

ISSN (Print) 2616-6771

ISSN (Online) 2617-9962

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ BULLETIN

ВЕСТНИК

of L.N. Gumilyov
Eurasian National University

Евразийского национального
университета имени Л.Н. Гумилева

ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ сериясы

CHEMISTRY. GEOGRAPHY Series

Серия ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ

№ 4(153)/2025

1995 жылдан бастап шығады

Founded in 1995

Издается с 1995 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

Астана, 2025

Astana, 2025

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

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

Бас редактор (география): Рамазанова Н.Е.

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

Жауапты хатшы:

Уали А.С.

х.ғ.к., қауымдас. проф., 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

Алагуджаева М.А.

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

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
Добриса М.П.	Jovan Cvijić атындағы география институты, Сербия ғылым және өнер академиясы, Белград, Сербия
Егинбаева А.Е.	PhD, доцент м.а., 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
Песик А.М.	Jovan Cvijić атындағы география институты, Сербия ғылым және өнер академиясы, Белград, Сербия
Реджеп Э.	проф., Балікесір университеті, Балікесір, Түркия
Шультц Р.С.	проф., Айова штаты университеті, Айова, АҚШ
Саипов А.А.	п.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
Самарханов К.Б.	г.ғ.к., PhD, 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: Әділбектегі Гүлмира Әділбекқызы, 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 02.02.2021 ж. №

KZ81VPY00031939 тіркеу куәлігімен тіркелген

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

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

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

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

Executive Secretary:

Uali A.S.

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

**Editorial board
Chemistry**

Adekenov S.M.	Dr.Chem.Sci., Prof., Academician of NAS RK, International Research & Production Holding Phytochemistry, Karaganda, Kazakhstan
Aibuldinov E.K.	PhD, Research Institute of New Chemical Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
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

Alagudzhaeva M.A.	PhD, act.assoc.pfor., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
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.	Jovan Cvijic Institute of geography, Serbian Academy of Sciences and arts, Belgrade, Serbia

Eginbaeva A.E.	PhD, Act.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
Pesic A.M.	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
Samarkhanov K.B.	Cand.Geogr.Sci., PhD, 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: Adilbektegi Gulmira, 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 № KZ81VPY00031939 from 02.02.2021

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

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

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

Главный редактор
(география):

Рамазанова Н.Е.
PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан

Ответственный
секретарь:

Уали А.С.
к.х.н., ассоц.проф., 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
- Иргibaева 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

- Алагуджаева М.А.** PhD, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
- 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

Добриса М.П.	Институт географии Jovan Cvijic, сербская академия наук и искусств, Белград, Сербия
Егинбаева А.Е.	PhD, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Мукаев Ж.Т.	ассоц.проф., Семипалатинский государственный университет имени Шакарима, Семей, Казахстан
Мусабаетова М.Н.	д.г.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Озгелдинова Ж.О.	PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Песик А.М.	Институт географии Jovan Cvijic, сербская академия наук и искусств, Белград, Сербия
Реджеп Э.	проф., Университет Баликесир, Баликесир, Турция
Шультц Р.С.	проф., Университет штата Айова, Айова, США
Саипов А.А.	д.п.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Самарханов К.Б.	к.г.н., PhD, 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: Адильбектеги Гульмира Адильбеккызы, 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 № KZ81VPY00031939 от 02.02.2021 г.

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

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

© Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

МАЗМҰНЫ/ CONTENT/ СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ/ CHEMISTRY

А. Абдрахманова, Н. Омарова, А. Сабитова, Б. Кудерина

Li/CFx элементтерінің төмен температурадағы электрохимиялық қасиеттері: электролит құрамының рөлін зерттеу

А. Абдрахманова, Н. Омарова, А. Сабитова, Б. Кудерина

Электрохимическое поведение элементов Li/CFx при низков температуре: роль состава электролита

A. Abdrakhmanova, N. Omarova, A. Sabitova, B. Kuderina

Low-temperature electrochemical behaviour of Li/CFx cells: the role of electrolyte composition

11

И. Зиньковская

Нейтрондық активация талдауын қолдана отырып, Spirulina platensis және Nostoc linckia цианобактерияларының элементтік құрамын анықтау

И. Зиньковская

Определение элементного состава цианобактерий Spirulina platensis и Nostoc linckia методом нейтронно-активационного анализа

I. Zinikovskaia

Determination of elemental content of cyanobacteria Spirulina platensis and Nostoc linckia using neutron activation analysis

20

А. Көкораева, Г. Байсалова, Р. Сергибаев, А. Талтенов, Б. Торсықбаева, П. Құжатова, С. Сансызбай

Alhagi pseudalhagi-дің тамырын ультрадыбысты экстракциялау және оны математикалық модельдеу

А. Кокораева, Г. Байсалова, Р. Сергибаев, А. Талтенов, Б. Торсықбаева, П. Кужатова, С. Сансызбай

Ультразвуковая экстракция корней Alhagi pseudalhagi и ее математическое моделирование

A. Kokorayeva, G. Baisalova, R. Sergibayev, A. Taltenov, B. Torsykbaeva, P. Kuzhatova, S. Sansyzbay

Ultrasound-assisted extraction of Alhagi pseudalhagi root and its mathematical modeling

31

Н. Мақанова, А. Белгібаева, А. Муканова, А. Нурпейсова

Суперконденсаторларда қолдану үшін биомасса қалдықтарынан активтендірілген көмір алу

Н. Маканова, А. Белгибаева, А. Муканова, А. Нурпейсова

Получение активированного углерода из отходов биомассы для применения в суперконденсаторах

N. Makanova, A. Belgibayeva, A. Mukanova, A. Nurpeissova

Production of activated carbon from biomass waste for use in supercapacitors

41

- Т. Нурлыбаева, Г. Абилова, Ж. Махамбетова, З. Сұлтамұратова, Г. Жакупова**
Көпфункционалды полиэтилен: физика-химиялық қасиеттері және қазіргі қолдану салалары
- Т. Нурлыбаева, Г. Абилова, Ж. Махамбетова, З. Сұлтамұратова, Г. Жакупова**
Многофункциональный полиэтилен: физико-химические свойства и современные области применения
- T. Nurlibayeva, G. Abilova, Zh. Makhambetova, Z. Sultamuratova, G. Zhakupova**
Multifunctional polyethyleneimine: physicochemical properties and modern applications

56

ГЕОГРАФИЯ/ GEOGRAPHY

- Т. Брагина, Г. Кабдулова, Д. Чепашев, Г. Жусупова, А. Шингужинов, Р. Жилкибаев, Е. Максимкина**
Спутниктік мәліметтерді пайдалана отырып, Наурызым қорығы мен оған жақын аумақтардағы өрт динамикасын талдау
- Т. Брагина, Г. Кабдулова, Д. Чепашев, Г. Жусупова, А. Шингужинов, Р. Жилкибаев, А. Байтелиева**
Анализ динамики пожаров в Нaurzumском природном заповеднике и прилегающих территориях с использованием спутниковых данных
- T. Bragina, G. Kabdulova, D. Chepashev, G. Zhusupova, A. Shinguzhinov, R. Zhilkibaev, Y. Maximkina**
Analysis of fire dynamics in the Naurzum Nature Reserve and adjacent areas using satellite data
- М. Джетимов, Е. Токпанов, Р. Мухитдинова, А. Есенгабылова**
Алакөл көлдер жүйесінің шығыс және оңтүстік-шығыс бөліктерінің гидроминералдық рекреациялық ресурстарын геоэкологиялық тұрғыдан бағалау
- М. Джетимов, Е. Токпанов, Р. Мухитдинова, А. Есенгабылова**
Геоэкологическая оценка гидроминеральных рекреационных ресурсов восточной и юго-восточной части системы Алакольских озер
- M. Jetimov, Y. Tokpanov, R. Mukhitdinova, A. Yessengabylova**
Geoenviromental assessment of hydromineral recreational resources in the eastern and southeastern parts of the Alakol lakes system

74

91

- Н. Жеңісова, О. Тәукебаев, К. Темірбаева, А. Асылбекова**
Семей полигоны аумағындағы жер беті суларының кеңістіктік-уақыттық өзгерістерін Google Earth Engine платформасы негізінде талдау
- Н. Женисова, О. Таукебаев, К. Темирбаева, А. Асылбекова**
Анализ пространственно-временных изменений поверхностных вод в пределах Семипалатинского полигона на основе платформы Google Earth Engine
- N. Zhengissova, O. Taukebayev, K. Temirbayeva, A. Assylbekova**
Analysis of spatio-temporal changes of surface water within the Semipalatinsk test site based on the Google Earth Engine platform

106

- А. Лядова**
Ресейдің автокөлік мұрасын сақтау ерекшеліктері және оның қалаларды дамытуға қатысуы
- А. Лядова**
Особенности сохранения автотранспортного наследия России и его участие в развитии городов
- A. Lyadova**
Features of preservation of the Russian the motor transport heritage and its participation in urban development

122

- Н. Оспан, Ж. Қарағойшин**
Солтүстік Қазақстан облысының орманды дала ландшафттарындағы Betula тұқымдасының бейімделуі мен антропогендік әсеріне интегративті талдау

Н. Оспан, Ж. Карагойшин

Интегративный анализ адаптации рода Betula и антропогенного воздействия в лесостепных ландшафтах Северо-Казахстанской области

N. Ospan, Zh. Karagoishin

Integrative analysis of the adaptation of the genus Betula and anthropogenic impact in the forest-steppe landscapes of the North Kazakhstan region

Low-temperature electrochemical behavior of Li/CF_x cells: the role of electrolyte composition

Azhar Abdrakhmanova^{1*}, Nuriya Omarova¹, Alfira Sabitova¹, Balken Kuderina²

¹Shakarim University, Semey, Kazakhstan; zzzk2014@mail.ru,
a.sabitova@shakarim.kz, omarova_nm@enu.kz

²Sh. Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan;
b.kuderina@shokan.edu.kz

*Correspondence: zzzk2014@mail.ru

Abstract: Primary lithium/carbon monofluoride (Li/CF_x) batteries are widely recognized for their high theoretical energy density, long shelf life, and low self-discharge, making them ideal for aerospace, medical, and military applications. However, their performance at low temperatures is severely limited due to increased interfacial resistance and reduced lithium-ion transport. In this study, we investigate the effect of electrolyte composition on the ionic conductivity and discharge behavior of Li/CF_x cells under –20 °C conditions. A series of electrolyte systems was evaluated, including single-salt and dual-salt formulations based on LiDFOB, LiBF₄, LiPF₆, and LiClO₄ in various solvent mixtures (PC:DME, FEC:DME, and PC:DME:EA), with and without additives such as fluoroethylene carbonate (FEC) and lithium nitrate (LiNO₃). Electrochemical impedance spectroscopy revealed that only dual-salt systems and selected additive combinations maintained conductivity above 5 mS·cm^{–1}, at sub-zero temperatures. The best performance was achieved with 0.4 M LiDFOB + 0.6 M LiBF₄ in PC:DME, which exhibited the highest conductivity and a specific discharge capacity of ~220–230 mAh·g^{–1}. These results demonstrate the critical role of electrolyte optimization in enabling reliable low-temperature performance. Comparative analysis with literature data further confirms the effectiveness of the proposed formulations. This work provides practical guidance for designing advanced electrolytes for primary Li/CF_x batteries operating in cold environments.

Citation: Abdrakhmanova, A., Omarova, N., Sabitova, A., Kuderina, B. (2025). Low-Temperature Electrochemical Behavior of Li/CF_x Cells: The Role of Electrolyte Composition. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 153(4), 11-19
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-11-19>

Academic Editor:
E.Ye. Kopishev

Received: 18.06.2025
Revised: 16.12.2025
Accepted: 17.12.2025
Published: 24.12.2025



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

Keywords: Li/CF_x battery; electrolyte composition; ionic conductivity; discharge behavior; low temperature

1. Introduction

Lithium/carbon monofluoride (Li/CF_x) batteries represent one of the most energy-dense primary lithium systems, combining a lithium metal anode with fluorinated carbon cathodes. They offer unique advantages, including high theoretical energy density (>2100 Wh·kg^{–1}), stable discharge voltage, long shelf life, and low self-discharge rates, making them attractive for aerospace, defense, and medical life (Xu, 2004; Zhang, Qiao, Wu, & Li, 2023). Among solid-state cathodes, CF_x

remains unmatched in gravimetric energy density, but practical use is constrained by its intrinsic drawbacks (Liu, Zhang, Wang, & Wang, 2022; Hagiwara, Yokoyama, & Ito, 1980).

Despite these merits, the poor electrical conductivity of the cathode, insulating nature of the discharge LiF product, and sluggish electrode kinetics lead to high polarization and voltage delay, especially at low temperatures (Kim, Lee, & Park, 2021; Kulova & Skundin, 2020; Zhang, Foster, & Read, 2009). As a result, while Li/CF_x cells provide exceptional energy density at ambient conditions, sustaining comparable performance below –20 °C remains challenging (Wang, Zhao, Zhang, & Wu, 2019; Tan et al., 2023).

Electrolyte design plays a decisive role in addressing these issues. An ideal low-temperature electrolyte should satisfy several criteria:

1. maintain high ionic conductivity at –20 °C or below;
2. provide low lithium ion desolvation energy;
3. form stable and low-resistance solid electrolyte interphase (SEI) layers at both electrodes (Liu et al., 2022; Lin, Zhang, & Xu, 2021; Xue et al., 2022).

However, traditional carbonate-based electrolytes using LiPF₆ in EC/DMC or PC/DME solvents suffer from reduced conductivity and increased interfacial resistance at low temperatures (Zhang, Li, Yang, & Xu, 2022).

To overcome these issues, researchers have explored a variety of strategies, including the use of fluorinated solvents, dual-lithium salt systems, and electrolyte additives (Ge et al., 2023; Smith & Grey, 2015; Park, Lee, & Kim, 2021). Fluoroethylene carbonate (FEC), for instance, improves SEI stability on lithium metal surfaces and enhances low-temperature discharge performance (Zhang et al., 2023). Lithium nitrate (LiNO₃) and BF₃-based additives have also been shown to improve interfacial kinetics by reducing LiF accumulation and enhancing lithium ion transport pathways (Nagasubramanian & Di Stefano, 2007; Li et al., 2021; Zhang, Jiang et al., 2023).

Hagiwara et al. (1980) were among the first to report that solvent co-insertion into CF_x structures influences discharge plateaus. More recently, the addition of BF₃-based gaseous additives has enabled record power densities (up to 23.000 W·kg^{–1}) and energy densities exceeding 720 Wh·kg^{–1} in Li/CF_x systems (Lee et al., 2022; Li et al., 2021). Such performance enhancement is attributed to the dissolution of insulating LiF, which prevents cathode passivation and allows continuous lithium intercalation (Zhang, Jiang et al., 2023).

Furthermore, the use of dual-lithium salt systems such as LiDFOB + LiBF₄ or LiPF₆ + LiNO₃ has demonstrated synergistic effects in improving both ionic conductivity and interfacial stability (Xue et al., 2022; Yin et al., 2022; Chen, Wang, Jiang, & Li, 2023). These systems often maintain conductivity above 5 mS·cm^{–1} at –20 °C and ensure stable operation even at –40 °C (Zhang, Qiao et al., 2023).

Despite these advances, systematic evaluation of dual-salt systems in Li/CF_x cells under sub-zero conditions remains limited. In particular, the combined use of lithium difluoro(oxalato)borate (LiDFOB) and lithium tetrafluoroborate (LiBF₄) has not been comprehensively explored. In this study, we investigate the electrochemical performance of Li/CF_x cells with various electrolytes, focusing on ionic conductivity and discharge characteristics at –20 °C. The results are compared with literature-reported high-performance systems, offering insights into the rational design of electrolytes for low-temperature lithium primary cells.

2. Materials and methods

2.1. Electrode and Cell Preparation

Commercial carbon monofluoride (CF_x, $x \approx 1.0$ –1.15, MTI Corporation) was used as the active cathode material. The cathode slurry was prepared by mixing CF_x powder (85 wt%), conductive carbon (Super P, 10 wt%), and polyvinylidene fluoride (PVDF, 5 wt%) in N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) to form a homogeneous paste. The slurry was coated onto aluminum foil using the doctor blade method and dried under vacuum at 100 °C for 12 hours. The electrodes were hot-rolled to a thickness of ~100 μm and punched into 14 mm discs.

After drying, electrodes were hot-rolled to a thickness of 95–105 μm to ensure uniform porosity and punched into 14 mm discs. The mass loading of active material was 10–12 mg per electrode with a reproducibility deviation not exceeding ± 0.3 mg. Cell-to-cell variation during preparation did not exceed 3%.

Coin-type CR2032 test cells were assembled in an argon-filled glovebox (SPEKS GB02M, $\text{H}_2\text{O} < 0.1$ ppm, $\text{O}_2 < 1.0$ ppm). Lithium foil was used as the anode. A Celgard 2500 polypropylene membrane served as the separator. The mass loading of active material was approximately 10–12 mg per electrode.

2.2. Electrolyte Composition

A series of electrolytes was prepared to evaluate the effect of salt combinations and additives. Single-salt systems included 1 M LiPF_6 , LiClO_4 , or LiBF_4 dissolved in solvent mixtures of PC:DME or FEC: DME (3:7 v/v). Dual-salt systems were obtained by dissolving 0.4 M LiDFOB with 0.6 M LiBF_4 in PC:DME (3:7 v/v), or 0.4 M LiDFOB with 0.6 M LiPF_6 in PC:DME:EA (3:6:1 v/v). Additive-containing systems were prepared by incorporating 5 vol% fluoroethylene carbonate (FEC) and/or 3 vol% lithium nitrate (LiNO_3). All salts and solvents were battery grade ($\text{H}_2\text{O} < 20$ ppm, $\text{O}_2 < 10$ ppm). Electrolytes were mixed in an Ar-filled glovebox ($\text{H}_2\text{O} < 0.1$ ppm, $\text{O}_2 < 1.0$ ppm) and magnetically stirred until clear solutions were obtained. The selection of LiDFOB and LiTFSI-based systems follows numerous reports indicating their ability to form LiF-rich SEI layers with reduced desolvation energy, which is beneficial for low-temperature lithium-ion transport.

2.3. Electrochemical Characterization

CR2032 coin cells were assembled in the glovebox using lithium foil (15 mm diameter, 450 μm thick) as the anode, CF_x cathodes as described above, and Celgard 2500 polypropylene membranes as separators. The electrolyte volume per cell was 80–100 μL . Galvanostatic discharge tests were carried out using an MTI BST8-MA multi-channel battery analyzer in the voltage window of 1.5–4.5 V at controlled current densities (0.1–0.5 C, normalized to CF_x mass). Prior to testing at -20 $^\circ\text{C}$ or $+60$ $^\circ\text{C}$, cells were equilibrated in a Binder MK 56 climatic chamber for at least 4 h to ensure thermal stabilization. Ionic conductivity was measured via electrochemical impedance spectroscopy (EIS) using a Biologic SP-200 over the frequency range 1 MHz–100 mHz with a 10 mV AC amplitude. Ionic conductivity was evaluated using a resistance-based equivalent circuit (R_s), which was consistently applied for processing the impedance spectra. This circuit is standard for conductivity measurements and was therefore used in this work.

For each electrolyte composition, a separate batch of three to five CR2032 cells was assembled to ensure statistical reliability. Ionic conductivity, impedance spectra, and discharge profiles were measured individually for every cell, and the mean values were reported. The variation between cells did not exceed 3 %, confirming the reproducibility of the results.

3. Results

3.1 Ionic Conductivity of Electrolytes

The ionic conductivity of different electrolyte formulations was investigated using electrochemical impedance spectroscopy over the temperature range from -20 $^\circ\text{C}$ to $+60$ $^\circ\text{C}$. As illustrated in Figure 1, all electrolyte systems exhibit a monotonic increase in conductivity with temperature, consistent with thermally activated ion transport and enhanced ionic mobility at elevated temperatures. At $+60$ $^\circ\text{C}$, nearly all electrolytes surpassed $10\text{--}14$ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, demonstrating that the investigated solvents provide sufficient ionic dissociation under warm conditions. However, the situation was markedly different at -20 $^\circ\text{C}$, where a clear differentiation emerged between single- and dual-salt formulations.

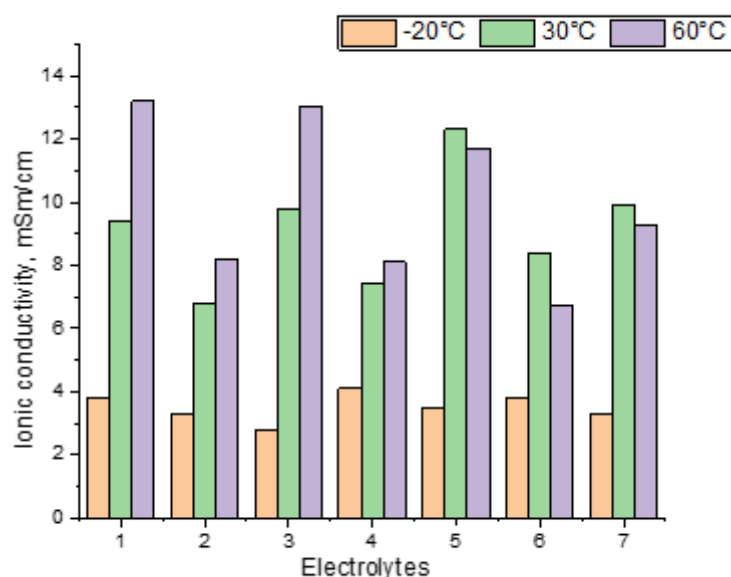


Figure 1. Ionic Transport Properties of Electrolytes under Varying Thermal Conditions: 1 – 1M LiDFOB in FEC:DME (3:7); 2 – 1M LiClO₄ in FEC:DME (3:7); 3 – 1M LiPF₆ in FEC:DME (3:7); 4 – 0.4 M LiDFOB + 0.6 M LiBF₄ in PC:DME (3:7); 5 – 1M LiDFOB in PC:DME (3:7); 6 – 1M LiDFOB in PC:DME (3:7) +3% FEC + 1% LiNO₃; 7 – 1M LiDFOB in PC:DME:EA (3:7:3) +3% LiNO₃ + 5% FEC

For example, 1 M LiPF₆ in FEC:DME displayed only ~2.8 mS·cm⁻¹ at -20 °C, reflecting the limited dissociation ability of LiPF₆ and the strong Li⁺ – solvent interactions in this medium. In comparison, 1 M LiDFOB in PC:DME achieved ~3.5 mS·cm⁻¹, which can be attributed to the favorable solvation structure of LiDFOB anions and the lower viscosity of PC/DME mixtures. The most remarkable performance was observed for the dual-salt system 0.4 M LiDFOB + 0.6 M LiBF₄ in PC:DME, which reached ~5 mS·cm⁻¹ at -20 °C. This fivefold enhancement relative to LiPF₆ highlights the synergistic effect of combining salts with complementary solvation properties: LiDFOB contributes to SEI stabilization and reduced desolvation energy, while LiBF₄ enhances salt dissociation and ionic mobility. Together, these effects enable sustained conductivity even in sub-zero environments.

