-экономикалық нәтижелердің кең спектріне әсер ететінін көрсетті. Біріншіден, қала халқы үшін өнімге қолжетімділік пен баға тұрақтылығы артады, маусымаралық тәуелділік әлсірейді. Екіншіден, ауылдық аумақтарда жұмыспен қамту кеңейіп, кооперация мен кластерлену арқылы қосылған құн өседі. Үшіншіден, өңдеу, сақтау және тарату инфрақұрылымының дамуы өңірлік нарықтың ұйымдасуын жақсартып, логистикалық шығындарды қысқартуға ықпал етеді. Төртіншіден, қала маңы ауыл шаруашылығының экологиялық және кеңістіктік функциясы күшейеді: аграрлық ландшафттарды сақтау, "жасыл белдеу" элементтерімен үйлесім, ресурстарды тиімді пайдалану сияқты міндеттер өзекті болады. Демек, азық-түлік белдеуі қаланың азық-түлік саясатын өңірлік даму стратегиясымен ұштастыратын интеграциялық құрал ретінде қарастырылуы тиіс.

Сонымен қатар, зерттеу шеңберінде бірқатар әдіснамалық тұжырымдар айқындалды. Азық-түлік белдеуін бағалау үшін көрсеткіштер жүйесі міндетті түрде: (1) өндіріс пен мамандану, (2) өңдеу және сақтау қуаты, (3) көлік-логистика және жеткізу уақыты, (4) нарыққа қолжетімділік пен баға факторлары, (5) институционалдық қолдау, (6) тәуекелдер мен тұрақтылық индикаторларын қамтуы қажет. Бұл тәсіл азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етудегі нақты "әлсіз буындарды" (мысалы, қойма тапшылығы, салқын тізбек үзілуі, тасымал құнының өсуі немесе нарық монополиясы) анықтауға мүмкіндік береді.

Қорытындылай келе, зерттеу азық-түлік белдеуін бағалаудың жүйелік және көпдеңгейлі әдіснамасын ұсынды: ол факторларды құрылымдап, көрсеткіштер арқылы өлшеп, интегралды нәтиже шығару арқылы кеңістіктік жоспарлау мен басқарудың практикалық міндеттерін шешуге мүмкіндік береді. Ұсынылған логика өңірлік азық-түлік қауіпсіздігін күшейтуге, өндіріс пен логистиканың тиімділігін арттыруға, әлеуметтік-экономикалық теңгерімді қамтамасыз етуге және тұрақты даму мақсаттарына қол жеткізуге бағытталған ғылыми негізделген шешімдер қабылдауға қызмет етеді.

Жалпы қорытынды ретінде, азық-түлік белдеуі – урбандалу жағдайында қаланы өніммен қамтамасыз етудің табиғи жалғасы ғана емес, кеңістіктік жоспарлау, экономикалық тұрақтылық, әлеуметтік әділеттілік және ұлттық азық-түлік қауіпсіздігі мақсаттарын біріктіретін көпдеңгейлі жүйе. Сондықтан болашақта азық-түлік белдеуін дамыту ғылыми тұрғыда негізделген кеңістіктік модельдеу, инновациялық агротехнологияларды енгізу, "қысқа жеткізу тізбектерін" күшейту және тәуекелдерге төзімді басқару механизмдерін іске асыру арқылы жүзеге асырылуы қажет.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация, әдістемелерді әзірлеу, жетекшілік – Г.О.; әдістемені әзірлеу, бағдарламалық қамтамасыз ету және жоба жетекшілігі – А.С.; әдістемені әзірлеу, зерттеу материалдарымен қамтамасыз ету, жетекшілік – А.С.; әдістемені әзірлеу, зерттеу материалдарымен қамтамасыз ету, жетекшілік – Г.О.; мәтінді дайындау және өңдеу – А.С.; талдау жүргізу – А.Б., А.М.

8. Авторлар туралы ақпарат

Оспанова, Гульнара - PhD докторант, аға оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; ospanova_14@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4035-719X

Мылкайдаров, Алим - г.ғ.к., аға оқытушы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби көш., 71, Алматы, Қазақстан, 050040; mylkaydarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8652-3133

Сансызбаева, Айгерим – PhD, доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; sansyzbayeva.ab@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0695-3406

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеу сыртқы қаржыландыруды алған жоқ.

10. Алғыстар: жоқ.

11. Мүдделер қақтығысы: Мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейміз

12. Әдебиеттер тізімі

1. Zaitsev, V. M. (2019). *Introduction to socio-economic geography* (Vvedenie v social'no-ekonomicheskuyu geografiyu in Russian). Minsk: BSU, pp. 139-141. https://elib.bsu.by/handle/123456789/243369
2. Nisbett, R. (2004). The geography of thought how asians and westerners think differently and why. *Brock Education Journal*, 13(2), 658-669. https:// doi.org/10.26522/brocked.v13i2.52
3. Diamond, J. (1999). *Guns, germs, and steel: the fates of human societies*. *New York:* W. W. Norton, 480 p. https://www.jstor.org/stable/27503687
4. Hippocrates (1994). *About air, waters and localities* (O vozduhe, vodah i naselennyh punktah in Russian). M.: Svarog. pp, 275-306.
5. Montesquieu, S. (2011). *About the spirit of the laws* (O duhe zakonov in Russian). Moscow: Direct-Media, 323 p.
6. Mukitanov, N. K. (1985). *From Strabo to the present day*. The evolution of geographical concepts and ideas (Ot Strabona do nashih dnej in Russian). M.: Thought, p. 237.
7. Anuchin, V. A. (1982). *Geographical factor in the development of society* (Geograficheskij faktor v razvitii obshchestva in Russian). M.: Mysl, 334 p.
8. Baransky, N. N. (1980). *Geographical and economic sites* (Geograficheskie i ekonomicheskie obekty in Russian). https://rusneb.ru/catalog/002744_000053
9. Gladkiy, Yu. N., & Lopatnikov, D. L. (2021). Geographical non-determinism of post-industrial society (Geograficheskij nedeterminizm postindustrial'nogo obshchestva in Russian) *Environment Development*, 4, 71-75. https:// doi.org/10.53115/19975996_2021_04_068-078
10. Abdurazakov, R. A. (2011). Geographical determinism and the geographical school in historical science in Russia at the present stage (Geograficheskij determinism i geograficheskaya shkola in Russian). *Bulletin of Dagestan State University*, 4, 38-44.
11. Mechnikov, L. I. (1995). *Civilization and great historical rivers* (Civilizaciya i velikie istoricheskie reki in Russian). M., 67 p. https://www.vir.nw.ru/wp-content
12. Anuchin, V. A. (1982). *Geographical factor in the development of society* (Geograficheskij faktor v razvitii obshchestva in Russian). Moscow: Mysl Publ, 433 p. https://www.klex.ru/1uly
13. Saipov, A. A., & Mikhalev, R. K. (2016). The system of factors of social and economic development of the country in the process of teaching geography of Kazakhstan according to curricula with updated content (Sistema faktorov social'nogo i ekonomicheskogo razvitiya strany v processe obucheniya geografii in Russian). *Collection of materials of the III International Scientific and practical conference – innovations in education: searches and solutions*, 3, 240-242.
14. Kolosovsky, N. N. (2006). *Selected works* (Izbrannye trudy in Russian). Smolensk Oikumena Publ., 336-338.
15. Kuzyakov, Ya., & Zamanian, K. (2019). Reviews and syntheses: Ag ropedogenesis – humankind as the sixth soil-forming factor and attractors of agricultural soil degradation.

(Pochvoobrazuyushchij faktor i faktory, privlekayushchie sel'skohozyajstvennuyu degradaciyu pochv in Russian). *Biogeosciences*, 16(24), 4783–4803.
16. Tikhomirov, E. A. (2023). Economic geography (Ekonomicheskaya geografiya in Russian), *Scientific Technologies*, *Moscow*, 123-125. https://mf.bmstu.ru/assets/info/faculty/kf/caf/k4/books/
17. Rahman, M., & Nigar, N. (2015). GIS based Integrated approach to measure the spatial equity of community facilities of bangladesh. *AIMS Geosci*, 8, 67-84. https://doi.org/10.3934/geosci.2015.1.21
18. Czuczor, K., Kozma, G., & Radics, Z. (2023). The territorial tourism development strategies and implemented cross border cooperation projects in Bihor County. An assessment of the 2007-2013 and 2014-2020 programming periods and exploitation of the EU funds from the point of view of tourism. *Geojournal of Tourism and Geosites*, 48(2spl), 798–809. https://doi.org/10.30892/gtg.482spl14-1080
19. Artamoshin, S. V., Sagimbaev, A. V., & Fedin, A. V. (2024). Halford Mackinder and the geographical design of politics in the early twentieth century (Helford Makkinder i geograficheskoe oformlenie politiki v nachale in Russian), *Bulletin of the Bryansk State University*, 3, 7-8. https:// doi.org/10.22281/2413-9912-2024-08-03-07-12
20. Thünen, J. H. Von. (1826). *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalokonomie*. Hamburg: Perthes. https://archive.org/details/derisoliertestaa00thuoft
21. Poljan, P. (2001). *Dvadcatoe stoletie: putem demograficheskih katastrof. Gorod i derevnja v evropejskoj Rossii: Sto let peremen*. Red.-sost.: Nefedova T. i dr. M.: O.G.I.
22. Marshall, A. (1993). *Principles of economic science* (Principy ekonomicheskoj nauki in Russian). In 3 volumes. Moscow: Progress.
23. Kuznetsova, O. V. (2014). Typology of factors of socio-economic development of Russian regions (Tipologiya faktorov social'no-ekonomicheskogo razvitiya regionov Rossii in Russian). *Bulletin of the Moscow University*. *Series 5. Geography*, 2, 3-8.
24. Zubarevich, N. V. (2010). Regional development and institutions: Russian specifics (Regional'noe razvitie i instituty in Russian). *Regional studies*, 2, 3-14.
25. Kuznetsova, O. V. (2013). Pyramid of factors of socio–economic development of regions (Piramida faktorov social'no-ekonomicheskogo razvitiya regionov in Russian). *Economic issue*, 2, 121-131. https://doi.org/10.32609/0042-8736-2013-2-121-131
26. Krugman, P. R. (1991). *Geography and Trade*. Cambridge: MIT Press. https://doi.org/10.1604/9780262111591