FEC-containing solvents FEC: DME, electrolytes based on LiDFOB and dual-salt formulations maintained ionic conductivity above 5 mS·cm⁻¹ at -20 °C. This improvement arises from a dual mechanism: first, FEC contributes to reduced interfacial resistance by forming a thin, ion-conducting film on the lithium surface; second, the combination of boron-based salts increases the degree of dissociation while simultaneously lowering viscosity. Collectively, these factors ensure effective Li⁺ transport in environments where traditional carbonate-based systems exhibit a sharp decline in conductivity.

4. Discussion

The role of additives was also evident. Incorporating 3% LiNO₃ and 5% FEC (systems 6 and 7) maintained conductivity above 4 mS·cm⁻¹ at -20 °C, outperforming single-salt counterparts. However, the absolute values were slightly lower than those of the additive-free dual-salt system, indicating that while additives stabilize interfacial chemistry, they increase bulk electrolyte viscosity. Overall, the conductivity trends suggest that dual-salt electrolytes are far more tolerant to temperature reduction, aligning with previous reports. The ability to sustain ionic conductivity above 5 mS·cm⁻¹ at -20 °C is critical for achieving reliable discharge in Li/ CF_x cells under extreme climatic conditions.

4.1 Discharge Performance at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figure 2 presents the discharge characteristics of Li/CF_x cells at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, which clearly demonstrate the influence of electrolyte composition on low-temperature behavior. Electrolytes were divided into two groups: (a) those with additives (FEC and/or LiNO_3); (b) additive-free reference systems.

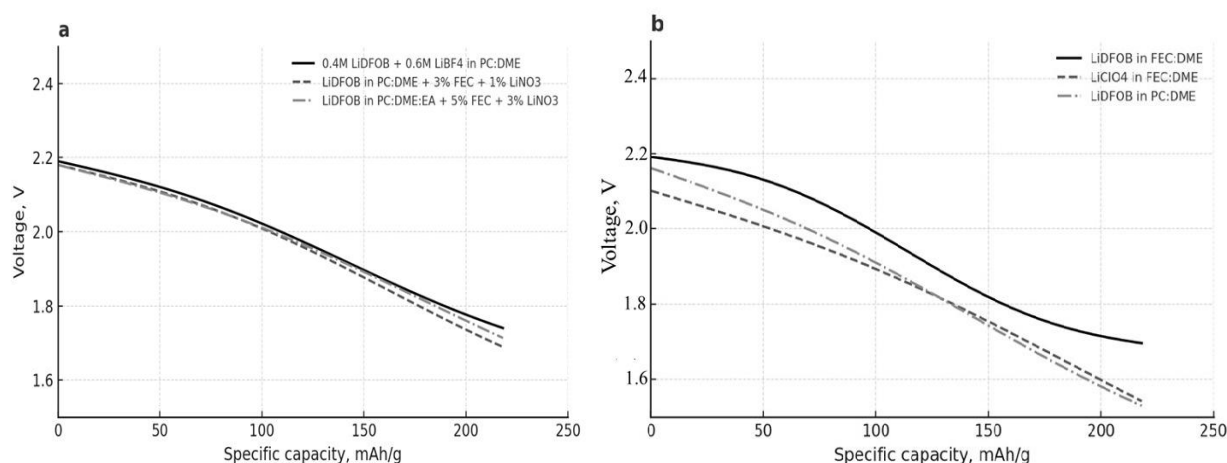


Figure 2. Discharge profiles of Li/CF_x cells at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a) Electrolytes with additives; (b) Additive-free electrolytes

The dual-salt electrolyte $0.4\text{ M LiDFOB} + 0.6\text{ M LiBF}_4$ in PC:DME (3:7 v/v) exhibited the most stable discharge curve. The voltage plateau extended from approximately 2.2 to 1.9 V with only minor polarization at the beginning of discharge, while the specific capacity reached 220–230 $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$. This demonstrates efficient ion transport and reduced interfacial resistance even under sub-zero conditions. Although the obtained capacity represents only a fraction of the theoretical value of CF_x , it is a significant result for operation at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ with moderate electrode loading. Similar improvements in low-temperature performance have been reported for borate-containing electrolytes, which promote the formation of LiF and borate rich SEI layers with low charge-transfer resistance (Zhang, Foster and Read, 2009; Li et al., 2024). Although the achieved capacity represents only a fraction of the theoretical CF_x value, it is considered a significant result for $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ operation with moderate electrode loading and is consistent with previously reported data for Li/CF_x systems at low temperatures (Shen et al., 2025).

In contrast, single-salt carbonate electrolytes exhibited a sharp voltage drop at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figure 2b), which can be attributed to increased charge-transfer resistance and limited Li^+ mobility. It is well established that carbonate solvents show increased viscosity and sluggish desolvation kinetics at low temperatures, leading to rapid SEI growth and strong polarization even at low discharge rates (Liang et al., 2023). The present results confirm this limitation for Li/CF_x cells.

Electrolytes containing additives such as FEC and LiNO_3 produced smoother and more stable voltage profiles compared to additive-free systems. These additives are known to enhance interfacial stability through the formation of LiF rich and inorganic passivation layers; however, their presence increases electrolyte viscosity and slightly reduces ionic conductivity, resulting in a modest decrease in discharge capacity at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ge et al., 2023). Dual-salt electrolytes, particularly those based on LiDFOB, provided a more favorable balance between interfacial stability and ionic transport. Their discharge curves showed reduced fluctuations and a more uniform slope, indicating enhanced compatibility at the electrode/electrolyte interface. At the same time, the overall capacity decreased slightly, which can be attributed to the formation of thicker passivation layers. These layers protect the lithium anode and cathode interface, but they also increase resistance and reduce the fraction of

active lithium ions participating in the reaction. Dual-salt systems, especially those containing LiDFOB, form a more uniform SEI enriched with LiF and borate species. These compounds lower interfacial impedance and maintain lithium-ion flux under sub-zero conditions.

In contrast, single-salt electrolytes such as LiPF_6 or LiClO_4 in FEC:DME displayed significant polarization and early capacity decay. The discharge voltage dropped below 2.0 V after only a small degree of utilization, and the final capacities were limited to around 170–180 $\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$. This behavior reflects the limited ability of single-salt carbonate systems to support stable lithium ion transport at low temperatures.

Overall, the discharge results highlight several key points. Dual-salt systems provide the most balanced performance, combining high ionic conductivity with reduced polarization. Additives improve the smoothness and stability of the discharge process, though at the expense of some capacity. Conventional single-salt carbonate electrolytes remain the least effective option for sub-zero operation. Together with the conductivity data, these findings demonstrate that optimized electrolyte chemistry is essential for ensuring reliable Li/ CF_x battery operation in low-temperature environments. Future research directions may include: systematic optimization of dual-salt ratios to further improve SEI uniformity and Li^+ mobility and in-situ characterization of SEI and CF_x cathode transformations at sub-zero temperatures to better understand interfacial mechanisms.

5. Conclusion

A comprehensive study of the electrochemical behavior of Li/ CF_x primary cells under low-temperature conditions ($-20\text{ }^\circ\text{C}$) was conducted using a range of electrolyte systems. Based on the experimental results, the following key conclusions:

1. Electrolyte composition plays a decisive role in determining the ionic conductivity and discharge performance of Li/ CF_x cells at sub-zero temperatures. Dual-salt systems significantly outperform single-salt electrolytes.

2. The dual-salt electrolyte consisting of 0.4 M LiDFOB + 0.6 M LiBF_4 in PC:DME (3:7 v/v) exhibited the best overall performance, with an ionic conductivity above $5\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ at $-20\text{ }^\circ\text{C}$, a stable voltage plateau in the range of 2.2–1.9 V, and a specific discharge capacity of $\sim 220\text{--}230\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$.

3. Electrolytes with FEC contributed to improved interfacial stability, enabling more stable discharge curves. However, their excessive concentrations increased interfacial resistance and slightly reduced discharge capacity.

4. Single-salt systems based on salts LiPF_6 and LiClO_4 in conventional solvents demonstrated limited low-temperature performance, characterized by higher polarization and lower specific capacity $\sim 180\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$.

The obtained results are consistent with recent literature and confirm that combining fluorinated salts, low-viscosity solvents, and selective additives is an effective strategy for enhancing the performance of primary Li/ CF_x batteries in extreme environments. These findings provide practical guidance for the rational design of advanced electrolytes for high-performance lithium primary systems operating under low-temperature conditions.

6. Supplementary Materials: No Supplementary Materials.

7. Author Contributions

Conceptualization - A.A.; methodology - A.A.; formal analysis - A.A., B.K.; investigation - N.O., A.S.; data curation - N.O.; writing-original draft, A.A.; writing - review & editing - A.A., N.O., A.S., B.K.; visualization - N.O.; supervision - A.S.; project administration - A.S.

8. Author Information

Abdrakhmanova, Azhar - PhD student, Chemistry and Ecology Department, Shakarim University, 20A Glinka St., Semey, Kazakhstan, 071412; zzzk2014@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1196-6081>

Sabitova, Alfira - PhD, Associate Professor, Head of Department of Chemistry and Ecology, Shakarim University, 20A Glinka St., Semey, Kazakhstan, 071412; alfa-1983@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3360-7998>

Omarova, Nuriya - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Chemistry and Ecology department, Shakarim University, 20A Glinka St., Semey, Kazakhstan, 071412; omarova_nm@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6074-7104>.

Kuderina, Balken – PhD, Senior Lecturer, Department of Morphology, Physiology, and General Pathology, Sh. Ualikhanov Kokshetau University, 76 Abai St., Kokshetau, Kazakhstan, 020000; b.kuderina@shokan.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-4602-8194>

9. Funding: This research received no external funding.

10. Acknowledgments: The authors express their gratitude to the staff of the energy storage prototyping laboratory for conducting the analyzes (Dubna, Moscow Region, Russia).

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

12. References

1. Chen, Z., Wang, H., Jiang, J., & Li, Q. (2023). SEI-modifying additives for enhanced low-temperature performance of Li/CF_x primary batteries. *Journal of Power Sources*, 554, 232185. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232185>
2. Dose, W. M., & Donne, S. W. (2014). Optimising heat treatment environment and atmosphere of electrolytic manganese dioxide for primary Li/MnO₂ batteries. *Journal of Power Sources*, 247, 852–857. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.142>
3. Ge, W., Mao, H., Ling, Y., Min, F., Chen, J., Liu, L., Zhang, Y., & Song, S. (2023). Insight into the adsorption mechanism between chitosan and kaolinite surface by density functional theory calculation. *Chemical Physics*, 575, 112069. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2023.112069>
4. Hagiwara, R., Yokoyama, C., & Ito, Y. (1980). Electrochemical reaction of graphite fluoride in nonaqueous lithium cell. *Electrochimica Acta*, 25(5), 579–585. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(80\)85072-2](https://doi.org/10.1016/0013-4686(80)85072-2)
5. Kim, J., Lee, J., & Park, Y. (2021). Performance improvement of primary Li/CF_x batteries by optimizing the composition of electrolyte additives. *Electrochimica Acta*, 380, 138202. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138202>
6. Kulova, T. L., & Skundin, A. M. (2020). A critical review of electrode materials and electrolytes for low-temperature lithium-ion batteries. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(9), 8638–8661. <https://doi.org/10.20964/2020.09.50>
7. Lee, D., Cho, M., Kim, J., & Lee, H. (2022). High-power Li/CF_x battery enabled by BF₃-based electrolyte additive. *Energy Storage Materials*, 45, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.03.024>
8. Li, Q., Xue, W., Sun, X., Yu, X., Li, H., & Chen, L. (2021). Gaseous electrolyte additive BF₃ for high-power Li/CF_x primary batteries. *Energy Storage Materials*, 38, 482–488. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.03.024>
9. Lin, Y., Zhang, R., & Xu, K. (2021). Electrolyte design for low-temperature lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 36, 339–355. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.01.015>
10. Liu, Y., Zhang, R., Wang, J., & Wang, Y. (2022). Design principles for low-temperature electrolytes in lithium batteries. *Energy Storage Materials*, 50, 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.06.003>
11. Liang, H.-J., Su, M.-Y., Zhao, X.-X., Gu, Z.-Y., Yang, J.-L., Guo, W., Liu, Z.-M., Zhang, J.-P., & Wu, X.-L. (2023). Weakly solvating electrolytes enable ultralow-temperature (–80°C) and high-power CF_x/Li primary batteries. *Science China Chemistry*, 66(7), 1982–1988. <https://doi.org/10.1007/s11426-023-1638-0>

12. Li, Z., Han, L., Kan, Y., Liao, C., & Hu, Y. (2024). Diphenylphosphoryl azide as a multifunctional flame-retardant electrolyte additive for lithium-ion batteries. *Batteries*, 10(4), 117. <https://doi.org/10.3390/batteries10040117>
13. Nagasubramanian, G., & Di Stefano, S. (2007). BF₃-based electrolyte additives to improve high rate capability of lithium batteries. *Journal of Power Sources*, 168(1), 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.037>
14. Park, J., Lee, H., & Kim, M. (2021). Synergistic effect of dual lithium salts on the interfacial stability and performance of primary Li/CF_x cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(4), 2025–2033. <https://doi.org/10.1039/D0TA09988F>
15. Shen, X., Shen, D., Zhu, J., & Duan, X. (2025). Erecting stable lithium metal batteries: A comprehensive review and future prospects. *Advanced Functional Materials*, 2504990. <https://doi.org/10.1002/adfm.202504990>
16. Smith, A. M., & Grey, C. P. (2015). Stabilization of lithium metal anodes using electrolyte additives. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(10), A2026–A2031. <https://doi.org/10.1149/2.0351510jes>
17. Tan, S., Shadike, Z., Cai, X., Lin, R., Kludze, A., Borodin, O., Lucht, B. L., Wang, C., Hu, E., Xu, K., & Yang, X.-Q. (2023). Review on low-temperature electrolytes for lithium-ion and lithium-metal batteries. *Electrochemical Energy Reviews*, 6, 35. <https://doi.org/10.1007/s41918-023-00199-1>
18. Wang, H., Xu, K., & Chen, X. (2019). SEI formation and ionic conductivity in low-temperature electrolytes for lithium batteries. *Electrochemistry Communications*, 108, 106567. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.106567>
19. Wang, L., Zhao, Z., Zhang, M., & Wu, J. (2019). Fluorinated nanographite as a cathode material for lithium primary batteries. *ChemElectroChem*, 6(15), 3816–3822. <https://doi.org/10.1002/celec.201900614>
20. Xu, K. (2004). Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries. *Chemical Reviews*, 104(10), 4303–4417. <https://doi.org/10.1021/cr030203g>
21. Xue, W., Qin, T., Li, Q., Zan, M., Yu, X., & Li, H. (2022). Exploiting the synergistic effects of multiple components with a uniform design method for developing low-temperature electrolytes. *Energy Storage Materials*, 50, 598–605. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.06.003>
22. Yin, Y., Holoubek, J., Liu, A., Sayahpour, B., Raghavendran, G., Cai, G., Han, B., Mayer, M., Schorr, N. B., Lambert, T. N., Harrison, K. L., Li, W., Chen, Z., & Meng, Y. S. (2022). Ultra-low temperature Li/CF_x batteries enabled by fast-transport and anion-pairing liquefied gas electrolytes. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.02409>
23. Zhang, Y., Li, C., Yang, Y., & Xu, K. (2022). Low-temperature performance of lithium primary batteries: Materials and electrolyte strategies. *Energy Storage Materials*, 50, 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.06.021>
24. Zeng, L., Qiu, L., & Cheng, H.-M. (2019). Towards the practical use of flexible lithium ion batteries. *Energy Storage Materials*, 23, 434–438. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.04.019>
25. Zhang, S., Foster, D., & Read, J. (2009). A low-temperature electrolyte for primary Li/CF_x batteries. *Journal of Power Sources*, 188(2), 532–537. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.12.030>
26. Zhang, X., Qiao, Y., Wu, C., & Li, H. (2023). Fluoroethylene carbonate as a multifunctional additive in lithium battery electrolytes. *Batteries*, 9(1), 78. <https://doi.org/10.3390/batteries9010078>
27. Zhang, Y., Jiang, J., Zhang, L., Tang, C., Tong, Z., Wang, X., Chen, Z., Li, M., & Zhuang, Q. (2023). BF₃-based electrolyte additives promote electrochemical reactions to boost the energy density of Li/CF_x primary batteries. *Electrochimica Acta*, 470, 143311. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143311>

Li/CF_x элементтерінің төмен температурадағы электрохимиялық қасиеттері: электролит құрамының ролін зерттеу

Ажар Абдрахманова, Нурия Омарова, Альфира Сабитова, Балкен Кудерина

Андатпа. Бастапқы литий-көміртекті фторид (Li/CF_x) элементтері жоғары теориялық энергия тығыздығы, ұзақ сақтау мерзімі және төмен өздігінен разрядталуының арқасында аэроғарыш, медицина және қорғаныс салаларында кеңінен қолданылады. Алайда төмен температурада олардың жұмыс істеу тиімділігі литий иондарының қозғалысының төмендеуі мен интерфейстік кедергінің артуына байланысты айтарлықтай нашарлайды. Бұл жұмыста –20 °C температурада Li/CF_x элементтерінің электролит құрамы иондық өткізгіштікке және разряд сипаттамаларына әсері зерттелді. Электролиттердің құрамында LiDFOB, LiBF₄, LiPF₆ және LiClO₄ тұздары әртүрлі еріткіштерде (PC:DME, FEC:DME және PC:DME:EA) қолданылды, кейбір құрамдар FEC және LiNO₃ қоспаларымен толықтырылды. Импеданстық спектроскопия әдісі бойынша тек екі тұздан тұратын жүйелер мен кейбір қоспалар ғана –20 °C-та 5 мСм/см-ден жоғары өткізгіштік көрсететіні анықталды. Ең жақсы нәтиже 0.4 М LiDFOB + 0.6 М LiBF₄ in PC:DME құрамында тіркелді, оның разрядтық меншікті сыйымдылығы ~220–230 мА·сағ/г болды. Бұл зерттеу нәтижелері ғылыми әдебиеттермен сәйкес келеді және төмен температурада жұмыс істейтін Li/CF_x негізіндегі батареялар үшін электролит құрамын оңтайландырудың маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: Li/CF_x элементтері; электролит құрамы; импеданстық спектроскопия; төмен температура; разрядтық сыйымдылық.

Электрохимическое поведение элементов Li/CF_x при низкой температуре: роль состава электролита

Ажар Абдрахманова, Нурия Омарова, Альфира Сабитова, Балкен Кудерина

Аннотация. Первичные литий-фторуглеродные (Li/CF_x) элементы широко известны благодаря высокой теоретической плотности энергии, длительному сроку хранения и низкому саморазряду, что делает их востребованными в аэрокосмической, медицинской и военной отраслях. Однако при пониженных температурах их работа значительно ухудшается из-за роста межфазного сопротивления и снижения подвижности ионов лития. В данной работе исследовано влияние состава электролита на ионную проводимость и разрядные характеристики элементов Li/CF_x при температуре –20 °C. Изучались односолевые и двухсолевые электролиты на основе солей LiDFOB, LiBF₄, LiPF₆ и LiClO₄ в различных растворителях (PC:DME, FEC:DME и PC:DME:EA), с добавками FEC и LiNO₃ и без них. Методом импедансной спектроскопии показано, что только двухсолевые системы и оптимальные добавки обеспечивают проводимость выше 5 мСм/см при отрицательных температурах. Наилучшие характеристики продемонстрировал электролит 0.4 М LiDFOB + 0.6 М LiBF₄ в PC:DME с удельной ёмкостью ~220–230 мА·ч/г. Полученные результаты согласуются с литературными данными и подчёркивают ключевую роль электролитной инженерии в разработке низкотемпературных первичных источников тока на основе Li/CF_x.

Ключевые слова: Li/CF_x элементы; состав электролита; импедансная спектроскопия; низкотемпературные характеристики; разрядная ёмкость.

Determination of elemental content of cyanobacteria *Spirulina platensis* and *Nostoc linckia* using neutron activation analysis

Inga Zinicovscaia^{1,2*}

¹Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie Str., 6, 141980, Dubna, Russia

²Horia Hulubei National Institute for R&D in Physics and Nuclear Engineering, 30 Reactorului Str. MG-6, Bucharest - Magurele, Romania

*Correspondence: zinikovskaia@mail.ru

Abstract. The cyanobacteria *Spirulina platensis* and *Nostoc linckia* are high-nutrition products with broad potential for use in the food and pharmaceutical industries, as well as in bioremediation. However, their high capacity for metal, including potentially toxic, bioaccumulation necessitates monitoring of their elemental composition. Multi-element neutron activation analysis, a powerful, non-destructive analytical chemistry technique, at the IBR-2 reactor of Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna, Russia, was used to study the elemental composition of two strains of *Spirulina platensis* and cyanobacterium *Nostoc linckia*. The content of 23 elements, including Mg, Al, Cl, Ca, Na, K, Sc, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, Br, As, Se, Rb, Sb, Ba, Cs, and U, was determined in each cyanobacterial strain. The level of toxic metals in the microbial biomass did not exceed the limits for daily intake set by the World Health Organization. Possible mechanisms of metal ions uptake by cyanobacterial biomass were discussed.

Citation: Zinicovscaia, I. (2025). Determination of elemental content of cyanobacteria *Spirulina platensis* and *Nostoc linckia* using neutron activation analysis. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 153(4), 20-30. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-20-30>

Keywords: neutron activation analysis; *Spirulina platensis*; *Nostoc linckia*; elemental content

Academic Editor:
E.Ye. Kopsishev

Received: 02.10.2025
Revised: 19.12.2025
Accepted: 19.12.2025
Published: 24.12.2025



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

1. Introduction

Promising new fields in medicine, pharmacology, and biotechnology are being intensively developed for disease treatment and prevention, along with environmental bioremediation (Assidi et al., 2022; Santos-Beneit, 2024). A significant biotechnological approach involves the application of cyanobacteria, a rich source of bioactive compounds for the production of vitamins, enzymes, and pharmaceuticals (Bouyahya et al., 2024; Vijayakumar & Menakha, 2015; Żymańczyk-Duda et al., 2022). The filamentous cyanobacterium *Spirulina platensis* is particularly notable, having gained international importance for its high-value phytonutrients and pigments (Bourais et al., 2022; Mary Leema et al., 2010). *Spirulina* is extensively used to produce biomass enriched with trace elements (Se, I, Cr, V, Fe, etc.), which is used to treat deficiencies of these elements and their related ailments (Cepoi et al., 2017; Mondal et al., 2024; Podgórska-Kryszczuk, 2024; Yang et al., 2024).

Members of cyanobacteria belonging to the family Nostocaceae are considered the most impressive “biochemical factories” of the biological world. The genus *Nostoc* is a valuable source of a wide spectrum of

secondary metabolites, such as fatty acids, that have many different potential uses as anticancer, anti-HIV, antimalarial, antifungal and/or antimicrobial drugs (Galhano et al., 2011; Shalaby et al., 2019; Thuan et al., 2019).

The rate of cyanobacteria biomass growth and its composition depend on many factors, the most important of which are the composition of nutrient medium, temperature and light. Recently, different types of cultivation medium have been developed to produce cyanobacteria biomass (Raoof et al., 2006). The application of cyanobacteria biomass in medicine and drug production requires careful control of its biochemical and chemical composition. The main part of the research in the field is devoted to the biochemical characterization of biomass (Cepoi et al., 2022; Raoof et al., 2006; Spínola et al., 2024). At the same time, several studies reported high content of elements with no biological functions in cyanobacteria biomass, which can have a negative impact on human health (Sochacka et al., 2025).

Therefore, in the present study, the elemental composition of two types of *Spirulina platensis* biomass, produced in Moldova and Russia, and *Nostoc linckia* biomass was determined using neutron activation analysis, a powerful analytical technique for multi-element surveys. It should be mentioned that the elemental composition of cyanobacteria *Nostoc linckia* was determined for the first time.

2. Materials and methods

Materials

In the present study, algological pure cultures of cyanobacteria *Spirulina platensis* CNM-CB-02 (*Spirulina* I) (Cepoi, Zinicovscaia, Rudi, et al., 2022) and *Nostoc linckia* CNM-CB-03 strain (Cepoi et al., 2022) from the National Collection of Nonpathogenic Microorganisms (Institute of Microbiology and Biotechnology, Technical University of Moldova) and *Spirulina platensis* (*Spirulina* II) from the Moscow State University Collection (Moscow, Russia) were used.

Biomass cultivation

The cultivation of *Spirulina* (I) was carried out in an open-type tank with a volume of 60 L in the SP-1 nutritive medium (Cepoi et al., 2020) at a temperature of 32-35 °C, illumination 37-55 $\mu\text{moles of photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, pH 8-9 and at constant mixing. The cultivation of *Spirulina* (II) was carried out in an open-type tank with a volume of 1500 L (surface area 15 m^2 , the depth of the nutrient medium 0.1 m) in the following nutritive medium (in $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): KNO_3 -3.0; NaHCO_3 -15.0; NaCl -1.0; K_2SO_4 -0.5; K_2HPO_4 -0.6; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ -0.5; H_3BO_3 -2.86; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ -1.81, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ -0.08 L; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ -0.22; MoO_3 -0.015 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; and FeEDTA – 1 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ at a temperature of 25-35 °C, pH 9-11 and at constant mixing. Illumination during a 24-hour period changed from 0 to 100,000 lx. Selected illumination mode simulated a 24-hour light cycle, changing from 0 to 100,000 lux, represents the natural progression from a night (0 lux) through twilight (around 1-100 lux) to bright daylight (100 00-100,000 lux).

The culture of *Nostoc linckia* (Roth) Born et Flah CNM-CB-03 was cultivated in laboratory conditions on mineral medium Gromov 6 (Cepoi, Zinicovscaia, Valuta, et al., 2022), stirring daily, at a temperature of 25-27 °C, pH 6.8-7.2 and continuous illumination (a light intensity of 37-55 $\mu\text{moles of photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). In the stationary growth phase (6th day for *S. platensis* and 14th day for *N. linckia*) the cyanobacteria biomass was separated from the culture medium by centrifugation, washed several times with bi-distilled water to remove media salts/impurities and dried. Next, the obtained biomass was used for elemental analysis.

Neutron activation analysis (NAA)

Neutron activation analysis was carried out at the pulsed fast reactor IBR-2 of the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, Dubna, Russia. The temperature in the irradiation channels of the reactor IBR-2 does not exceed 60–70 °C, which allows irradiation of biological samples. A total of 23 elements (Mg, Al, Cl, Ca, Na, K, Sc, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, Br, As, Se, Rb, Sb, Ba, Cs, and U) were determined using both short and long-time activation. To determine elements with short-lived isotopes: Mg, Al, Cl, Ca, and I, samples were irradiated for 3 min under a thermal neutron fluency rate of approximately $1.2 \cdot 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and measured for 15 min. In the case of long-lived

isotopes: Na, K, Sc, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, Br, As, Se, Rb, Sb, Ba, Cs, La, Ce, Hg, and U samples were irradiated for 4 days under a thermal neutron fluence rate of approximately $1.1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ and their activity was then measured in 4 and 20 days, respectively. γ -ray spectra were measured using a large-volume high-purity germanium detector with a resolution of 1.96 keV for the 1332.4-keV line of ^{60}Co .

The quality control of analytical measurements was provided by the National Institute of Standards and Technology (NIST, Gaithersburg, MD, USA) certified reference materials – SRM 1633b (constituent elements in coal fly ash), SRM 1572 (citrus leaves), SRM 1566b (Oyster tissue) (NIST 1566b). The difference between the certified and measured content of elements of the certified material varied between 1 and 10%. The NAA data processing and determination of element concentrations were performed using the software developed in FLNP JINR. More details about the irradiation of biological samples can be found in (Zinicovscaia et al., 2016, 2018).

Determination of the biochemical composition of Nostoc linkia

Protein content in the *Nostoc linckia* biomass was determined spectrophotometrically by the Lowry method. Carbohydrate amount was determined by a spectrophotometric method using an anthrone reagent. Quantitative determination of lipids was carried out spectrophotometrically using the phospho-vanillin reagent. Phycobiliprotein level was calculated on the basis of the formula of Siegelman and Kycia. Pigments in biomass were quantified spectrophotometrically. More details about the determination of the biochemical composition of biomass can be found in (Cepoi et al., 2021).

Statistical analysis

All experiments were replicated 3 times. Statistical analysis was performed with a one-way analysis of variance (ANOVA) by using Statistica 10. Data are shown as Mean value $\pm$ SD.

3. Results

In Table 1, the content of major and trace elements in *S. platensis* biomass are presented. Data obtained in the present work were compared with data present in Mosulishvili et al. (2004), Campanella et al. (1998), Ortega-Calvo et al. (1993), and Al-Dhabi and Arasu (2013) studies. In total, it was possible to determine 22 elements, including major (Na, K, and Mg), minor (Fe, Zn, Se, Cr, Ni, and I), and elements that have no biological function.

The strain *Nostoc linckia* (Roth.) BORN. et FLAH. CNM-CB-03 cultivated on the Gromov -6 medium is characterized by the following biochemical composition: proteins – 15-25 %, carbohydrate – 35-50 %, phycoerythrin – 2.0-4.0 %, phycocyanin – 0.5-1.0 %, allophycocyanin – 0.5 -1.0 %, lipids – 2 %, carotene – 0.2-0.4 %, and xanthophylls - 0.4-0.7 %.

Table 1. Content of elements in the *Spirulina platensis* biomass and literature data

	Concentration, mg·kg ⁻¹ dry weight							
Element	<i>S. platensis</i> (I)	<i>S. platensis</i> (II)	<i>S. platensis</i> Mosulishvili et al. (2004)	<i>S. platensis</i> Campanella et al. (1998)	Spirulina A Ortega-Calvo et al. (1993)	Spirulina B Ortega-Calvo et al. (1993)	Spirulina C Ortega-Calvo et al. (1993)	Spirulina (25 samples) Al-Dhabi and Arasu (2013)
Method*	NAA	NAA	NAA	INAA and ICP- AES	AAS	AAS	AAS	ICP–MS
Na	10600±420	4133±270	15485±2300	12300±400	13630	17680	1230	–
Mg	5380±270	3013±160	1640±320	120±50	3420	5030	4610	–
Al	130±6	47±5	94±11	–	–	–	–	–
Cl	6430±385	667±37	5690±570	630±30	–	–	–	–
K	18600±1670	7037±350	18025±1800	890±40	18970	16490	11340	–
Ca	21100±2300	4637±244	937±230	720±10	9600	15410	6870	–
Sc	0.01±0.002	n.d.	0.01±0.002	0.25±0.02	–	–	–	–
Cr	8.9±0.9	<1.9	6.2±0.9	9.0±0.3	3.3	7.1	5	–
Mn	117±5	34±2	48±5	54.5±0.4	117	64	36	0.08-2.2
Fe	4610±230	517±30	1360±120	1116±25	751	2016	945	–
Ni	4.4±0.4	1.1±0.2	4.7±1.3	–	5.4	5.8	6.1	0.2-4.7
Co	0.12±0.01	0.22±0.01	0.98±0.01	0.68±0.05	1.7	0.5	0.9	–
Zn	34±3	17±1.1	115±18	240±11	50	29	24	0.5-6.2
As	0.44±0.02	0.100±0.001	0.57±0.17	–	–	–	–	–
Se	0.12±0.03	<0.3	n.d	0.120±0.006	–	–	–	–
Br	1.9±0.2	1.2±0.1	0.7±0.1	19.2±0.4	–	–	–	–
Rb	0.32±0.07	0.8±0.1	0.41±0.06	–	–	–	–	–
Sb	0.060±0.003	0.010±0.001	0.10±0.01	0.14±0.02	–	–	–	–
I	4.1±0.7	0.21±0.01	0.4±0.1	–	–	–	–	–
Ba	25±1.3	n.d	n.d	–	–	–	–	–
Cs	0.009±0.002	0.023± 0.001	n.d	0.060±0.002	–	–	–	–
V	n.d	n.d	0.42±0.08	3.2±0.4	–	–	–	–
U	0.041±0.003	0.024±0.001	n.d	n.d	–	–	–	–

Table 2 shows the macromineral and trace elements content in the *Nostoc linkia* biomass. A total of 23 elements were determined in biomass by NAA. The obtained data were compared with data obtained for *Nostoc flagelliforme* (Gao, 1998) and allowed daily intake levels of metals recommended by the National Institutes of Health (Office of Dietary Supplements (ODS), 2025) and the World Health Organization (Trace Elements in Human Nutrition and Health, 1996).

Table 2. Content of elements in the *Nostoc linkia* biomass, mg·kg⁻¹

Element	<i>Nostoc linkia</i>	<i>Nostoc flagelliforme</i> (Gao, 1998)	Allowed daily intake
Na	5500±220	—	—
Mg	5360±260	2700	—
Al	140±7	—	2-14 mg·day ⁻¹
Cl	9310±745	—	—
K	63600±5090	—	3500 mg·day ⁻¹
Ca	9300±1210	1830	200-1300 mg·day ⁻¹
Cr	6.0±0.7	—	0.2-120 µg·day ⁻¹
Mn	131±7	23±6.5	2-5 mg·day ⁻¹
Fe	480±62	300	0.2-27 mg·day ⁻¹
Ni	15.2±1.5	10.6±2.3	<1 mg·day ⁻¹
Co	1.81±0.01	2.8±0.09	5-8 µg·day ⁻¹
Zn	30±2	12.8±4.2	2-12 mg·day ⁻¹
As	0.70±0.02	—	15-70 µg·day ⁻¹
Se	0.30±0.05	—	15-70 µg·day ⁻¹
Br	4.8±0.6	—	—
Rb	4.82±0.08	—	—
Sb	0.100±0.005	—	—
Ba	17.3±1.4	—	—
La	0.20±0.03	—	—
Ce	2.7±1.7	—	—
Sm	0.030±0.004	—	—
Cs	0.30±0.01	—	—
U	0.040±0.003	—	—

Discussion

All *S. platensis* samples showed a relatively high Na and K content; however, the Na/K ratio in all cases was below 1.5, approximately 0.6 for both types of spirulina samples. Potassium (K) is a cofactor for many enzymes and is involved in protein synthesis and osmotic regulation (Harris, 2012). The Na content in biomass depends mainly on the Na amount in salts added in the formulation of the cultivation medium. Magnesium (Mg) level in the studied samples was in the range of data reported in Ortega-Calvo et al. (1993), but higher than the data presented by Mosulishvili et al. (2004) and Campanella et al. (1998). Magnesium (Mg) occupies a strategic position in the photosynthetic apparatus as the centre of the chlorophyll molecule; therefore, all cyanobacterial species have an absolute requirement of this element. Apart from this, it has a role in the aggregation of ribosome into functional units, and the formation of catalase (Ahmed et al., 2023; Salman et al., 2023).

Trace elements: Fe, Zn, Se, Cr, Ni, and I, which play an important role in the metabolism and vital functions of living organisms. Iron is essential for the functioning of many biochemical processes, including electron transfer reactions, gene regulation, binding and transport of oxygen, and regulation of cell growth and differentiation (Beard, 2001; Lieu et al., 2001). The difference in Fe content was very pronounced in the studied spirulina samples: 4610 mg·kg⁻¹ for Spirulina I and 517

mg·kg⁻¹ for Spirulina II. Zinc (Zn), the second after iron most abundant microelement in all living organisms, is the co-factor of more than 300 enzymes, providing structural stability of a large number of proteins (Chasapis et al., 2020). Zinc content in Spirulina I sample (34 mg·kg⁻¹) was two times higher than in Spirulina II sample (17 mg·kg⁻¹). Obtained Zn levels were lower than data reported by Mosulishvili et al. (2004) and Campanella et al. (1998) and similar to data obtained by Ortega-Calvo et al. (1993). In the case of Cr, its amount in the Spirulina II sample was below the method's detection limit. In Spirulina I sample Cr content was similar to the data reported in Campanella et al. (1998) and higher than the values reported in other studies. Chromium is an essential nutrient that potentiates insulin action and thus influences carbohydrate, lipid and protein metabolism (Chromium - Health Professional Fact Sheet, 2025). Manganese (Mn) is both an activator and a constituent of several enzymes. Manganese level in Spirulina I and Spirulina II samples, 117 and 43 mg·kg⁻¹, respectively, was in the range of data presented in Ortega-Calvo et al. (1993) study. Iodine (I) level in spirulina samples was highly variable: 4 mg·kg⁻¹ for Spirulina I and 0.2 mg·kg⁻¹ for Spirulina II. It should be mentioned that I was determined only in spirulina samples, which were analyzed using NAA.

The ultra-trace element Ni is both essential and toxic for animals and humans. A Ni-poor nutrition of < 0.1 mg·kg⁻¹ dry matter led to Ni deficiency symptoms (Chasapis et al., 2012). The lowest Ni content (1.1 mg·kg⁻¹) was determined in the Spirulina II sample, while its amount in the Spirulina I sample (4.7 mg·kg⁻¹) was in the range of data presented in other works. While some of trace elements are important from the nutritional point of view, other ones (As, Rb, Sb, U) are considered toxins for cells. Trace amount of these elements appear in chemical reagents used to prepare nutrient medium. Rubidium (Rb) and U were determined only in spirulina samples analyzed by NAA. WHO data show that the concentration of toxic elements in the analyzed samples did not exceed allowed daily intake (Table. 2) (Trace Elements in Human Nutrition and Health, 1996)

Comparing two types of spirulina samples, it was observed that the content of all elements in Spirulina (II), except Rb and Co, were lower than in Spirulina (I). These differences can be explained by the particularity of biomass cultivation, the differences in the composition of the cultivation medium used for these two strains and light intensity. It is known that constant light intensity promotes biomass growth parameters, which results in higher pigments and proteins as well as minerals accumulation (Soni et al., 2017). Production of Spirulina biomass depends on many factors, the most important of which are nutrient availability, temperature and light. Kumar et al. (2011) reported that the highest biomass in Spirulina was obtained at 35°C and 2,000 lux light intensity. Spirulina I was cultivated under constant light intensity and temperature, while in the case of Spirulina II light intensity and temperature varied in a wide range. Low temperature and illumination lead to low cell productivities as a result the accumulation of metals from nutrient medium can be also reduced.

In case of *Nostoc linckia* the level of elements in the analyzed strain was higher than in *Nostoc flagelliforme* (Gao, 1998). The presence of toxic elements as As, Sb, La, Ce, Sm, etc in the biomass can be explained by their introduction in the cultivation medium with chemical reagents used to prepare it. Therefore, only high-purity reagents must be used to produce biomass for pharmaceutical and medical purposes. The content of toxic metals in the microbial biomass did not exceed the limits for daily intake set by the World Health Organization.

Essential metals are actively taken up by cyanobacteria through specialized uptake systems, but non-essential metals may also be taken up because they are mistaken for an essential metal (Ledin, 2000). Cyanobacteria can accumulate metals through biosorption or bioaccumulation (fig. 1). Metal ions biosorption mechanisms includes physical adsorption (weak forces), electrostatic attraction, ion exchange, complexation, chelation, and surface precipitation. The functional groups of carbohydrates, proteins and lipids include amino, carboxyl, thio ether, sulfhydryl, imidazole group of histidine, the oxygen, phosphate, phenolic, nitrogen of the peptide bond and amide moieties are responsible for the coordinating bond with the metallic ions (Rangabhashiyam & Balasubramanian, 2019).

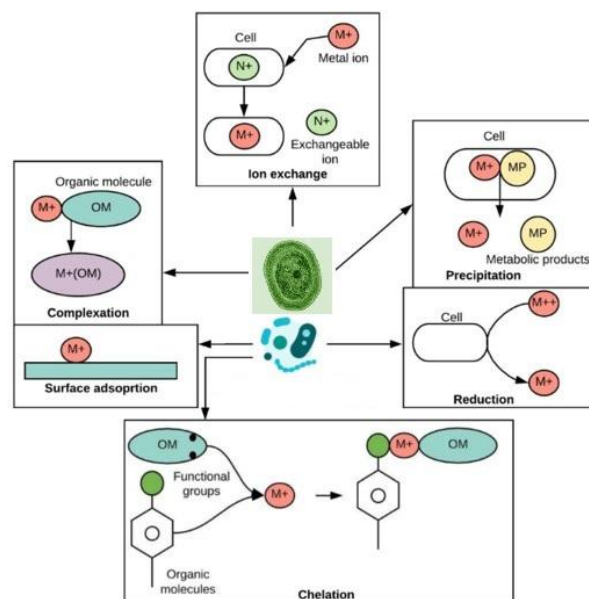


Figure 1. Main mechanism of metal ions uptake by cyanobacteria (Ramírez Calderón et al., 2020)

5. Conclusion

Neutron activation analysis is very efficient analytical technique for performing quantitative multi-elemental analysis of major, minor and traces components in biological samples. The concentrations of 23-24 elements were determined simultaneously in each cyanobacteria strain. The elemental composition of cyanobacteria *Nostoc linckia* was determined for the first time. The elemental content of the studied spirulina samples (Spirulina I and Spirulina II) was within the variability range of similar products reported in the literature. Calcium (Ca), Mg and Fe concentration in Spirulina I were higher in comparison with other samples. For Spirulina II concentrations of Al, Cl, Cr, Ni, and Zn were lower in comparison with other samples. Concentration of all determined elements in Spirulina II, except Rb and Co, was lower than in Spirulina I. The uptake of elements by biomass depends on experimental parameters and is controlled by the line of chemical mechanisms, including ion exchange, complexation, chelation, and surface precipitation. *Spirulina platensis* and *Nostoc linckia* can be successfully used for nutrition and pharmaceuticals production as safety source of trace elements. Both cyanobacteria strains present great interest for medicine and food technology. In future studies, it is necessary to assess the impact of varying experimental conditions on biomass growth as well as to assess the transfer of elements in the living organisms (animals, humans).

6. Supplementary Materials: No supplementary material.

7. Author Contributions

Conceptualization - I.Z.; methodology - I.Z.; data processing - I.Z.; validation - I.Z.; formal analysis - I.Z.; investigation - I.Z.; resources - I.Z.; data curation - I.Z.; writing - original draft preparation - I.Z.; writing - review and editing - I.Z.; visualization - I.Z.

8. Author Information

Zinikovskaia, Inga – head of the sector, Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie Str., 6, 141980, Dubna, Russia; zinikovskaia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0820-887X>

9. Funding: This research received no external funding.

10. Acknowledgements: The author is grateful to colleagues from the Institute of Microbiology and Biotechnology, Technical University of Moldova for providing cyanobacteria biomass and to

colleagues from the sector of neutron activation analysis and applied research FLNP JINR, for handling radioactive samples.