Methodological foundations of the system of geographical prerequisites in the study of the food belt

Gulnara Ospanova, Alim Mylkaydarov, Aigerim Sansyzbayeva

Abstract: The article examines the system of geographical factors and geographical prerequisites as a theoretical and methodological basis for the study of the food belt. The relevance of the study is determined by the need to ensure food security in the vicinity of large urban agglomerations, maintain the stability of product supply and effectively organize spatial and economic relations between the city and the village. The evolution of scientific approaches from geographical determinism to modern systemic and multifactorial approaches to analysis is summarized and their Applied Value in the assessment of the food belt is revealed. The research methodology was based on the approaches of comparative historical analysis, theoretical accumulation, systematization and multilevel factor analysis. As the main result of the work, the principle of "factors-levels-indicators-result" was proposed, combining natural – agroecological, socio – economic, spatial – logistics and institutional factors. This principle allows us to evaluate the food belt at the levels of the region, agricultural

region, administrative district and enterprise, to draw integral conclusions by rationing and weighing indicators. The proposed approach can serve as an important methodological basis, especially for regions in Kazakhstan and Central Asia, where the process of urbanization is intensified, water and land resources are limited, and logistics risks are high.
The purpose of the study is to methodically substantiate the system of geographical prerequisites in the study of the food Belt and consider it in connection with the tasks of spatial planning, placement of the agro - industrial complex, and ensuring food security.

Keywords: factor; food belt; resource; determinism; environmentalism; center-periphery.

Методологические основы системы географических предпосылок в исследовании продовольственного пояса

Гульнара Оспанова, Алим Мылкайдаров, Айгерим Сансызбаева

Аннотация: В статье рассматривается система географических факторов и географических предпосылок как теоретико-методологическая основа исследования продовольственного пояса. Актуальность исследования определяется необходимостью обеспечения продовольственной безопасности вблизи крупных городских агломераций, сохранения стабильности поставок продукции и эффективной организации пространственно-экономических связей между городом и деревней. Обобщена эволюция научных подходов от географического детерминизма до современных системно-многофакторных подходов к анализу и раскрыто их прикладное значение в оценке продовольственного пояса. Методика исследования базировалась на подходах сравнительно-исторического анализа, теоретического обобщения, систематизации и многоуровневого факторного анализа. В качестве основного результата работы предложен принцип «факторы-уровни-показатели-результат», объединяющий природно-агроэкологические, социально-экономические, пространственно-логистические и институциональные факторы. Данный принцип позволяет оценивать продовольственный пояс на уровнях области, сельскохозяйственной зоны, административного района и предприятия, делать интегральные выводы путем нормирования и взвешивания показателей. Предложенный подход может стать важной методологической основой, особенно для регионов Казахстана и Центральной Азии, где усилен процесс урбанизации, ограничены водные и земельные ресурсы, высоки логистические риски.
Цель исследования - методологическое обоснование системы географических предпосылок в исследовании продовольственного пояса и рассмотрение ее в связи с задачами пространственного планирования, размещения агропромышленного комплекса, обеспечения продовольственной безопасности.

Ключевые слова: фактор; продовольственный пояс; ресурс; детерминизм; энвайроментализм; центр-периферия.

Редакторлар: **Э.Е. Копишев, Н.Е. Рамазанова**

Авторларға арналған нұсқаулықтар,
жарияланым этикасы журнал сайтында енгізілген: http://bulchmed.enu.kz

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы.
Химия. География сериясы.
– 2 (155)/2026 – Астана: ЕҰУ. 200 б.
Шартты б.т. – 20.43. Таралымы – сұраныс бойынша.
Басуға қол қойылды: 30.06.2026
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