11. Conflicts of Interest: The author declares no conflicts of interest.

12. References

1. Ahmed, N., Zhang, B., Bozdar, B., Chachar, S., Rai, M., Li, J., Li, Y., Hayat, F., Chachar, Z. & Tu, P. (2023). The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1285512. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1285512>
2. Al-Dhabi, N. A. (2013). Heavy metal analysis in commercial Spirulina products for human consumption. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(4), 383. <https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2013.04.006>
3. Assidi, M., Buhmeida, A. & Budowle, B. (2022). Medicine and health of 21st Century: Not just a high biotech-driven solution. *NPJ Genomic Medicine*, 7(1), 67. <https://doi.org/10.1038/S41525-022-00336-7>
4. Beard, J. L. (2001). Iron Biology in Immune Function, Muscle Metabolism and Neuronal Functioning. *The Journal of Nutrition*, 131(2), 568S-580S. <https://doi.org/10.1093/JN/131.2.568S>
5. Bourais, I., Elmarrkechy, S., Machich, O., Nassif, A., Taha, D. & Bouyahya, A. (2022). Biological and pharmaceutical activities of polysaccharides. *Plant Polysaccharides as Pharmaceutical Excipients*, 575–607. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90780-4.00025-5>
6. Bouyahya, A., Bakrim, S., Chamkhi, I., Taha, D., El Omari, N., El Mneyiy, N., El Hachlafi, N., El-Shazly, M., Khalid, A., Abdalla, A. N., Goh, K. W., Ming, L. C., Goh, B. H. & Aanniz, T. (2024). Bioactive substances of cyanobacteria and microalgae: Sources, metabolism, and anticancer mechanism insights. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 170, 115989. <https://doi.org/10.1016/J.BIOPHA.2023.115989>
7. Campanella, L., Crescentini, G., Avino, P. & Moauro, A. (1998). Determination of macrominerals and trace elements in the alga *Spirulina platensis*. *Analysis*, 26(5), 210–214. <https://doi.org/10.1051/ANALUSIS:1998136>
8. Cepoi, L., Chiriac, T., Rudi, L., Djur, S., Zosim, L., Bulimaga, V., Batir, L., Elenciuc, D. & Rudic, V. (2017). Spirulina as a Raw Material for Products Containing Trace Elements. *Recent Advances in Trace Elements*, 403–420. <https://doi.org/10.1002/9781119133780.CH19>
9. Cepoi, L., Zinicovscaia, I., Rudi, L., Chiriac, T., Djur, S., Yushin, N. & Grozdov, D. (2022). Assessment of Metal Accumulation by *Arthrospira platensis* and Its Adaptation to Iterative Action of Nickel Mono-and Polymetallic Synthetic Effluents. *Microorganisms*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS10051041>
10. Cepoi, L., Zinicovscaia, I., Rudi, L., Chiriac, T., Miscu, V., Djur, S., Strelkova, L. & Grozdov, D. (2020). Spirulina platensis as renewable accumulator for heavy metals accumulation from multi-element synthetic effluents. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27(25), 31793–31811. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-09447-Z>
11. Cepoi, L., Zinicovscaia, I., Valuta, A., Codreanu, L., Rudi, L., Chiriac, T., Yushin, N., Grozdov, D. & Peshkova, A. (2021). Bioremediation Capacity of Edaphic Cyanobacteria *Nostoc linckia* for Chromium in Association with Other Heavy-Metals-Contaminated Soils. *Environments*, 9(1), 1. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS9010001>
12. Cepoi, L., Zinicovscaia, I., Valuta, A., Codreanu, L., Rudi, L., Chiriac, T., Yushin, N., Grozdov, D. & Peshkova, A. (2022). Peculiarities of the Edaphic Cyanobacterium *Nostoc linckia* Culture Response and Heavy Metal Accumulation from Copper-Containing Multimetal Systems. *Toxics*, 10(3), 113. <https://doi.org/10.3390/TOXICS10030113>

13. Chasapis, C. T., Ntoupa, P. S. A., Spiliopoulou, C. A. & Stefanidou, M. E. (2020). Recent aspects of the effects of zinc on human health. *Archives of Toxicology*, 94(5), 1443–1460. <https://doi.org/10.1007/S00204-020-02702-9>
14. Chasapis, C. T., Spiliopoulou, C. A., Loutsidou, A. C. & Stefanidou, M. E. (2012). Zinc and human health: an update. *Archives of Toxicology*, 86(4), 521–534. <https://doi.org/10.1007/S00204-011-0775-1>
15. *Chromium - Health Professional Fact Sheet*. (n.d.). Retrieved October 2, 2025, from <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Chromium-HealthProfessional/>
16. Galhano, V., Santos, H., Oliveira, M. M., Gomes-Laranjo, J. & Peixoto, F. (2011). Changes in fatty acid profile and antioxidant systems in a *Nostoc muscorum* strain exposed to the herbicide bentazon. *Process Biochemistry*, 46(11), 2152–2162. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2011.08.015>
17. Gao, K. (1998). Chinese studies on the edible blue-green alga, *Nostoc flagelliforme*: A review. *Journal of Applied Phycology*, 10(1), 37–49. <https://doi.org/10.1023/A:1008014424247>
18. Harris, E. D. (2012). Cofactors: Inorganic. *Encyclopedia of Human Nutrition*, 1–4, 357–365. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375083-9.00057-X>
19. Kumar, M., Kulshreshtha, J. & Singh, G. P. (2011). Growth and biopigment accumulation of cyanobacterium *Spirulina platensis* at different light intensities and temperature. *Brazilian Journal of Microbiology*, 42(3), 1128. <https://doi.org/10.1590/S1517-838220110003000034>
20. Ledin, M. (2000). Accumulation of metals by microorganisms — processes and importance for soil systems. *Earth-Science Reviews*, 51(1–4), 1–31. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00008-8)
21. Lieu, P. T., Heiskala, M., Peterson, P. A. & Yang, Y. (2001). The roles of iron in health and disease. *Molecular Aspects of Medicine*, 22(1–2), 1–87. [https://doi.org/10.1016/S0098-2997\(00\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0098-2997(00)00006-6)
22. Mary Leema, J. T., Kirubakaran, R., Vinithkumar, N. V., Dheenan, P. S. & Karthikayulu, S. (2010). High value pigment production from *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* cultured in seawater. *Bioresource Technology*, 101(23), 9221–9227. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.06.120>
23. Mondal, A., Dey, I., Mukherjee, A., Ismail, A., Satpati, G. G., Banerjee, S., Paul, S., Paul, S. & Pal, R. (2024). *Spirulina* biomass loaded with iron nanoparticles: A novel biofertilizer for the growth and enrichment of iron content in rice plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 61, 103387. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2024.103387>
24. Mosulishvili, L. M., Frontasyeva, M. V., Pavlov, S. S., Belokobylsky, A. I., Kirkesali, E. I. & Khizanishvili, A. I. (2004). Epithermal neutron activation analysis of *Spirulina platensis* biomass and extracted C-phycocyanin and DNA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 259(1), 41–45. <https://doi.org/10.1023/B:JRNC.0000015803.67211.0E/METRICS>
25. *Office of Dietary Supplements (ODS)*. (n.d.). Retrieved October 2, 2025, from <https://ods.od.nih.gov/>
26. Ortega-Calvo, J. J., Mazuelos, C., Hermosin, B. & Saiz-Jimenez, C. (1993). Chemical composition of *Spirulina* and eukaryotic algae food products marketed in Spain. *Journal of Applied Phycology*, 5(4), 425–435. <https://doi.org/10.1007/BF02182735>
27. Podgórska-Kryszczuk, I. (2024). *Spirulina* - An Invaluable Source of Macro- and Micronutrients with Broad Biological Activity and Application Potential. *Molecules*, 29(22), 5387. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES29225387>
28. Ramírez Calderón, O. A., Abdeldayem, O. M., Pugazhendhi, A. & Rene, E. R. (2020). Current Updates and Perspectives of Biosorption Technology: an Alternative for the Removal of Heavy Metals from Wastewater. *Current Pollution Reports*, 6(1), 8–27. <https://doi.org/10.1007/S40726-020-00135-7>

29. Rangabhashiyam, S. & Balasubramanian, P. (2019). Characteristics, performances, equilibrium and kinetic modeling aspects of heavy metal removal using algae. *Bioresource Technology Reports*, 5, 261–279. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2018.07.009>
30. Raoof, B., Kaushik, B. D. & Prasanna, R. (2006). Formulation of a low-cost medium for mass production of Spirulina. *Biomass and Bioenergy*, 30(6), 537–542. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2005.09.006>
31. Salman, J. M., Grmasha, R. A., Stenger-Kovács, C., Lengyel, E., Al-sareji, O. J., AL-Cheban, A. M. A. A. & Meiczinger, M. (2023). Influence of magnesium concentrations on the biomass and biochemical variations in the freshwater algae, *Chlorella vulgaris*. *Heliyon*, 9(1), e13072. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E13072>
32. Santos-Beneit, F. (2024). What is the role of microbial biotechnology and genetic engineering in medicine? *MicrobiologyOpen*, 13(2), e1406. <https://doi.org/10.1002/MBO3.1406>
33. Shalaby, E. A., Atta, M. B., Sleem, I. A., Mohamed, M. A., Lightfoot, D. A. & El-Shemy, H. A. (2019). Cytotoxicity, Antioxidant and Antiviral Potential of Aqueous Extract from *Nostoc muscorum* Cultivated in Various Inexpensive Media. *Waste and Biomass Valorization*, 10(5), 1419–1431. <https://doi.org/10.1007/S12649-017-0188-3>
34. Sochacka, M., Kózka, B., Kurek, E. & Giebułtowiec, J. (2025). Spirulina and Chlorella Dietary Supplements - Are They a Source Solely of Valuable Nutrients? *International Journal of Molecular Sciences* 26(21), 10468. <https://doi.org/10.3390/IJMS262110468>
35. Soni, R. A., Sudhakar, K. & Rana, R. S. (2017). Spirulina – From growth to nutritional product: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 157–171. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2017.09.010>
36. Spínola, M. P., Mendes, A. R. & Prates, J. A. M. (2024). Chemical Composition, Bioactivities, and Applications of Spirulina (*Limnospira platensis*) in Food, Feed, and Medicine. *Foods*, 13(22), 3656. <https://doi.org/10.3390/FOODS13223656>
37. Thuan, N. H., An, T. T., Shrestha, A., Canh, N. X., Sohng, J. K. & Dhakal, D. (2019). Recent Advances in Exploration and Biotechnological Production of Bioactive Compounds in Three Cyanobacterial Genera: *Nostoc*, *Lyngbya*, and *Microcystis*. *Frontiers in Chemistry*, 7, 604. <https://doi.org/10.3389/FCHEM.2019.00604>
38. *Trace elements in human nutrition and health*. (1996). 343.
39. Vijayakumar, S. & Menakha, M. (2015). Pharmaceutical applications of cyanobacteria - A review. *Journal of Acute Medicine*, 5(1), 15–23. <https://doi.org/10.1016/J.JACME.2015.02.004>
40. Yang, Y., Yang, H., Feng, X., Song, Q., Cui, J., Hou, Y., Fu, X. & Pei, Y. (2024). Selenium-Containing Protein from Selenium-Enriched *Spirulina platensis* Relieves Osteoporosis by Inhibiting Inflammatory Response, Osteoblast Inactivation, and Osteoclastogenesis. *Journal of Food Biochemistry*. <https://doi.org/10.1155/2024/3873909>
41. Zinicovscaia, I., Cepoi, L., Chiriac, T., Ana Culicov, O., Frontasyeva, M., Pavlov, S., Kirkesali, E., Akshintsev, A. & Rodlovskaya, E. (2016). *Spirulina platensis* as biosorbent of chromium and nickel from industrial effluents. *Desalination and Water Treatment*, 57(24), 11103–11110. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1042061>
42. Zinicovscaia, I., Cepoi, L., Chiriac, T., Yushin, N. & Vergel, K. (2018). Study of selected metals biosorption by *Arthrospira platensis* using neutron activation analysis. *Desalination and Water Treatment*, 108, 119–124. <https://doi.org/10.5004/DWT.2018.21940>
43. Żyłańczyk-Duda, E., Samson, S. O., Brzezińska-Rodak, M. & Klimek-Ochab, M. (2022). Versatile Applications of Cyanobacteria in Biotechnology. *Microorganisms*, 10(12), 2318. <https://doi.org/10.3390/MICROORGANISMS10122318>

Нейтрондық активация талдауын қолдана отырып, *Spirulina platensis* және *Nostoc linckia* цианобактерияларының элементтік құрамын анықтау

Инга Зиньковская

Аңдатпа. *Spirulina platensis* және *Nostoc linckia* цианобактериялары тамақ және фармацевтика өнеркәсібінде, сондай-ақ биоремедиацияда қолдануға кең әлеуеті бар жоғары қоректік заттар болып табылады. Дегенмен, олардың металға, соның ішінде улы биоаккумуляцияға жоғары қабілеті олардың элементтік құрамын бақылауды қажет етеді. Ресейдің Дубна қаласындағы Біріккен Ядролық зерттеулер институты, Франк нейтрондық физика зертханасының IBR-2 реакторындағы көп элементті нейтрондық активация талдауы *Spirulina platensis* және цианобактерия *Nostoc linckia* екі штаммының элементтік құрамын зерттеу үшін пайдаланылды. Әрбір цианобактерия штаммында Mg, Al, Cl, Ca, Na, K, Sc, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, Br, As, Se, Rb, Sb, Ba, Cs және U сияқты 23 элементтің құрамы анықталды. Микробтық биомассадағы улы металдардың мөлшері Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы белгілеген күнделікті тұтыну шегінен аспады.

Түйін сөздер: нейтронды активациялау талдауы; *Spirulina platensis*; *Nostoc linckia*; элементтік құрамы

Определение элементного состава цианобактерий *Spirulina platensis* и *Nostoc linckia* методом нейтронно-активационного анализа

Инга Зиньковская

Аннотация. Цианобактерии *Spirulina platensis* и *Nostoc linckia* являются высокопитательными продуктами с широким потенциалом использования в пищевой и фармацевтической промышленности, а также для задач биоремедиации. Однако их высокая способность к биоаккумуляции металлов обуславливает необходимость контроля элементного состава. Многоэлементный нейтронно-активационный анализ на реакторе ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований в Дубне (Россия) был использован для изучения элементного состава двух штаммов *Spirulina platensis* и цианобактерии *Nostoc linckia*. В каждом штамме цианобактерий было определено содержание 22-23 элементов, включая Mg, Al, Cl, Ca, Na, K, Sc, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, Br, As, Se, Rb, Sb, Ba, Cs и U. Содержание токсичных металлов в микробной биомассе не превышало предельно допустимых норм суточного потребления, установленных Всемирной организацией здравоохранения.

Ключевые слова: нейтронно-активационный анализ; *Spirulina platensis*; *Nostoc linckia*; элементный состав

Ultrasound-assisted extraction of *Alhagi pseudalhagi* root and its mathematical modeling

Aizhuz Kokorayeva¹, Galiya Baisalova^{1*}, Rassul Sergibayev¹, Abzal Taltenov¹, Bigamila Torsykbaeva², Pernegul Kuzhatova², Symbat Sansyzbay¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; aijuz.nu@mail.ru, sergibayev_ra@enu.kz, abzal06@mail.ru; sansyzbay.symbat@internet.ru

²Astana Medical University, Astana, Kazakhstan; maha-1505@mail.ru, perne-orazai@mail.ru

*Correspondence: galya_72@mail.ru

Abstract: Currently, research is being conducted to modify and improve extraction methods in several directions, including advancements in technical equipment, substitution of solvents, optimization of extraction conditions, and, in particular, the application of physical factors such as ultrasonic treatment. Among the innovative and promising approaches is the use of ultrasound to extract various biologically active compounds from natural materials.

This article presents the results of a scientific study on the ultrasound-assisted extraction of *Alhagi pseudalhagi* roots. The chemical composition of the extract was analyzed using gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS). A total of 30 chemical compounds were identified, including several valuable biologically active substances. According to the GC-MS analysis, the major components were gentriacontane (18.83%), β -sitosterol (18.13%), and lupeol (11.85%). The main factors influencing the diffusion of extractive substances from raw materials into the extractant - namely, ultrasonic power, sonication time, and temperature - have been investigated. These factors were used to design a full three-factor experimental plan. Consequently, a mathematical representation of the ultrasound-assisted extraction mechanism was established for further simulation and analysis. The resulting regression equation allows for the evaluation of the influence of these factors on extract yield.

Citation: Kokorayeva, A., Baisalova, G., Sergibayev, R., Taltenov, A., Torsykbaeva, B., Kuzhatova, P., Sansyzbay, S. (2025). Ultrasound-assisted extraction of *Alhagi pseudalhagi* root and its mathematical modeling. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 153(4), 31-40. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-31-40>

Academic Editor:
E.Ye. Kopishev

Received: 15.09.2025
Revised: 24.12.2025
Accepted: 24.12.2025
Published: 24.12.2025



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

Keywords: ultrasonic extraction; ultrasound power; sonication time; complete three-factor experiment; regression equation

1. Introduction

Plant materials are valuable natural raw materials used in everyday life as food products, nutrient additives, aromatic components, and pharmaceuticals etc. The use of plant materials has a long history, and over the centuries, mankind has developed a large number of processing methods (Azmir et al., 2013). In the production of biologically active substances (BAS), plant extracts are widely used. Plant extracts are

compounds or compound mixtures obtained from plants or their parts (leaves, flowers, seeds, roots). There are conventional methods for obtaining extracts from plant materials (maceration, percolation, and reflux extraction) (Orio et al., 2012), as well as non-conventional extraction methods (supercritical fluid extraction, pressurized liquid extraction, ultrasonic extraction, microwave-assisted extraction) (Mason et al., 2011; Li et al., 2017; Liu et al., 2018; Wen et al., 2018; Orio et al., 2012). Among modern methods of extracting components from plant materials, extraction using ultrasound takes a special place.

The ultrasound-assisted extraction method can significantly reduce the process duration and ensure a more complete extraction of substances (Vinatoru, 2001; Rostagno et al., 2003). When exposed to ultrasonic waves, the boundary diffusion layer is disturbed, and the penetration of the extractant into the material is improved. As a result, the raw material swells much faster, turbulent and vortex flows appear, which promote the transfer of masses and the dissolution of substances. The contents are intensively mixed even inside the cell (which cannot be achieved by other extraction methods). All this leads to a significant acceleration of the process of active substances transfer from raw materials to the extractant (Shah Buddin et al., 2018).

Ultrasonic extraction is an environmentally friendly and highly effective method for separating biologically active substances. This method is characterized by the use of very small amounts of organic solvents or their complete rejection, as well as an increase in the yield of target biologically active substances. Moreover, ultrasonic extraction can have a certain effect on the physicochemical properties of biologically active components. It has been established that ultrasonic treatment increases the yield of the most active substances of the plant, as polyphenols, which have a choleric, anti-inflammatory, anti-allergic, antimicrobial, and vasodilatory effect compared to the traditional method. However, with an increase in the ultrasound power, the decomposition of some catechins and gallic acids begins (Zhu et al., 2018; Shen et al., 2023). This is due to the fact that at high ultrasound power, free radicals are formed in large quantities, which destroy polyphenols.

Optimal conditions for increasing the yield of polyphenols were observed in the ultrasound frequency range below 40 kHz (Dzah et al., 2020). Some studies have shown that under optimal conditions, not only does the amount of polyphenols increase, but also their antioxidant activity (Mehmood et al., 2019; Kwaw et al., 2018).

The following studies examined the effect of ultrasound on polysaccharides, which are an important group of biologically active substances. It was found that after such exposure, the molecular weight of these carbohydrates decreases, but the yield and biological activity increase.

Therefore, it is extremely important to select optimal conditions for ultrasound extraction to ensure the bioavailability of biocomponents.

In the present work, the process of ultrasound-assisted extraction of the root of the *Alhagi pseudalhagi* (Bieb.) Desv. (*A. pseudalhagi*). The plant has been modeled mathematically for the first time. Notoriously, the substances contained in this plant, flavonoids and alkaloids, have a high biological activity and are used in both indigenous and official medicine (Srivastava et al., 2014).

2. Materials and methods

Ultrasound-assisted extraction was carried out on a Bandelin Sonoplus HD 2200 homogenizer (Germany). The weighed portions of raw materials in the experiments made 5.0 g, the ratio of raw materials: extractant (hexane) made 1:5.

The chemical composition of the obtained dry extract was analyzed using a gas chromatograph (Agilent 7890A) coupled with a mass-selective detector.

3. Results

3.1. Gas chromatography–mass spectrometric analysis of *A. pseudalhagi* roots

The chemical composition of the extract derived from *A. pseudalhagi* roots via ultrasonic extraction was analyzed by gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS) (Lytovchenko et al., 2009). Out of the 30 peaks detected in the chromatogram, 17 compounds were qualitatively and quantitatively identified using the Wiley spectral database. The extract is predominantly composed

of gentriacontane (18.83%), β -sitosterol (18.13%), and lupeol (11.85%). Gentriacontane is a saturated hydrocarbon (alkane) consisting of 31 carbon atoms. Gentriacontane is widely used in the cosmetic industry as a cream component, serving as both an emollient and a skin-protective agent. Additionally, it is employed in the production of organogels formulated with vegetable oils, functioning as a structure-forming agent and solid carrier. Experimental data confirm that gentriacontane forms a microcrystalline structure, creating a stable three-dimensional network in oil-based media, making it ideal for use as a filler and emollient.

β -Sitosterol is a phytosterol widely distributed in various plant sources (Figure 1). It exhibits a broad spectrum of pharmacological activities, including anti-inflammatory, hypocholesterolemic, neuroprotective, anticancer, and antibacterial effects (Awad et al., 2000).

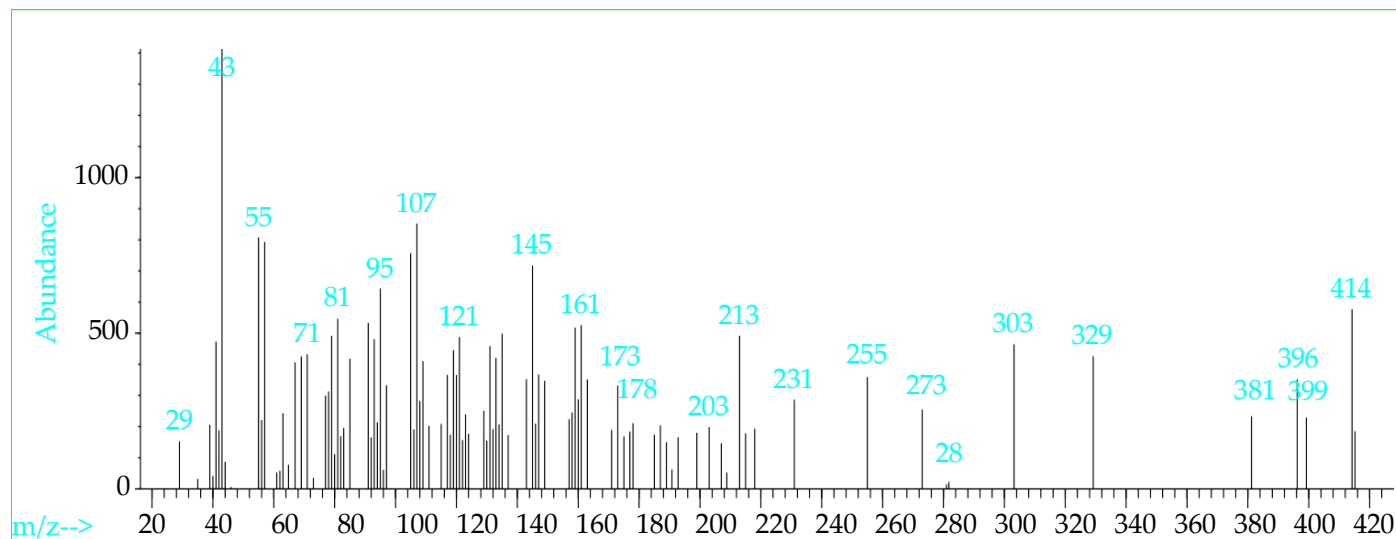


Figure 1. Mass spectrum of β -sitosterol

Lupeol is a pentacyclic triterpene, a natural organic compound with pronounced pharmacological activity (Figure 2). It is found in various medicinal plants, fruits, and resins. Lupeol exhibits anti-inflammatory activity (by inhibiting inflammatory mediators such as TNF- α , IL- β , and COX-2), as well as antimicrobial (effective against both Gram-positive and Gram-negative bacteria), antiprotazoal, antiproliferative, and anti-invasive effects (Liu et al., 2021).

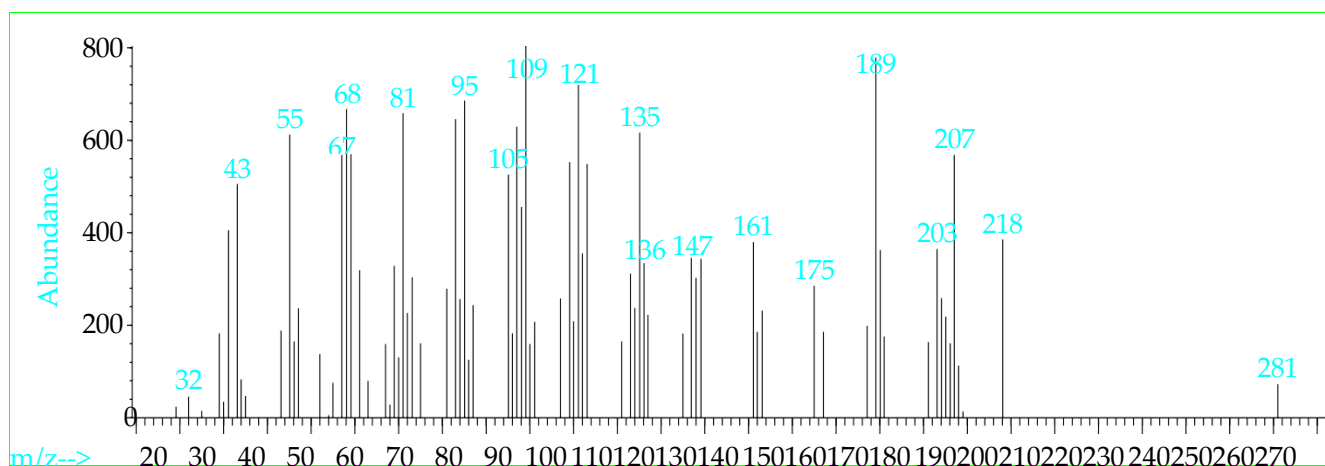


Figure 2. Mass spectrum of lupeol

The hexane extract contains fatty acids—a significant class of organic compounds with notable biological activity. Linolenic acid (5.79%) is an omega-3 fatty acid and an essential compound, as it is not synthesized by the human body (Sala-Vila et al., 2022). It supports cardiovascular, brain, and immune system health. Oleic acid (3.12%) lowers levels of "bad" cholesterol and improves the elasticity of cell membranes. Octadecanoic acid (0.83%) is used in the pharmaceutical industry as a base for ointments and suppositories.

Tetracosanoic acid (0.99%) is a component of the lipid membrane of cells. It is used in pharmaceuticals and cosmetics as an emollient, conditioning agent, and ointment base component.

3.2. Mathematical modeling of ultrasonic extraction of *A. pseudalhagi* roots

The effect of various factors (ultrasound power, sonication time, and temperature conditions) on the total extract yield obtained by ultrasonic extraction has been studied. The results are shown in Table 1.

Table 1. Effect of various factors on the extract yield of *A. pseudalhagi* roots

№	Ultrasound power, W	Sonication time, min.	Temperature conditions, °C	Extract yield, mg
1.	30	30	46	14.5
2.	60	30	47	13.4
3.	100	30	52	15.4
4.	30	10	40	12.7
5.	35	10	44	15.5
6.	40	20	42	14.5
7.	50	30	46	16.5
8.	60	20	47	17.2
9.	60	10	45	11.0
10.	70	20	46	18.5

To compile the regression equation of the extract, depending on the selected factors, methods of the experiment planning theory were used. Experiment planning is a procedure for choosing the number and conditions of experiments to solve the problem (creating a mathematical model of the object under study) (Anaya-Esparza et al., 2023).

In general, the mathematical description of the process can be presented as follows. Let the property (Y) of the object (in our case, the extract yield in mg) depends on several (n) independent variable factors ($x_1, x_2, \dots, x_n$). The nature of this dependence is denoted as

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

The ‘‘Y’’ value is called ‘‘response’’, and the dependence itself, $Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - ‘‘response function’’.

Independent variables $x_1, x_2, \dots, x_n$ - otherwise factors, must be quantified. Factors can be of different dimensions and differ sharply in quantity.

The mathematical model of the process is a regression equation that connects the response function with factors (Assunção et al., 2023).

In our experiment, the regression equation is considered as the following polynomial:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

Where b_0 is the free coefficient of the regression equation;

b_i – is the linear coefficient of the regression equation;

b_{ij} – matching coefficients or pairwise interaction effects.

Regression model coefficients are important in experiment design. Their absolute value indicates the degree of this factor's effect on the response function, and the sign before the coefficient indicates the direction of the factor's action. Coefficients are determined as partial derivatives of the response function with respect to the corresponding variables (factors):

$$b_i = \frac{\partial Y}{\partial x_i}, \quad b_{ij} = \frac{\partial^2 Y}{\partial x_i \partial x_j}, \quad b_{ii} = \frac{\partial^2 Y}{\partial x_i^2} \quad (3)$$

Mathematical formalization and coding of variables (factors) are given below in Tables 2 and 3.

Table 2. List of factors included in the experiment

№	Factor	Designations	Measurement unit	Variation range
1	Ultrasound power	x_1	W	30 ÷ 100
2	Sonication time	x_2	min.	10 ÷ 30
3	Temperature	x_3	°C	40 ÷ 52

The full factorial experiment starts with the coding operation. To begin with, the intervals of variation are selected (Table 3). Further, the coordinates of the plan center and the variation intervals are found, and then the encoding operation is performed.

Table 3. Factors coding

Factors	x_i	x_1	x_2	x_3
Upper level	x_i upper	100	30	52
Lower level	x_i lower	30	10	40
Basic level	$x_i 0$	65	20	46
Variation interval	Δx_i	35	10	6

A three-factor experiment was carried out, where each factor has two levels. The main advantage of a factorial experiment is that all factors in the experiment are varied simultaneously. This leads to the fact that the variance in the estimation of the regression coefficients is N times less than the experimental error.

The algorithm for calculating a full factorial experiment of type 2^n (in this case, $n = 3$) is as follows:

1. Building a planning matrix
2. Calculation of the regression equation coefficients
3. Calculation of experimental error (repeatability variance)
4. Checking the significance of the regression coefficients
5. Choice of the form of the mathematical model

6. Checking the adequacy of the regression equation

7. Making decisions

As a result of three-factor planning of Full Factorial Design (FFD) 2^3 type (number of experiments - 8, factors change at two levels: upper and lower), a mathematical model of the process, taking into account the interaction of factors with each other, is obtained in the following form:

$$y = 14.9 + 0.55x_1 - 0.5x_2 + 0.9x_3 + 1.5x_1x_3 - 0.55x_2x_3 \quad (4)$$

It should be emphasized that when performing a passive experiment, when replicates were not carried out, and an additional experiment in the planned centre was not set, obtaining the repeatability variance becomes practically impossible. In this case, the quality of approximation of the experimental data obtained by the approximate regression equation can be estimated by comparing the residual variance S_{res}^2 and the ratio of the mean S_y^2 by the Fisher criterion (Rashad et al., 2023), i.e.:

$$F_{cal} = \frac{S_y^2}{S_{res}^2} \quad (5)$$

where,

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (y_{j3} - y_3)^2 \quad (6)$$

$$y_3 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_{j3} \quad (7)$$

$$S_{res}^2 = \frac{1}{N-k-1} \sum_{j=1}^N (y_{j3} - y_j)^2 \quad (8)$$

$f_1 = N-1$ is the number of freedom degree in the ratio of the mean S_y^2 ,

$f_2 = N-h$ is the number of freedom degree of the residual variance, $h=k+1$

Estimation of the equation coefficients (4) was carried out by formulas (5) - (8). Equation (4) includes significant regression coefficients that ensure its adequacy. Verification of the adequacy of the obtained equation is carried out by the standard method of comparing the tabular and calculated values of the Fisher criterion.

From equation (4), it follows that the extract yield is most affected by such factors as ultrasound power and temperature conditions. Sonication time has the least effect, and the nature of this effect is negative, i.e., with an increase in the sonication time, the extract yield decreases.

4. Discussion

Currently, work on the mathematical modeling of ultrasonic extraction is being carried out. For example, in this work (Uvidia Armijo et al., 2025), mathematical modeling of the process of ultrasonic extraction of *Annona muricata* L. leaves was carried out using the Elovich model. For this purpose, ultrasonic extraction was carried out at three temperatures (30, 40, and 50 °C) and six different time intervals (2, 5, 10, 20, 30, and 40 minutes). The kinetics of this process is described by the Elovich equation, i.e., the kinetics of the process are mathematically modeled. The accuracy of this model is estimated by the Pearson correlation coefficient between the experimental results and the predicted model. The Elovich model fits the experimental data, and the Pearson correlation coefficients correspond to the range of 0,997 and 0,998. This indicates that the model correctly predicts the extraction kinetics in the case under study.

In the following study (Reche et al., 2021), mathematical modeling of ultrasonic extraction of biologically active components from artichoke is carried out. The modeling is based on a quantitative description of the effect of temperature and ultrasound power density on the yield of biologically active substances, taking into account the simultaneous effect of diffusion and convection during ultrasonic extraction. It was found that the effective diffusion coefficient increases with increasing temperature and the external mass transfer coefficient and the equilibrium yield of the extract depend on both the temperature and the ultrasound power.

In this paper (Abazi Bajrami et al., 2023), the kinetics of the extraction of biologically active compounds from the plant *Helichrysum arenarium* under the influence of ultrasound were investigated. Modeling of the extraction kinetics in two phases was carried out on the basis of mathematical interpretation of kinetically and diffusion-controlled processes.

This paper presents mathematical modeling of ultrasonic extraction of *Alhagi pseudalhagi* roots using the Full Factorial Design method. Mathematical modeling is based on a systematic, complex study of the influence of three factors (sound power, temperature, and time) on the yield of biologically active substances. This allows us to predict the results obtained with various combinations of factors, i.e., the yield of biocomponents, without prior experience.

5. Conclusion

The mathematical apparatus of a complete factorial experiment, i.e., when in the course of one experiment the values of all factors are varied simultaneously, allows for carrying out a computer experiment instead of costly full-scale ultrasonic extraction for production purposes (time, material costs, sometimes impossible) and to obtain a mathematical model of the process under consideration.

6. Supplementary Materials: No supplementary material.

7. Author Contributions

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

8. Author Information

Kokorayeva, Aizhuz – PhD-student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; aijuz.nu@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-1724-4569>

Baisalova, Galiya – Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; galya_72@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1338-0308>

Sergibayev, Rassul – Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; sergibayev_ra@enu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-7011-5052>

Torsykbaeva, Bigamila – Associate professor, Astana Medical University, 33 Saryarka Ave., Astana, Kazakhstan, maha-1505@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6999-3900>

Taltenov, Abzal – Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; abzal06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0620-3816>

Kuzhatova, Pernegul – Senior Lecturer, Astana Medical University, 33 Saryarka Ave., Astana, Kazakhstan, 010000; perne-orazai@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4378-0568>

Symbat Sansyzbay – Laboratory Assistant, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan st., 13, Astana, Kazakhstan, 010000; sansyzbay.symbat@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1338-0308>

9. Funding: This research received no external funding

10. Acknowledgements: You can acknowledge any support not included in the author's contributions or funding sections in this section. This may encompass administrative and technical assistance.

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

12. References

1. Abazi Bajrami, D., Marinkovski, M., Lisichkov, K., & Kuvendziev, S. (2023). Kinetic modeling of ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from *Helichrysum Arenarium*. *Biomed J Sci & Tech Res*, 50(4), 41935-41943. <https://dx.doi.org/10.26717/BJSTR.2023.50.007994>
2. Anaya-Esparza, L. M., Aurora-Vigo, E. F., Villagrán, Z., Rodríguez-Lafitte, E., Ruvalcaba-Gómez, J. M., Solano-Cornejo, M. Á., Zamora-Gasga, V. M., Montalvo-González, E., Gómez-Rodríguez, H., & Aceves-Aldrete, C. E. (2023). Design of experiments for optimizing ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from plant-based sources. *Molecules*, 28, 7752. <https://doi.org/10.3390/molecules28237752>
3. Assunção, J., Amaro, H. M., Malcata, F. X., & Guedes, A. C. (2023). Factorial optimization of Ultrasound-assisted extraction of Phycocyanin from *Synechocystis salina*: Towards a Biorefinery Approach. *Life*, 12, 1389. <https://doi.org/10.3390/life12091389>
4. Awad, A. B., & Fink, C. S. (2000). Phytosterols as anticancer dietary components: evidence and mechanism of action 1,2. *J. Nutr*, 130(9), 2127-2130. <https://doi.org/10.1093/jn/130.9.2127>
5. Azmir, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M. H. A., Ghafoor, K., Norulaini, N. A. N., & Omar, A. K. M. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *J Food Eng*, 117(4), 426-436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>
6. Dzah, C. S., Duan, Y., Zhang, H., Wen, C., Zhang, J., Chen, G., & Ma, H. (2020). The effects of ultrasound-assisted extraction on yield, antioxidant, anticancer and antimicrobial activity of polyphenol extracts: A review. *Food Biosci*, 35, 100547. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100547>
7. Kwaw, E., Ma, Y., Tchabo, W., Apaliya, M. T., Sackey, A. S., Wu, M., & Xiao, L. (2018). Impact of ultrasonication and pulsed light treatments on phenolics concentration and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice, *LWT*, 92, 61-66. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.016>
8. Li, Y., Li, S. J., Zhang, J. J., Zhao, C. N., & Li, H. B. (2017). Microwave-assisted extraction of natural antioxidants from the exotic *Gordonia axillaris* fruit optimization and identification of phenolic compounds. *Molecules*, 22, 1481. <https://doi.org/10.3390/molecules22091481>
9. Liu, K., Zhang, X., Xie, L., Deng, M., Chen, H., Song, J., Long, J., Li, X., & Luo, J. (2021). Lupeol and its derivatives as anticancer and anti-inflammatory agents: Molecular mechanisms and therapeutic efficacy. *J Pharmacol Res*, 164, 105373. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.105373>
10. Liu, Y., She, X. R., Huang, J. B., Liu, M. C., & Zhan, M. E. (2018). Ultrasonic-extraction of phenolic compounds from *Phyllanthus urinaria*: optimization model and antioxidant activity. *Food Sci Technol*, 38, 286–293. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.21617>
11. Lytovchenko, A., Beleggi, R., Schauer, N., Isaacson, T., Leuendorf, J. E., Rose, J., & Fernie, A. R. (2009). Application of GC-MS for detection of lipophilic compounds in diverse plant tissues. *Plant Methods*, 5(4). <https://doi.org/10.1186/1746-4811-5-4>
12. Mason, T. J., Chemat, F., & Vinatoru, M. (2011). The extraction of natural products using ultrasound or microwaves. *Curr Org Chem*, 15, 237-247. <http://dx.doi.org/10.2174/138527211793979871>

13. Mehmood, A., Ishaq, M., Zhao, L., Yaqoob, S., Safdar, B., Nadeem, M., Munir, M., & Wang, C. (2019). Impact of ultrasound and conventional extraction techniques on bioactive compounds and biological activities of blue butterfly pea flower (*Clitoria ternatea* L.), *Ultrason Sonochem*, 51, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.10.013>
14. Orio, L., Alexandru, L., Cravotto, G., Mantegna, S., & Barge, A. (2012). UAE, MAE, SFE-CO₂ and classical methods for the extraction of *Mitragyna speciosa* leaves. *Ultrason Sonochem*, 19, 591-595. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.10.001>
15. Rashad, S., El-Chaghaby, G., Lima, E., & Simoes, G. (2023). Optimizing the ultrasonic-assisted extraction of antioxidants from *Ulva lactuca* algal biomass using factorial design. *Biomass convers bior*, 13, 5681–5690. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01516-8>
16. Reche, C., Rosselló, C., Umaña, M. M., Eim, V., & Simal, S. (2021). Mathematical modelling of ultrasound-assisted extraction kinetics of bioactive compounds from artichoke by-products. *Foods*, 10, 931. <https://doi.org/10.3390/foods10050931>
17. Rostagno, M. A., Palma, M., & Barroso, C. G. (2003). Ultrasound-assisted extraction of soy isoflavones. *J Chromatogr*, 1012, 119–128. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(03\)01184-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(03)01184-1)
18. Sala-Vila, A., Fleming, J., Kris-Etherton, P., & Ros, E. (2022). Impact of α -linolenic acid, the vegetable ω -3 fatty acid, on cardiovascular disease and cognition. *Adv Nutr*, 13(5), 1584-1602. <https://doi.org/10.1093/advances/nmac016>
19. Shah Buddin, M. M. H., Amat Rithuan, M. Z., Aiman Surni, M. S., Mhd Jamal, N. H., & Faiznur, M. F. (2018). Ultrasonic-assisted extraction (UAE) of *Moringa oleifera* seed oil: Kinetic study. *ASM Sci J*, 11(3), 158-166. <http://dx.doi.org/10.32802/asmscj.2019.174>
20. Shen, L., Pang, S., Zhong, M., Sun, Y., Qayum, A., Liu, Y., Rashid, A., Xu, B., Liang, Q., Ma, H., & Ren, X. (2023). A comprehensive review of ultrasonic-assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies. *Ultrason. Sonochem*, 13, 1350-4177. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646>
21. Srivastava, B., Sharma, H., Dey, Y. N., Wanjari, M. M., & Jadhav, A. D. (2014). *Alhagi pseudalhagi*: a review of its phytochemistry, pharmacology, folklore claims and Ayurvedic studies. *Inter J Herbalmedicine*, 2(2), 47-51.
22. Vinatoru, M. (2001). An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs. *Ultrason Sonochem*, 8, 303-313. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(01\)00071-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(01)00071-2)
23. Uvidia Armijo, L. A., García Cabezas, E. F., Moyano Alulema, J. C., & Millán Ramos, D. H. (2025). Mathematical modeling of the extraction of bioactive compounds present in the leaves of *Annona muricata* L. *Afr J Biomed Res*, 28, 598-603 <https://doi.org/10.53555/AJBR.v28i1S.6173>
24. Wen, C. T., Zhang, J. X., Zhang, H. H., Dzah, C. S., Zandile, M., Duan, Y. Q., Ma, H. L., & Luo, X. P. (2018). Advances in ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from cash crops - A review. *Ultrason Sonochem*, 48, 538–549. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.018>
25. Zhu, Y., Sun, J., Xu, D., Wang, S., Yuan, Y., & Cao, Y. (2018). Investigation of (+)-catechin stability under ultrasonic treatment and its degradation kinetic modeling. *J. Food Process Eng*, 41, 12904. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12904>

***Alhagi pseudalhagi*-дің тамырын ультрадыбысты экстракциялау және оны математикалық модельдеу**

Айжүз Көкораева, Ғалия Байсалова, Расул Сергибаев, Абзал Талтенов, Бикамила Торсықбаева, Пернегүл Құжатова, Сымбат Сансызбай

Аңдатпа. Қазіргі уақытта экстракция әдістерін өзгертуге және жетілдіруге бағытталған зерттеулер белсенді жүргізілуде. Бұл бағыттар кең ауқымды міндеттерді қамтиды -

техникалық жабдықты оңтайландыру мен экстрагенттерді таңдаудан бастап, үдерісті жүргізу шарттарын нақтылауға дейінгі аралықты қамтиды. Әсер етудің физикалық факторларын, атап айтқанда, ультрадыбысты қолдануға ерекше назар аударылады. Ультрадыбыстық экстракция табиғи шикізаттан биологиялық белсенді заттарды алудың болашағы зор әдістерінің бірі ретінде қарастырылады.

Бұл мақалада *Alhagi pseudalhagi* өсімдігінің тамырларын ультрадыбыстық әдіспен экстракциялау бойынша жүргізілген ғылыми зерттеудің нәтижелері ұсынылған. 30 химиялық қосылыс анықталды, олардың арасында бағалы биологиялық белсенді заттардың бар екені анықталды. GC-MS талдауының нәтижелері бойынша компоненттердің ең үлкен үлесі гентриаконтан (18,83%), β -ситостерол (18,13%) және лупеолға (11,85%) тиеселі болды.

Өсімдік шикізатынан экстрагентке диффузияланатына экстрактивті заттардың шығымына әсер ететін негізгі факторлар анықталды: ультрадыбыстың қуаты, ультрадыбыстық өңдеу ұзақтығы және температуралық режим. Осы факторлардың негізінде толық үш факторлы эксперимент жүргізілді. Нәтижесінде ультрадыбыстық экстракция процесінің математикалық моделі жасалды. Алынған регрессия теңдеуі экстракт шығымына көрсетілген факторлардың әсерін сандық бағалауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: ультрадыбысты экстракция; ультрадыбыс қуаты; ультрадыбыстық өңдеу ұзақтығы; толық үш факторлы эксперимент; регрессия теңдеуі

Ультразвуковая экстракция корней *Alhagi pseudalhagi* и ее математическое моделирование

Айжуз Кокораева, Галия Байсалова, Расул Сергибаев, Абзал Талтенов, Бикамила Торсыкбаева, Пернегул Кужатова, Сымбат Сансызбай

Аннотация: В настоящее время активно проводятся исследования, направленные на модификацию и совершенствование методов экстракции. Эти направления охватывают широкий спектр задач - от оптимизации технического оснащения и выбора экстрагентов до уточнения условий проведения процесса. Особое внимание уделяется применению физических факторов воздействия, в частности, ультразвука. Ультразвуковая экстракция рассматривается как один из перспективных методов извлечения биологически активных веществ из природного сырья.

В данной статье представлены результаты научного исследования, посвящённого ультразвуковой экстракции корней *Alhagi pseudalhagi*. Химический состав экстракта, полученного методом ультразвуковой экстракции, изучен с использованием газ-хроматографии-масс-спектрометрии. Выявлено 30 химических соединений, среди которых установлено наличие ценных биологически активных веществ. По результатам ГХ-МС анализа наибольшую долю среди компонентов составили гентриаконтан (18,83%), β -ситостерол (18,13%) и лупеол (11,85%).

Определены основные факторы, влияющие на диффузию экстрактивных веществ из растительного сырья в экстрагент: мощность ультразвука, продолжительность ультразвуковой обработки и температурный режим. На основе этих факторов проведён полный трёхфакторный эксперимент. В результате разработана математическая модель процесса ультразвуковой экстракции. Полученное уравнение регрессии позволяет количественно оценить влияние указанных факторов на выход экстракта.

Ключевые слова: ультразвуковая экстракция; мощность ультразвука; время обработки ультразвуком; полный трехфакторный эксперимент; уравнение регрессии

Получение активированного углерода из отходов биомассы для применения в суперконденсаторах

Назым Маканова^{1,2}, Аяулым Белгибаева^{2,3}, Алия Муканова^{2,3}, Арайлым Нурпейсова^{2,3*}

¹Назарбаев Университет, Астана, Казахстан;

nazym.makanova@nu.edu.kz,

²National Laboratory Astana, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан; ayaulym.belgibayeva@nu.edu.kz,

aliya.mukanova@nu.edu.kz, arailym.nurpeissova@nu.edu.kz

³Институт аккумуляторов, Астана, Казахстан;

ayaulym.belgibayeva@nu.edu.kz, aliya.mukanova@nu.edu.kz,

arailym.nurpeissova@nu.edu.kz

*Корреспонденция: arailym.nurpeissova@nu.edu.kz

Цитирование: Маканова, Н., Белгибаева, А., Муканова, А., Нурпейсова, А. (2025). Получение активированного углерода из отходов биомассы для применения в суперконденсаторах. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География, 153(4), 41-55. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-41-55>

Академический редактор:
Э.Е. Копишев

Поступила: 26.09.2025
Исправлена: 08.12.2025
Принята: 09.12.2025
Опубликована: 24.12.2025



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

Аннотация: Высокий спрос на материалы для сохранения энергии и потребность в устойчивом и экологичном развитии увеличивает внимание ученых к использованию возобновляемых ресурсов и утилизации биоотходов. В этой работе мы использовали косточки фиников как доступный и ежегодно возобновляемый побочный отход пищевой промышленности. Финиковые косточки могут быть использованы как материал для углеродных электродов в суперконденсаторах. Свободностоящие электроды из такого углеродсодержащего материала после специальной обработки показали увеличение циклической стабильности и кулоновской эффективности. Процесс активации при соотношении КОН и биоугля 1:3 позволил получить для двухэлектродной симметричной системы при плотности тока 0,2 А/г, удельную ёмкость 204 Ф/г, плотность энергии 28,3 Втч/кг и удельную мощность равную 205 Вт/кг, что подчеркивает эффективность использования нового углеродсодержащего материала в повышении структурной целостности электродов и улучшении электрохимических свойств системы в целом. Анализ поверхности методом ВЕТ показал увеличение площади поверхности биоугля до 2423,4 м²/г. В этом исследовании внедрение свободностоящих электродов привело к увеличению кулоновской эффективности до 99,97%, что, в свою очередь, позволяет получить высокую производительность суперконденсаторов.

Ключевые слова: суперконденсаторы, углеродный материал, активированный углерод, химическая активация.

1. Введение

Суперконденсаторы привлекли большое внимание ученых благодаря высокой плотности мощности, высокому значению КПД (больше 98%) и принципу работы – электростатическому накоплению заряда на границе электрод-электролит (Huang et al.,

2019; Poopam et al., 2019). За счет такого физического явления заряд и разряд происходит за короткое время, что, в свою очередь, позволяет получать большое количество энергии.

Значительную емкость и удельную мощность совместно определяют структура и удельная площадь поверхности (УПП) используемых электродов. В большинстве случаев используется активированный уголь (АУ), который имеет удельную поверхность больше 1500 м²/г (Béguin et al., 2014; Chen et al., 2017; Zhai et al., 2022). В качестве сырья для АУ могут быть использованы отходы биомассы, такие, как: косточки вишен (Zhang et al., 2020), скорлупа грецкого ореха (Elanthamilan et al., 2021), банановая кожура (Feng and Yang, 2024), рисовая шелуха (Menya et al., 2018), скорлупа кокоса (Hu and Srinivasan, 1999; Sujiono et al., 2022) и другие (Lee et al., 2015; Li et al., 2023). Например, в работе (Li et al., 2023) АУ с удельной площадью 3565 м²/г получен из ели методом химической активации хвои.

Для использования в суперконденсаторах, кроме УПП, немаловажные значения имеют размеры и структура пор. В работе (Supriyeva et al., 2023) установлено, что ультрамикропоры (диаметр < 1 нм) отвечают за емкостные характеристики конденсатора, в то время как мезо- и микропоры ускоряют диффузию и адсорбцию ионов на поверхности углеродного материала (УМ). Создание иерархической пористой структуры, сочетающей высокую удельную поверхность и поры различных размеров, положительно влияет на характеристики суперконденсаторов с двойным электрическим слоем. Оптимизация данных параметров может быть произведена варьированием условий химической или физической активации УМ, (Goskula et al., 2023; Heidarinejad et al., 2020; Said et al., 2023). В химической активации используют кислоты (HNO₃, H₃PO₄) (Sujiono et al., 2022; Yang et al., 2020) и щелочи (NaOH, KOH) (Suresh Kumar Reddy et al., 2015; Wang and Kaskel, 2012). Например, в работе (Yang et al., 2020) использована фосфорная кислота для активации древесины тополя при температуре 450 °C, в результате получен УМ с УПП более 2000 м²/г.

Использование щелочей в процессе активации сопровождается рядом технологических трудностей: продукты взаимодействия гидроксидов глубоко проникают в пористую структуру биоугля и требуют длительного промывания для полного удаления, а концентрированные щелочные растворы агрессивно воздействуют на металлические и стеклянные элементы лабораторного оборудования, что усложняет эксплуатацию установки (Suresh Kumar Reddy et al., 2015). Тем не менее именно щелочи участвуют в процессах получения углей с максимальной УПП. Поэтому в нашей работе предложено использование гидроксида калия в качестве активатора, при варьировании его соотношения с сырьем и оптимизацией размера пор. Температура активации выбрана 800 °C, поскольку предыдущие работы (Heidarinejad et al., 2020; Sujiono et al., 2022; Yang et al., 2020) показали ее эффективность для активации биосырья. Дополнительно проведена преактивация при температуре 300 °C для улучшения состава сырья (Heidarinejad et al., 2020; Said et al., 2023; Suresh Kumar Reddy et al., 2015; Zhang et al., 2020; Issatayev et al., 2024). Во время преактивации легколетучие вещества в составе сырья, такие, как смолы, масла и остатки гемицеллюлозы, удаляются и остается так называемая «богатая» часть сырья, которая готова для дальнейшей активации. Кроме того, преактивация формирует «углеродный каркас», который является основой для дальнейшего варьирования текстуры поверхности. Полученный материал использован для изготовления свободностоящих электродов, которые снизили сопротивление между контактами, что увеличило КПД собранных симметричных ячеек.

Целью настоящего исследования является разработка высокоэффективного активированного УМ из пищевых отходов (финиковых косточек) с контролируемой пористой структурой и функциональными группами на поверхности, а также оценка его электрохимических характеристик в суперконденсаторах с двойным электрическим слоем. Работа направлена на изучение влияния модификации и структуры пор на удельную ёмкость, плотность энергии и стабильность при циклировании.

2. Материалы и методы

Получение АУ проводилось методом химической активации. В качестве активатора использован гидроксид калия (Sigma-Aldrich, безводный, чистота $\geq 99,95\%$). Для активации косточки фиников (сорт Мазафати, г. Бам, Иран) тщательно промыты дистиллированной водой и раздроблены в дробилке (IKA, Германия) для лучшего проинкновения раствора в твердую часть сырья. После раздробленные косточки фиников промыты раствором 1М соляной кислоты (раствор был предварительно разбавлен до рабочей концентрации 1М) (37%, Sigma-Aldrich) в течение 24 часов при перемешивании на магнитной мешалке со скоростью 400 перемешиваний в минуту. Затем косточки промыты горячей дистиллированной водой до нейтрального значения рН и высушены в сушильном шкафу при температуре 100 °С до отсутствия изменения массы. Преактивация проведена в трубчатой печи в атмосфере инертного газа (N_2) для карбонизации и стабилизации химического состава. Полученный УМ (5 г) перемешан с КОН в виде мелкого порошка в соотношении 1:1,5 и 1:3 и залит дистиллированной водой объемом 30 мл. После раствор помещен в ультразвуковую ванну (ELMASONIC P, Германия) на 0,5 часа и перемешан на магнитной мешалке (IKA C-MAG HS 7, Германия) в течение 1 часа. После перемешивания активатора с УМ раствор выдержан в сушильном шкафу при температуре 100 °С до полного испарения жидкости. Застывшая твердая масса прокалена при температуре 800 °С в трубчатой печи в атмосфере азота (скорость подачи азота 30 л/мин). После активации АУ промыт разбавленным раствором HCl ($\approx 5\%$) и горячей дистиллированной водой до рН=7.

Удельные площади поверхности полученных активированных углей измерены методом БЭТ (Autosorb iQ, Anton Paar, США). Перед измерениями около 100 мг образца дегазировано в условиях динамического вакуума при 300°С в течение 24 часов в дегазаторе FloVac (Anton Paar, США). Для исследования морфологии сделаны снимки с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе ZEISS Crossbeam 540 (Carl Zeiss, Германия) при ускоряющем напряжении 5 кВ. Для исследования структуры и наличия дефектов использован рентгенодифракционный анализ (РДА) на дифрактометре SmartLab (Rigaku Co., Япония) с излучением Cu K α ($\lambda = 0,154056$ нм). Дифракционные данные регистрировали в диапазоне 2 θ от 10° до 70° со скоростью сканирования 3°/мин, при работе источника рентгеновского излучения на 40 кВ и 30 мА. Межплоскостные расстояния d_{002} и d_{100} вычисляли по значениям 2 θ для плоскостей (002) и (100) с использованием уравнения Брегга ($2d \sin \theta = n\lambda$). Молекулярные состояния АУ исследованы Рамановской спектроскопией на приборе LabRam HR Evolution (Horiba, Франция). Образец размещали на стеклянной пластине, спектры КРС получали с применением вертикального объектива 10х в конфигурации обратного рассеяния под углом 180°. Для анализа диапазона 1100–1800 см⁻¹ использовался лазер с длиной волны 532 нм.

Для сборки симметричных ячеек рабочие электроды приготовлены в виде свободностоящих электродов. Для этой цели полученный АУ смешан с проводящей добавкой ацетиленовой сажи (MTI Corp., Китай) и связующим политетрафторэтиленом/тефлон (CAS: 9002-84-0, 60% дисперсия в воде, Sigma-Aldrich) в соотношении 90:5:5, соответственно. Затем в смесь добавлено 10 мл изопропанола, после чего её перемешивали на магнитной мешалке (200 rpm) при температуре 60°С в течение 12–14 часов. Полученная масса равномерно раскатана (Hohsen corp., Япония) до толщины 200-300 мкм, затем высушена в вакуумной печи (DZF-6050, Китай) при температуре 80°С. После сушки из материала вырезаны электроды диаметром 8 мм и толщиной 100 мкм $\pm$ 10 мкм (Hohsen corp., Япония) для дальнейшего использования в качестве электродов в ячейках.

В работе использованы ячейки Swagelok (Kintek, Китай) с двумя отверстиями, сделанные из тефлона, токоприемниками выступали стержни из нержавеющей стали (316 L) диаметром 10 мм и сепаратор из стеклянного микроволокна (Whatman GF/C, в свободно стоящем виде толщина составляет - 260 мкм, диаметр - 10 мм). Ячейки представляют собой сепаратор между двумя идентичными электродами из АУ, каждый массой 2,0 $\pm$ 0,5 мг. Перед сборкой ячеек

свободностоящие электроды пропитывали электролитом (6М КОН) под вакуумом в течение 5 минут.

Циклическая вольтамперометрия (ЦВА) и гальваностатическое циклирование проведены в диапазоне потенциалов от 0,01 до 1,0 В с использованием потенциостата/гальваностата BioLogic SP-240 (BioLogic, Франция). Измерения электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) с синусоидальным сигналом 5 мВ/с в диапазоне частот от 1 мГц до 100 кГц проведены также на потенциостате. В качестве электролита использовали 6М раствор КОН. Для достоверности анализа эксперименты проводились в троекратном повторении.

3. Результаты

3.1 Исследования полученных АУ

СЭМ-снимки (Рисунок 1) демонстрируют высокую пористость АУ. Образование большого количества пор подтверждает успешную активацию, что благоприятно сказывается на работе суперконденсаторов. Снимки СЭМ показывают, что получена целостная пористая структура по всей поверхности обоих образцов. Данные результаты хорошо сопоставимы с ранее полученными результатами (Issatayev et al., 2024; Said et al., 2023; Wang and Kaskel, 2012; Yang et al., 2020).

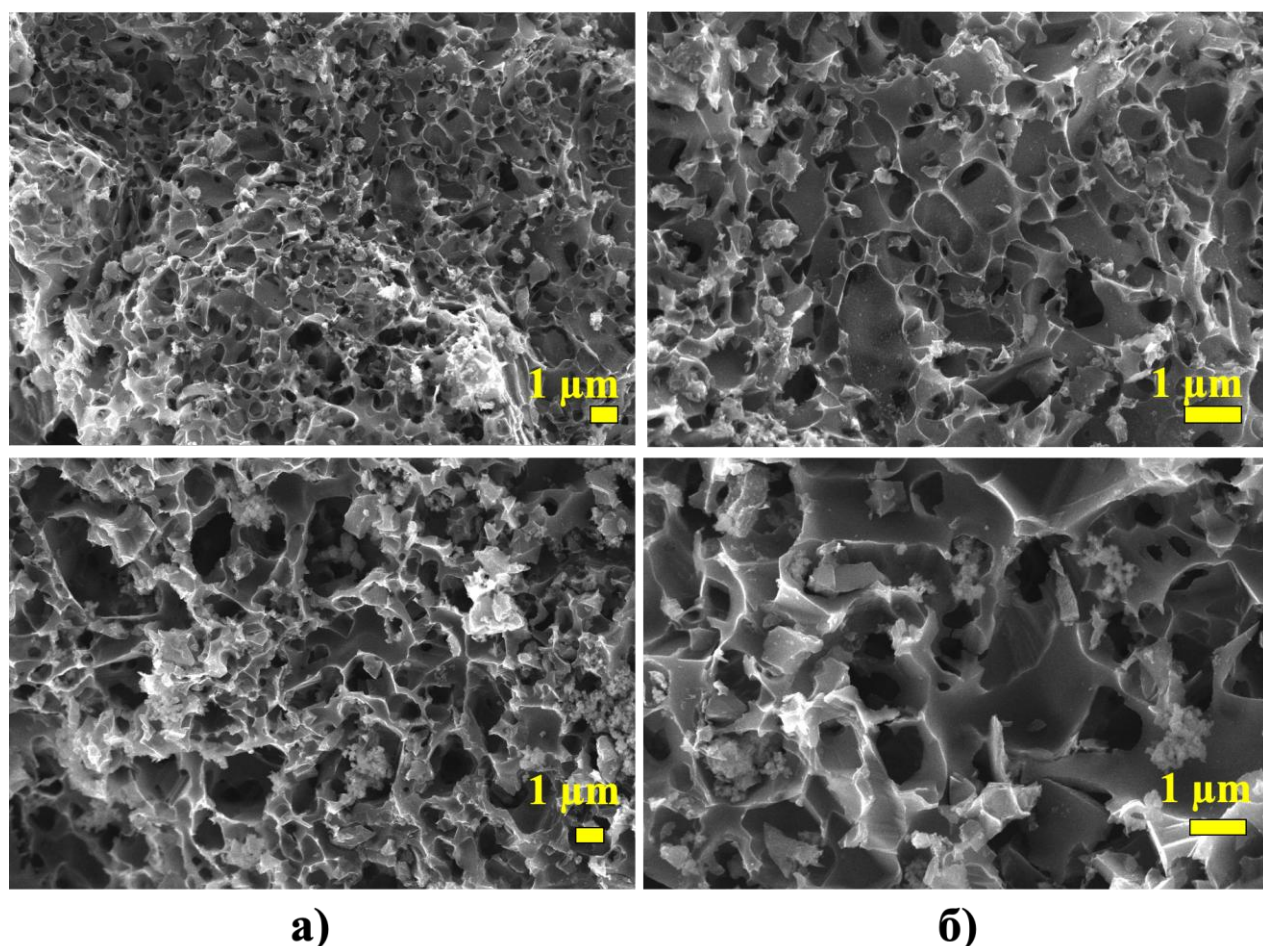


Рисунок 1. Снимки СЭМ АУ активированного в соотношении 1:1.5 (а) и 1:3 (б).

Анализ удельной поверхности по методу БЭТ проведен с использованием физической адсорбции азота при температуре -196°C на приборе Quantachrome Quadrasorb SI (Anton Paar, США). Удельная поверхность рассчитана по многоточечному методу БЭТ в диапазоне

относительного давления $p/p_0 = 0,1-0,3$, объём пор при $p/p_0 = 0,9$. Распределение по размерам пор оценивалось с использованием теории плотности закалённого твёрдого тела (QSDFT) для щелевых и цилиндрических пор (Neimark et al., 2009; Ravikovitch & Neimark, 2006) (Рисунок 2).

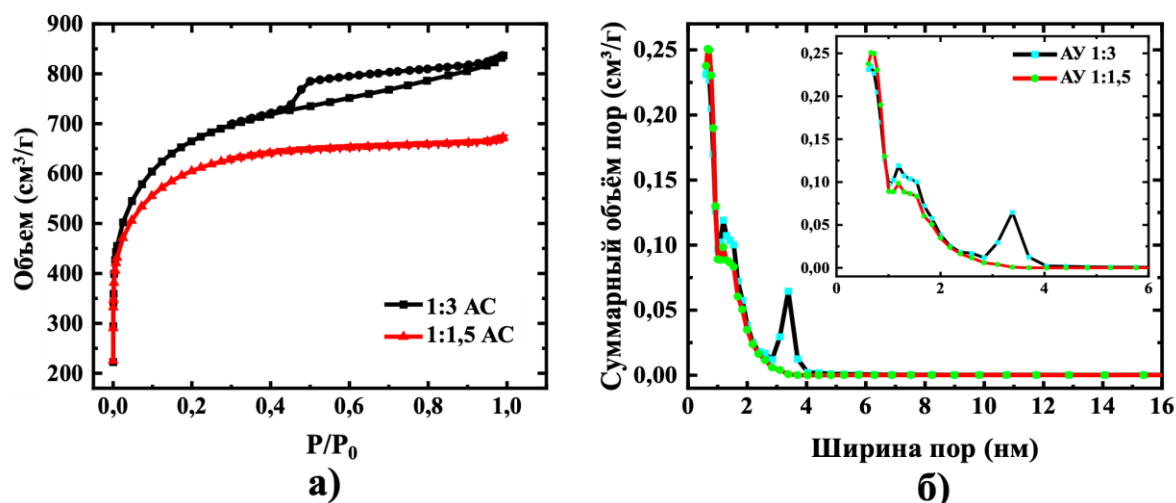


Рисунок 2. Изотермы адсорбции-десорбции азота для АУ (а) и распределение пор по размерам (б).

Изотермы адсорбции-десорбции азота при температуре 77 К для УМ соответствуют типу IV по классификации IUPAC (Rijfkogel et al., 2019; Sing, 1985), показывают наличие гистерезисной петли типа H4 для АУ 1:3, что свидетельствует о наличии мезопор щелевидной формы. УМ активированный в соотношении 1:1,5 не имеет выраженной гистерезисной петли, что свидетельствует о микропористой структуре, а также об отсутствии капиллярной конденсации в поровом пространстве. Наличие развитой микропористой структуры можно увидеть по быстрому увеличению объема адсорбированного азота при относительно низких давлениях ($P/P_0 < 0,1$) для обоих исследуемых образцов АУ (Rijfkogel et al., 2019).

Результаты структурных исследований изображены на Рисунке 3. РДА кривая каждого УМ имеет два широких дифракционных пика примерно при 23° и 43° соответствующие плоскостям (002) и (100), соответственно. Слабовыраженные пики в области 23° и $43-44^\circ$, для обоих образцов УМ свидетельствует об ограниченной упорядоченности структуры в плоскости и высокой аморфности материалов (Feng and Yang, 2024; Goskula et al., 2023).

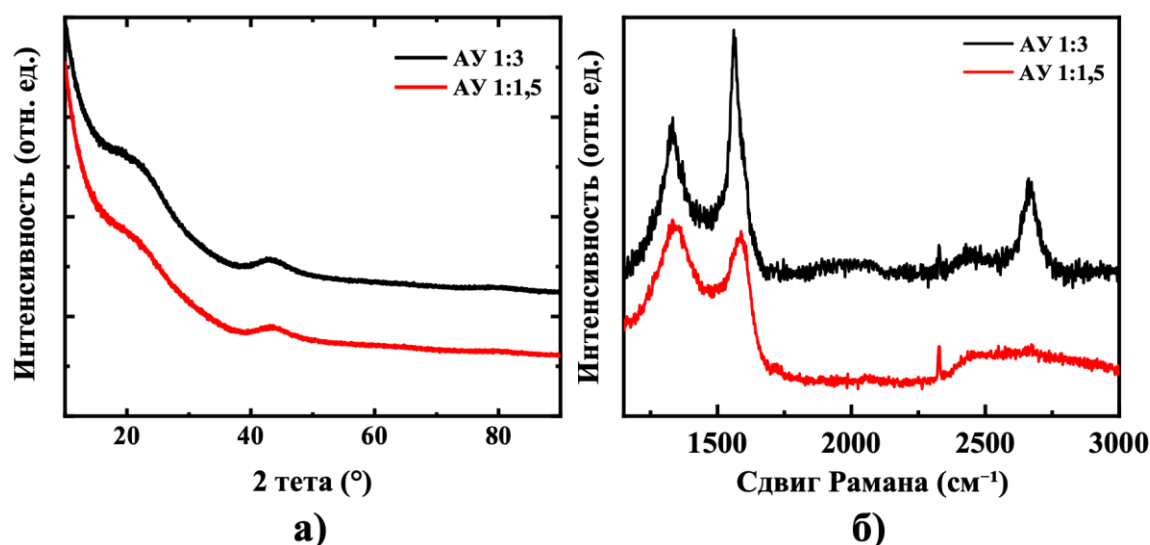


Рисунок 3. Кривые рентгенодифракционного анализа (а) и (б) Раман-спектроскопии

Спектроскопия Рамана показала наличие собственных для УМ полос D и G, в диапазонах $1339\text{--}1348\text{ см}^{-1}$ и $1586\text{--}1593\text{ см}^{-1}$, соответственно. Полоса D отражает колебания, индуцированные дефектами, и структурные нарушения в углеродной решётке. Полоса G обусловлена колебаниями растяжения в плоскости атомов углерода с гибридизацией sp^2 в графитоподобных структурах (He et al., 2017; Said et al., 2023; Suresh Kumar Reddy et al., 2015). Сравнение спектров показало, что АУ 1:3 имеет выраженные пики с четким, острым концом, в то время как в АУ 1:1,5 присутствуют широкие полосы D и G. В случае АУ 1:3 наблюдают пик 2D ($\sim 2700\text{ см}^{-1}$), что указывает на более высокую степень графитового упорядочения и более высокую степень графитизации, поскольку для второго УМ данная полоса не наблюдается (либо очень широкая).

Интегральное соотношение площадей пиков D и G (I_D/I_G) позволяет оценить степень структурного беспорядка в углеродсодержащих материалах: увеличение значения I_D/I_G указывает на возрастание степени беспорядка (Li et al., 2023). Соотношение $I_D/I_G \approx 1.04$ для АУ 1:3 свидетельствует о структурированном характере поверхности, в то время как АУ 1:1,5 $I_D/I_G \approx 1.52$ имеет большее количество дефектов поверхности. Также соотношение пиков указывает на увеличение проводимости УМ, что является характеристикой эффективности рабочих электродов.

3.2 Оценка электрохимической эффективности

Анализ электрохимической эффективности проведен в симметричных ячейках при комнатной температуре со скоростью сканирования 5 мВ/с . Кривые ЦВА (Рисунок 4а) имеют квазипрямоугольную форму, что свидетельствует о получении двойного электрического слоя на границе электрод-электролит, и что накопление заряда идет без участия химических реакций (Béguin et al., 2014; Laheääg et al., 2015). Отклонение от идеального прямоугольника указывает на небольшую долю псевдоемкости, которая обусловлена редокс-реакциями между электролитом и функциональными группами ($-\text{COOH}$, $-\text{C}=\text{O}$) на поверхности УМ (Chen et al., 2017; Heidarinejad et al., 2020; Lin et al., 2015). Поверхность модифицированного активированного угля содержит кислородсодержащие и азотсодержащие функциональные группы, такие, как $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{C}=\text{O}$ и $-\text{NH}_2$, которые способствуют улучшению электропроводности и увеличению псевдоёмкостных эффектов. Наличие этих групп обеспечивает более эффективный перенос ионов и способствует стабильной работе

суперконденсаторов при циклировании. Размер площади под ЦВА кривыми подтверждает большую емкость АУ 1:3 по сравнению с АУ 1:1,5, что согласуется с их значениями УПП.

После циклического сканирования ячейки испытаны гальваностатическими циклами заряд-разряд при разных плотностях тока. Для обоих образцов АУ кривые заряда-разряда имеют типичную правильную треугольную форму для суперконденсаторов (Рисунок 4б и 4в). АУ 1:3 показывает максимальное время заряда-разряда (492 секунды). Также ячейки испытаны на длительность циклирования при плотности тока 0,2 А/г (Рисунок 4г). На протяжении всех 10000 циклов заряда-разряда сохранялись высокие значения кулоновской эффективности (около 99%) и стабильная емкость, что указывает на стабильность системы и соответствует ожидаемым характеристикам суперконденсаторов с двойным электрическим слоем (Béguin et al., 2014; Chen et al., 2017).

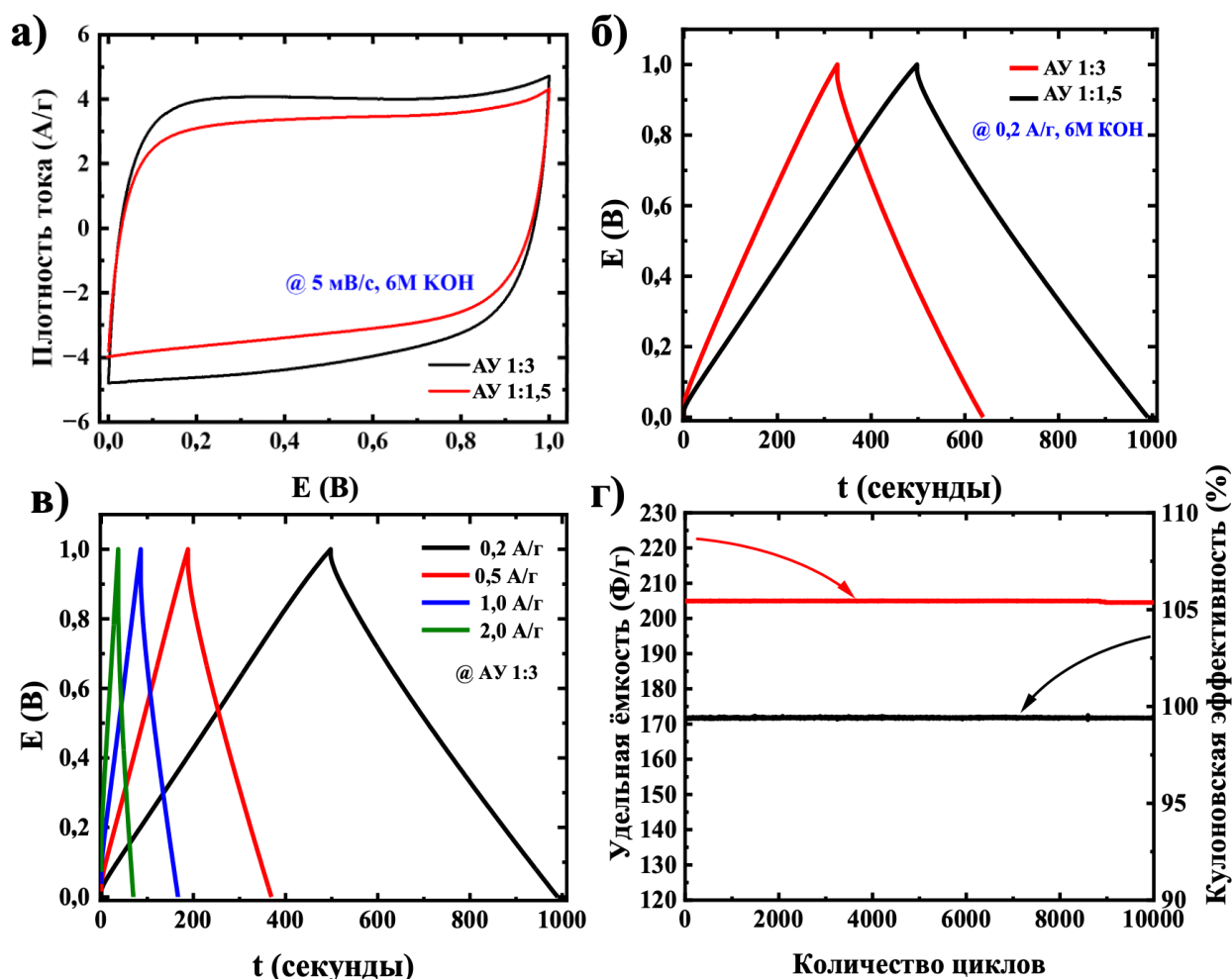


Рисунок 4. (а) Кривые ЦВА АУ при скорости сканирования 5 мВ/с; (б) кривые гальваностатического заряда-разряда двух образцов АУ при 0,2 А/г; (в) при различных плотностях тока; (г) длительное циклирование АУ 1:3 при плотности тока 0,2 А/г.

Расчет удельной емкости (Ф/г) по кривым заряда-разряда проведены с использованием уравнения:

$$C_{\text{spec}} = \frac{I \Delta t}{m \Delta V} \quad (1)$$

где I - значение подаваемого тока в амперах (А), Δt - время разряда в секундах, m - масса активного вещества в граммах, ΔV - рабочее напряжение с учетом IR-падения напряжения (В).

Стоит отметить, что оба образца имели минимальные значения IR-падения напряжения, что, в свою очередь, свидетельствует о хорошем контакте между электродом и токосъёмником, а также о высокой проводимости активного материала.

Энергетическая плотность (E_{spec}) рассчитывается по формуле (2) [18]:

$$E_{\text{spec}} = \frac{C_{\text{spec}} \cdot U_{\text{max}}^2}{7.2} \quad (2)$$

Значения удельной мощности (Вт/кг) рассчитаны по формуле (3):

$$P = \frac{3600 \cdot E_{\text{spec}}}{\Delta t} \quad (3)$$

Для определения сопротивления в ячейке использован метод ЭИС (Рисунок 5). Полученные графики типичны для суперконденсаторов на основе АУ и сопоставимы с ранее полученными результатами (Ghosh et al., 2019; Tang et al., 2025; Zhao et al., 2024).

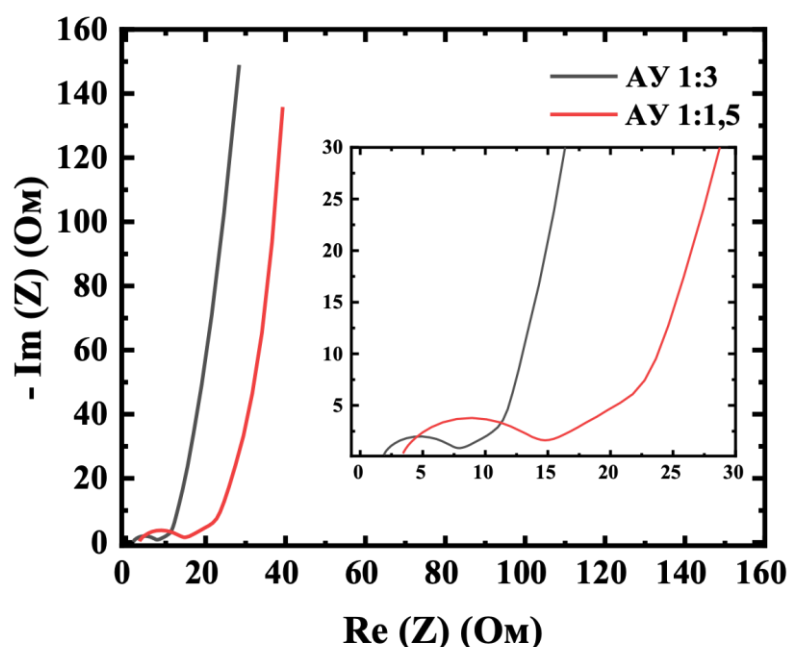


Рисунок 5. Кривые импедансной спектроскопии для двух образцов АУ

Полукруг, полученный на высоких частотах, отвечает за сопротивление переноса заряда между токосъёмниками и активным материалом (активированным углем). Расчет емкостных параметров по данным импедансной спектроскопии проводился в соответствии с методикой, описанной в работах (Béguin et al., 2014; Laheäär et al., 2015; Parejo-Tovar and Béguin, 2024). Полученные результаты с указанием стандартных отклонений эквивалентного последовательного сопротивления (ЭПС), сопротивления переноса заряда (СПЗ), ионного сопротивления (ИС) и сопротивления диффузии (СД) приведены в Таблице 1. Приведённые данные подтверждают, что АУ 1:3 обладает лучшими транспортно-кинетическими свойствами по сравнению с АУ 1:1,5.

Таблица 1. Значения сопротивления АУ 1:3 и 1:1,5

Активированный уголь	ЭПС, Ω	СПЗ, Ω	ИС, Ω	СД, Ω
1:3	$1,58 \pm 0,03$	$2,21 \pm 0,12$	$2,92 \pm 0,15$	$6,61 \pm 0,11$
1:1,5	$2,52 \pm 0,23$	$2,23 \pm 0,18$	$4,21 \pm 0,23$	$8,78 \pm 0,11$

4. Обсуждение

Методом химической активации получены АУ с высокими значениями УПП, которая для АУ 1:3 составила $2423 \text{ м}^2/\text{г}$. Объем пор, рассчитанный с использованием теории функционала плотности закалённого твёрдого тела, составил $1,19 \text{ см}^3/\text{г}$. Для АУ 1:1,5 значение УПП составляет $2215 \text{ м}^2/\text{г}$ при объёме пор $0,953 \text{ см}^3/\text{г}$. Распределение пор по размерам показывает отсутствие мезопор для АУ 1:1,5; в то время как суммарный объем мезопор АУ 1:3 составляет больше $0,06 \text{ см}^3/\text{г}$. Анализ СЭМ показал образование пористой структуры с хорошо распределенными порами, что доказывает успешную активацию, и показывает возможность использования углей в качестве электродов для суперконденсаторов с двойным электрическим слоем.

Структурный анализ активированного КОН угля АУ 1:3 показывает значительную пористость и наличие дефектов поверхности. Эти особенности обеспечивают высокую удельную поверхность и большое количество функциональных групп на поверхности УМ ($-\text{COOH}$, $-\text{C}=\text{O}$ и $-\text{OH}$), что благоприятно сказывается на адсорбционных и электрохимических свойствах материала.

АУ 1:3 продемонстрировал удельную емкость 204 Ф/г при плотности тока $0,2 \text{ А/г}$, для АУ 1:1,5 значение удельной емкости составляло 128 Ф/г . При циклировании с различными плотностями тока наблюдалось, что с увеличением плотности тока время заряда–разряда сокращается. Удельная емкость при этом составила 182 Ф/г при $0,5 \text{ А/г}$ и 165 Ф/г при 1 А/г , что соответствует ожидаемому поведению суперконденсаторов с двойным электрическим слоем. Рассчитанная для такой ячейки плотность энергии составило $28,3 \text{ Втч/кг}$, удельная мощность равна 205 Вт/кг (см. Уравнение 3), что является хорошим показателем для углей, полученных из биоотходов (Таблица 2).

Таблица 2. Сравнение электрохимических характеристик углеродных материалов из биоотходов с литературными данными

Материал	Удельная ёмкость	Энергия и Мощность	Электролит	Тип ячейки
Сухая трава <i>Hyparrhenia hirta</i> (<i>Duraisamy et al.</i> , 2025)	$106,6 \text{ Ф/г}$ при 2 А/г	$33,3 \text{ Втч/кг}$ при плотности мощности 1500 Вт/кг	$1\text{M Na}_2\text{SO}_4$	симметричная
Пшеничная шелуха (<i>Wang et al.</i> , 2022)	346 Ф/г при 1 А/г	$12,02 \text{ Втч/кг}$ при плотности мощности 250 Вт/кг	$1\text{M H}_2\text{SO}_4$	симметричная
Липа (<i>Yan et al.</i> , 2022)	$172,5 \text{ Ф/г}$ при 2 А/г	$22,44 \text{ Втч/кг}$ при $0,05 \text{ А/г}$. $1996,4 \text{ Вт/кг}$ при $2,5 \text{ А/г}$	6M KOH	симметричная

Жмых винограда (Zhang et al., 2020)	239 Ф/г при 0,5 А/г	16,3 Втч/кг при плотности мощности 348,3 Вт/кг	1М Н ₂ SO ₄	симметричная
Семена щетинной травы (Liang et al., 2021)	358 Ф/г при 0,5 А/г	-	6М КОН	трехэлектродная конфигурация
Кожура помело (Li et al., 2020)	66,5 Ф/г при 1 А/г	36 ± 1,5 Втч/кг при плотности мощности 1000 Вт/кг	2М Li ₂ SO ₄	симметричная
Рисовая шелуха (Liu et al., 2022).	103,4 Ф/г при 20 А/г; 148,3 Ф/г при 0,2 А/г	2,7 Втч/кг при плотности мощности 4300 Вт/кг	6М КОН	симметричная
Косточки фиников (данная работа)	204 Ф/г при 0,2 А/г; 182 Ф/г при 0,5 А/г; 165 Ф/г при 1 А/г	28,3 Втч/кг при плотности мощности 205 Вт/кг	6М КОН	симметричная

Результаты длительного циклирования показывают, что КПД на протяжении всего циклирования стабильный и составлял не менее 99,7%. Это, в свою очередь, является сравнительно хорошим показателем среди других суперконденсаторов, полученных из биоотходов. Высокое значение кулоновской эффективности на протяжении 10000 циклов объясняется прямым контактом между электродом и токосъемником, что уменьшило дополнительное сопротивление между ними, дополнительно толщина электродов в 100 мкм позволила использовать поверхность УМ полностью.

В ходе анализа методом импедансной спектроскопией для АУ 1:3 получены низкие значения СПЗ, ИС и ЭПС, что в совокупности указывает на снижение суммарного внутреннего сопротивления (на контакте электрод–токосъемник и в электролите) (Laheäär et al., 2015; Parejo-Tovar and Béguin, 2024). Это обеспечивает более быстрые межфазные процессы и эффективный перенос ионов через поры, а также сниженную величину сопротивления в пористом электроде. Низкое значение ЭПЗ делает АУ 1:3 лучшим УМ для суперконденсаторов, так как именно ЭПЗ отвечает за падение напряжения в системе и влияет на мощностные характеристики. Низкое падение напряжения в системе, в свою очередь, дает низкую потерю мощности в дальнейшем (Laheäär et al., 2015). Более того, несмотря на то, что для двух УМ использован один и тот же электролит (6М КОН), значения ИС отличаются, что, вероятно, связано с различиями в пористой структуре и химическом составе поверхности электродного материала.

5. Заключение

Из косточек фиников получены активированные угли с большой УПП, с оптимальными размерами и объемом пор, что увеличило удельную емкость и стабилизировало эффективность симметричного суперконденсатора на протяжении 10000 циклов. Электрохимическая эффективность подтверждена импедансной спектроскопией, что показало низкие значения ионного сопротивления, сопротивления между контактами, а также сопротивление переноса заряда. В ходе исследования определено оптимальное соотношение сырья к активатору 1:3. Изменения в структуре АУ подтверждены РДА, Раман-

спектроскопией и БЭТ-анализом. Уголь, активированный таким образом, показал УПП равную 2423,4 м²/г. Большой объем пор и наличие микро- и мезопористой структуры АУ 1:3 делает его потенциально перспективным материалом для применения в адсорбционных, каталитических и электрохимических системах.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов:

Концептуализация - Н.М., А.Б.; методология - Н.М.; валидация - А.Б., А.Н., А.М.; исследование - Н.М.; курирование данных - А.Б.; написание - подготовка оригинального черновика - Н.М.; написание - рецензирование и редактирование - Н.М.; руководство - А.Н., А.М.; администрирование проекта - А.Н.; получение финансирования - А.Н. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторе

Маканова, Назым – ассистент исследователя, National Laboratory Astana, Назарбаев Университет, ул. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан, 010000; nazym.makanova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-0208-278X>

Белгибаева, Аяулым – ведущий научный сотрудник, National Laboratory Astana, Назарбаев Университет, Институт аккумуляторов, ул. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан, 010000; ayaulym.belgibayeva@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3052-5241>

Муканова, Алия – ведущий научный сотрудник, National Laboratory Astana, Назарбаев Университет, Институт аккумуляторов, ул. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан, 010000; aliya.mukanova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1171-176X>

Нурпейсова, Арайлым – ведущий научный сотрудник, National Laboratory Astana, Назарбаев Университет, Институт аккумуляторов, ул. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан, 010000; arailym.nurpeissova@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9657-2964>

9. Финансирование: данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №BR24992766, грант №BR21882402).

10. Благодарности: нет.

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

12. Список литературы

1. Béguin, F., Presser, V., Balducci, A., & Frackowiak, E. (2014). Carbons and electrolytes for advanced supercapacitors. *Adv Mater*, 26, 2219–2251. <https://doi.org/10.1002/adma.201304137>
2. Chen, X., Paul, R., & Dai, L. (2017). Carbon-based supercapacitors for efficient energy storage. *Natl Sci Rev*, 4, 453–489. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx009>
3. Duraisamy, N., Shenniangirivalasu, K., Dhandapani, E., Kandiah, K., Panchu, S. J., & Swart, H. C. (2025). Biomass Derived 3D Hierarchical Porous Activated Carbon for Solid-State Symmetric Supercapacitors. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. <https://doi.org/10.1007/s10904-025-03837-x>
4. Elanthamilan, E., Catherin Meena, B., Renuka, N., Santhiya, M., George, J., Kanimozhi, E.P., Christy Ezhilarasi, J., & Princy Merlin, J. (2021). Walnut shell derived mesoporous activated carbon for high performance electrical double layer capacitors. *J Electroanal Chem*, 901, 115762. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115762>

5. Feng, Y., & Yang, Q. (2024). Porous carbon derived from activated banana peels for energy storage and conversion application. In: Elsevier (Eds.), *Banana Peels Valorization*, 229–258. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95937-7.00010-X>
6. Ghosh, S., Santhosh, R., Jeniffer, S., Raghavan, V., Jacob, G., Nanaji, K., Kollu, P., Jeong, S. K., & Grace, A. N. (2019). Natural biomass derived hard carbon and activated carbons as electrochemical supercapacitor electrodes. *Sci Rep*, 9, 52006. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52006-x>
7. Guskula, S., Siliveri, S., Gujjula, S. R., Adepu, A. K., Chirra, S., & Narayanan, V. (2023). Development of activated sustainable porous carbon adsorbents from Karanja shell biomass and their CO₂ adsorption. *Biomass Convers Biorefin*, 14, 32413–32425. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05198-2>
8. He, Z., Zhang, G., Chen, Y., Xie, Y., Zhu, T., Guo, H., & Chen, Y. (2017). The effect of activation methods on the electrochemical performance of ordered mesoporous carbon for supercapacitor applications. *J Mater Sci*, 52, 8161–8173. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0536-x>
9. Heidarinejad, Z., Dehghani, M.H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environ Chem Lett*, 18, 393–415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
10. Hu, Z., & Srinivasan, M. P. (1999). Preparation of high-surface-area activated carbons from coconut shell. *Microporous Mesoporous Mater*, 27, 11–18. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(98\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(98)00183-8)
11. Huang, S., Zhu, X., Sarkar, S., & Zhao, Y. (2019). Challenges and opportunities for supercapacitors. *APL Mater*, 7, 100902. <https://doi.org/10.1063/1.5116146>
12. Issatayev, N., Tassybay, K., Wu, N.-L., Nurpeissova, A., Bakenov, Z., & Kalimuldina, G. (2024). LiF modified hard carbon from date seeds as an anode material for enhanced low-temperature lithium-ion batteries. *Carbon*, 229, 119479. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119479>
13. Laheäär, A., Przygocki, P., Abbas, Q., & Béguin, F. (2015). Appropriate methods for evaluating the efficiency and capacitive behavior of different types of supercapacitors. *Electrochem Commun*, 60, 21–25. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2015.07.022>
14. Lee, H.-C., Byamba-Ochir, N., Shim, W.-G., Balathanigaimani, M. S., & Moon, H. (2015). High-performance supercapacitors based on activated anthracite with controlled porosity. *J Power Sources*, 275, 668–674. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.072>
15. Li, G., Iakunkov, A., Boulanger, N., Lazar, O. A., Enachescu, M., Grimm, A., & Talyzin, A. V. (2023). Activated carbons with extremely high surface area produced from cones, bark and wood using the same procedure. *RSC Adv*, 13, 14543–14553. <https://doi.org/10.1039/D3RA00820G>
16. Li, G., Li, Y., Chen, X., Hou, X., Lin, H., & Jia, L. (2020). One-step synthesis of N, P co-doped hierarchical porous carbon nanosheets derived from pomelo peel for high-performance supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 820, 153123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153123>
17. Liu, Y., Tan, H., Tan, Z., & Cheng, X. (2022). Rice husk-derived capacitive carbon prepared by one-step molten salt carbonization for supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 55, 105437. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105437>
18. Liang, X., Liu, R., & Wu, X. (2021). Biomass waste derived functionalized hierarchical porous carbon with high gravimetric and volumetric capacitances for supercapacitors. *Microporous and Mesoporous Materials*, 310, 110659. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110659>
19. Lin, G., Wang, F., Wang, Y., Xuan, H., Yao, R., Hong, Z., & Dong, X. (2015). Enhanced electrochemical performance of ordered mesoporous carbons by a one-step carbonization/activation treatment. *J Electroanal Chem*, 758, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.10.016>
20. Menya, E., Olupot, P.W., Storz, H., Lubwama, M., & Kiros, Y. (2018). Production and performance of activated carbon from rice husks for removal of natural organic matter from

- water: A review. *Chem Eng Res Des*, 129, 271–296. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.11.008>
21. Neimark, A. V., Lin, Y., Ravikovitch, P. I., & Thommes, M. (2009). *Quenched solid density functional theory and pore size analysis of micro-mesoporous carbons*. *Carbon*, 47(7), 1617–1628. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.01.050>
22. Parejo-Tovar, A., & Béguin, F. (2024). The NaClO₄-water eutectic electrolyte for environmentally friendly electrical double-layer capacitors operating at low temperature. *Energy Storage Mater*, 69, 103387. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103387>
23. Poonam, Sharma, K., Arora, A., & Tripathi, S. K. (2019). Review of supercapacitors: Materials and devices. *J Energy Storage*, 21, 801–825.
24. Ravikovitch, P. I., & Neimark, A. V. (2006). Density functional theory model of adsorption on amorphous and microporous silica materials. *Langmuir*, 22(26), 11171–11179. <https://doi.org/10.1021/la061560m>
25. Rijfkoel, L. S., Ghanbarian, B., Hu, Q., & Liu, H.-H. (2019). Clarifying pore diameter, pore width, and their relationship through pressure measurements: A critical study. *Mar Pet Geol*, 107, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.05.019>
26. Said, B., Bacha, O., Rahmani, Y., Harfouche, N., Kheniche, H., Zerrouki, D., Belkhalifa, H., & Henni, A. (2023). Activated carbon prepared by hydrothermal pretreatment-assisted chemical activation of date seeds for supercapacitor application. *Inorg Chem Commun*, 155, 111012. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111012>
27. Sing, K. S. W. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure Appl Chem*, 57, 603–619. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
28. Sujiono, E. H., Zabrian, D., Zurnansyah, M., Mulyati, Z., Zharvan, V., Samnur, & Humairah, N. A. (2022). Fabrication and characterization of coconut shell activated carbon using variation chemical activation for wastewater treatment application. *Results Chem*, 4, 100291. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100291>
29. Supiyeva, Z., Pan, X., & Abbas, Q. (2023). The critical role of nanostructured carbon pores in supercapacitors. *Curr Opin Electrochem*, 39, 101249. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2023.101249>
30. Suresh Kumar Reddy, K., Al Shoaibi, A., & Srinivasakannan, C. (2015). Impact of process conditions on preparation of porous carbon from date palm seeds by KOH activation. *Clean Technol Environ Policy*, 17, 1671–1679. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0875-8>
31. Tang, M., Meng, Y., Yang, Y., & Wu, S. (2025). Expanding the electrochemical stable window of water through propylene carbonate addition for aqueous-based energy storage devices. *Chem Eng J*, 504, 158831. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158831>
32. Wang, J., & Kaskel, S. (2012). KOH activation of carbon-based materials for energy storage. *J Mater Chem*, 22, 23710–23725. <https://doi.org/10.1039/c2jm34066f>
33. Wang, Y., Chen, Y., Zhao, H., Li, L., Ju, D., Wang, C., & An, B. (2022). Biomass-Derived Porous Carbon with a Good Balance between High Specific Surface Area and Mesopore Volume for Supercapacitors. *Nanomaterials*, 12(21), 3804. <https://doi.org/10.3390/nano12213804>
34. Yan, B., Zheng, J., Feng, L., Du, C., Jian, S., Yang, W., Wu, Y. A., Jiang, S., He, S., & Chen, W. (2022). Wood-derived biochar as thick electrodes for high-rate performance supercapacitors. *Biochar*, 4(1), 50. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00176-9>
35. Yang, Z., Gleisner, R., Mann, D. H., Xu, J., Jiang, J., & Zhu, J. Y. (2020). Lignin based activated carbon using H₃PO₄ activation. *Polymers*, 12, 2829. <https://doi.org/10.3390/polym12122829>
36. Zhai, Z., Zhang, L., Du, T., Ren, B., Xu, Y., Wang, S., Miao, J., & Liu, Z. (2022). A review of carbon materials for supercapacitors. *Mater Des*, 223, 111017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111017>
37. Zhang, J., Chen, H., Ma, Z., Li, H., Dong, Y., Yang, H., Yang, L., Bai, L., Wei, D., & Wang, W. (2020). A lignin dissolution-precipitation strategy for porous biomass carbon materials derived

- from cherry stones with excellent capacitance. *J Alloys Compd*, 832, 155029. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155029>
38. Zhang, J., Chen, H., Bai, J., Xu, M., Luo, C., Yang, L., Bai, L., Wei, D., Wang, W., & Yang, H. (2020). N-doped hierarchically porous carbon derived from grape marcs for high-performance supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, 846, 157207. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157207>
39. Zhao, X., Wang, H., Gulqire, T., Sun, C., & Yang, C. (2024). The influence of ethylene glycol on the low-temperature electrochemical performance of carbon-based supercapacitors. *Ionics*, 30, 5675–5683. <https://doi.org/10.1007/s11581-024-05535-z>

Суперконденсаторларда қолдану үшін биомасса қалдықтарынан активтендірілген көмір алу

Назым Мақанова, Аяулым Белгібаева, Алия Муканова, Арайлым Нурпейсова

Аңдатпа. Энергияны сақтайтын материалдарға деген жоғары сұраныс және тұрақты да таза даму қажеттілігі ғалымдардың жаңартылатын ресурстарды пайдалануға және биоқалдықтарды жоюға назарын арттыруда. Бұл жұмыста біз құрма дәнектерін қолдандық – тамақ өнеркәсібінің қол жетімді және жыл сайын жаңартылатын жанама өнімі. Көміртегіге бай құрма тұқымдары суперконденсаторлардағы көміртекті электродтардың прекурсорлары ретінде қызмет ету үшін үлкен потенциалға ие. Циклдік тұрақтылық пен кулондық тиімділікті арттыру үшін еркін тұра алатын электродтар жасалды. КОН мен биокөмірдің 1:3 қатынасындағы активтендіру процесі 0,2 А/г ток тығыздығында екі электродты симметриялы жүйе үшін 204 Ф/г меншікті сыйымдылықты, сондай-ақ 28,3 Вт⊕сағ/кг энергия тығыздығын және 205 Вт/кг меншікті қуатты алуға мүмкіндік берді. Бұл осы тәсілдің құрылымдық тұтастықты арттырудағы және электрохимиялық қасиеттерін жақсартудағы тиімділігін көрсетеді. БЭТ анализі 1:3 КОН қатынасында белсендірілген көмірдің меншікті бетінің ауданының мәні 2423,4 м²/г болатынын көрсетті. Бұл зерттеуде еркін тұратын электродтарды енгізу кулондық тиімділікті 99,97% жеткізді, бұл өз кезегінде суперконденсаторлардың жоғары өнімділігін алуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: суперконденсаторлар, көміртекті материал, активтендірілген көмір, химиялық активтендіру.

Production of activated carbon from biomass waste for application in supercapacitors

Nazym Makanova, Ayaulym Belgibayeva, Aliya Mukanova, Arailym Nurpeissova

Abstract: The high demand for energy conservation materials and the need for sustainable and environmentally friendly development increase scientists' attention to the use of renewable resources and the disposal of bio-waste. In this work, we used date seeds, an affordable and annually renewable byproduct of the food industry. Rich in carbon, date seeds have the innate potential to serve as precursors to carbon electrodes in supercapacitors. To increase cyclic stability and Coulomb efficiency, free-standing electrodes were manufactured. The activation process with a KOH to biochar ratio of 1:3 allowed us to obtain a specific capacitance of 204 F/g for a two-electrode symmetrical system with a current density of 0.2 A/g, as well as an energy density of 28,3 Wh/kg and a specific power of 205 W/kg, which emphasizes the effectiveness of this approach in increasing

structural integrity and improving electrochemical properties. The BET analysis revealed a high surface area of carbon activated in a ratio of 1:3 KOH, the value for which was 2423.4 m²/g. In this study, the introduction of free-standing electrodes resulted in a high Coulomb value of 99.97%, which in turn allows for high performance of supercapacitors.

Keywords: supercapacitors, carbon material, activated carbon, chemical activation.

Многофункциональный полиэтиленимин: физико-химические свойства и современные области применения

Томирис Нурлыбаева*, Гузель Абилова, Жанагуль Махамбетова, Задагул Султамұратова, Гулмира Жакупова

Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, Актобе, Казахстан; diable.samaaa@gmail.com, guzelab82@mail.ru, mahambetova25@mail.ru, zadasb@mail.ru, gulmira.zhakupova80@bk.ru

*Корреспонденция: diable.samaaa@gmail.com

Цитирование: Нурлыбаева, Т., Абилова, Г., Махамбетова, Ж., Султамұратова, З., Жакупова, Г. Многофункциональный полиэтиленимин: физико-химические свойства и современные области применения (2025). Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. 153(4), 56-73. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-56-73>

Академический редактор:
Э.Е. Копишев

Поступила: 16.05.2025
Исправлена: 08.10.2025
Принята: 15.10.2025
Опубликована: 24.12.2025



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

Аннотация. Полиэтиленимин (ПЭИ) представляет собой синтетический полимер с высокой плотностью аминогрупп, что обуславливает его выраженные физико-химические свойства и широкие возможности структурной модификации. Благодаря сочетанию высокой реакционной способности, термической устойчивости и способности к комплексообразованию, ПЭИ рассматривается как один из наиболее универсальных полимеров современности. В обзорной статье систематизированы современные данные о методах получения линейного и разветвлённого полиэтиленимина, включая анионную полимеризацию азиридина, катионную полимеризацию 2-оксазолинов и кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина). Проанализировано влияние выбранного метода синтеза на молекулярную архитектуру, степень полидисперсности и распределение функциональных групп, что определяет растворимость, структурную стабильность и конформационные особенности полимера.

Особое внимание уделено ключевым физико-химическим характеристикам ПЭИ: способности к образованию координационных комплексов с ионами металлов, устойчивости к термическому и химическому воздействию, а также зависимости его поведения от pH среды. Приведены современные представления о применении ПЭИ в генной терапии и системах доставки лекарственных средств, где катионная природа полимера обеспечивает эффективное связывание и транспорт нуклеиновых кислот. Рассмотрены результаты исследований, подтверждающих эффективность ПЭИ как сорбционного материала для удаления тяжёлых металлов и органических загрязнений в процессах очистки воды, а также его использование в антимикробных покрытиях и биоматериалах медицинского назначения.

Обсуждаются перспективные подходы к повышению биосовместимости и снижению цитотоксичности полиэтиленимина за счёт химической модификации, создания композитных систем и функционализации природными биополимерами. Суммированные данные подтверждают, что полиэтиленимин представляет собой многофункциональный материал нового поколения, сочетающий структурную гибкость, высокую адаптивность и потенциал

применения в медицине, фармацевтике, экологии и современных технологиях материаловедения.

Ключевые слова: разветвлённый полиэтиленимин (р-ПЭИ), линейный полиэтиленимин (л-ПЭИ), поли(2-этил-2-оксазолин), кислотный гидролиз, анионная полимеризация, катионная полимеризация.

1. Введение

Полиэтиленимин (ПЭИ) – это синтетический полимер, содержащий многочисленные аминокгруппы, что придаёт ему уникальные свойства и широкие возможности для модификации. Различают две основные формы ПЭИ: разветвлённый (р-ПЭИ) и линейный (л-ПЭИ). Линейная форма обладает более упорядоченной структурой, что делает её предпочтительной для применения в биомедицинских технологиях, включая доставку лекарственных препаратов, генную терапию и создание антимикробных покрытий.

История ПЭИ берет начало в развитии синтетических полимеров в середине XX века. ПЭИ был впервые синтезирован в 1965 году путем полимеризации азиридина (Zhuk et al., 1965). Данный метод синтеза привел к образованию как линейных, так и разветвленных форм полиэтиленимина. Эта новаторская работа заложила основу для разработки ПЭИ как универсального полимера с различными промышленными и научными приложениями. В 1983 году Tanaka и его коллеги синтезировали высокомолекулярный л-ПЭИ с уникальными физико-химическими свойствами путем кислотно-катализируемой дебензоилизации поли(N-бензоилэтиленимина). Эти свойства делают л-ПЭИ перспективным материалом для разработки многофункциональных катализаторов и других применений, где необходимы высокая структурная однородность и возможность модификации полимера (Tanaka et al., 1983). В 1988 году Weyts и Goethals представили новый метод синтеза линейного ПЭИ, который значительно улучшил эффективность и выход процесса полимеризации. Это достижение позволило более стабильно производить линейный ПЭИ с желаемым распределением молекулярной массы, что повысило его применимость в различных областях (Weyts & Goethals, 1988).

В 1995 году Boussif и его коллеги продемонстрировали, что ПЭИ может эффективно способствовать доставке ДНК в клетки, делая его мощным инструментом для генной терапии и исследований в молекулярной биологии. Это открытие было значимым, так как катионная природа ПЭИ позволяет ему образовывать стабильные комплексы с отрицательно заряженными молекулами ДНК, способствуя их проникновению в клетки и экспрессии генов (Boussif et al., 1995).

Открытие и развитие ПЭИ существенно повлияли на разнообразные научные и промышленные области. Современное развитие полимерных материалов и стремление к созданию многофункциональных систем для медицины, экологии и промышленности стимулируют исследование синтетических полимеров с высокой степенью адаптивности. Полиэтиленимин (ПЭИ) представляет собой один из таких полимеров, обладающий значительным потенциалом за счёт наличия большого количества реакционноспособных аминокгрупп. Это делает ПЭИ привлекательным объектом для применения в генной инженерии, системах доставки биоактивных веществ, сорбентах и антимикробных материалах.

Актуальность темы определяется не только высокой востребованностью ПЭИ в прикладных областях, но и отсутствием исчерпывающих данных по вопросам его направленного синтеза, структурной организации и регуляции свойств. Несмотря на наличие работ, посвящённых его использованию, в научной литературе сохраняется интерес к разработке новых, более безопасных и эффективных форм полиэтиленимина с заданными характеристиками.

Новизна исследования заключается в систематизации современных подходов к синтезу ПЭИ, включая малоизученные методы, такие, как контролируемый кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина), а также сравнительный анализ анионной и катионной полимеризации азиридина. Кроме того, рассмотрены инновационные стратегии модификации ПЭИ с целью повышения его биосовместимости и снижения токсичности. Работа обладает как теоретической, так и прикладной значимостью. Теоретическая часть способствует углублению представлений о структуре, свойствах и реакционной способности полиэтилениминов, тогда как практическая направлена на оценку возможностей использования полученных данных при создании материалов нового поколения для биомедицины, водоочистки и антимикробной защиты.

2. Определение полиэтилениминов и их основные физико-химические свойства

Полиэтиленимины (ПЭИ) представляют собой полимерные молекулы, состоящие из повторяющихся звеньев аминогрупп и двух алифатических атомов углерода.

Полиэтиленимины доступны в двух формах – в виде разветвленного (р-ПЭИ) и линейного (л-ПЭИ) полиэтиленимина. Разветвленный ПЭИ имеет все типы первичных (-NH₂-), вторичных (-NH-), и третичных аминогрупп (-N-), тогда как линейный ПЭИ содержит только вторичные аминогруппы. Структура двух форм полиэтиленимина представлена на рисунке 1.

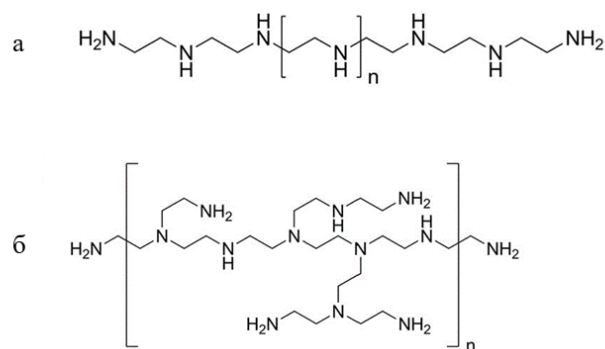


Рисунок 1. Структура линейного (а) и разветвленного (б) полиэтиленimina (Yu et al., 2022)

Низкомолекулярный ПЭИ является жидкостью, в то время как высокомолекулярный ПЭИ – эластомер. Плотность ПЭИ 1050–1070 кг/м³, ПЭИ является малотоксичным; растворим в воде, спиртах, уксусной кислоте. ПЭИ проявляет высокую термическую стабильность. Температура разложения превышает 300°С. Плавление ПЭИ затруднительно из-за его высокой вязкости, но термическое разложение начинается при температуре выше 150°С.

ПЭИ обладает высокой прочностью на растяжение и хорошей эластичностью. Механические свойства зависят от молекулярного веса и степени сшивки полимера. ПЭИ обладает высокой химической устойчивостью и может образовывать прочные комплексы с металлами и органическими молекулами. Полимер активно взаимодействует с кислотами и может быть легко модифицирован за счет протонирования аминогрупп.

Благодаря своему поликатионному характеру ПЭИ имеет множество применений. Свойства ПЭИ могут быть легко модифицированы изменением структуры цепи и молекулярного веса. л-ПЭИ отличается от р-ПЭИ своей более упорядоченной и кристаллической структурой, что влияет на его физические и химические свойства (von Zelewsky et al., 1993). Основные физико-химические свойства ПЭИ представлены в таблице (таблица 1).

Таблица 1. Основные физико-химические свойства ПЭИ

Название показателя	Показатели
Растворимость	ПЭИ обладает высокой растворимостью в воде благодаря наличию гидрофильных аминогрупп. Это свойство делает его идеальным кандидатом для формирования водорастворимых металлических комплексов.
Комплексообразование	ПЭИ демонстрирует высокую способность к связыванию металлических ионов из-за высокой локальной концентрации функциональных групп (аминогрупп). Это свойство позволяет ПЭИ эффективно образовывать комплексы с различными металлами, включая Cu^{2+} , Ni^{2+} и другие, что делает его важным материалом в координационной химии.
Стабильность	ПЭИ и его металлические комплексы обладают хорошей химической и физической стабильностью, что позволяет использовать их в различных химических реакциях и приложениях.
Конформационные свойства	ПЭИ имеет компактную конформацию в растворе, что обусловлено сильными взаимодействиями между соседними аминогруппами через водородные связи. Однако, несмотря на свою компактную форму, распределение функциональных групп не однородно, что приводит к наличию областей с высокой концентрацией аминов и других областей с их дефицитом.
Электростатические взаимодействия	ПЭИ демонстрирует поведение, подобное аллостерическим эффектам, где его химические свойства могут изменяться в зависимости от координации металлических ионов или протонирования. Это позволяет ПЭИ легко адаптироваться к наиболее благоприятной конфигурации для комплексообразования.
pH-зависимость	Поведение ПЭИ зависит от pH среды. В сильно кислых растворах ПЭИ находится в протонированном состоянии и не образует комплексы с металлами. В нейтральной и щелочной средах происходит образование гидроксо-комплексов, и конкуренция между аминогруппами и гидроксидом может привести к образованию смешанных комплексов.
Токсичность и биоактивность	ПЭИ продемонстрировал высокую токсичность в некоторых условиях, однако его способность связываться с анионами и низкомолекулярными биомолекулами может использоваться в биомедицинских приложениях, таких, как доставка лекарств и лечение раковых заболеваний.

Разветвленные формы ПЭИ показывают высокую эффективность трансфекции, но также сопряжены с более высокой токсичностью по сравнению с линейными формами. Различия в токсичности могут зависеть от молекулярной массы и архитектуры полимера.

Синтетические методы позволяют производить ПЭИ с молекулярной массой в диапазоне от 300 до 750,000 Да.

л-ПЭИ является твердым при комнатной температуре (температура плавления около 73–75 °C), тогда как р-ПЭИ является жидким, независимо от молекулярной массы. л-ПЭИ растворим в горячей воде при низком рН, а также в хлороформе, этаноле или метаноле. Физические свойства л-ПЭИ представлены ниже (таблица 2).

Таблица 2. Физические свойства л-ПЭИ

Название показателя	Показатели
Плотность	1.08 г/мл при 25°C
Температура кипения	250°C
Температура вспышки	43,3°C
Парциальное давление:	9 мм рт.ст. при 20°C
Индекс преломления	1.5290 при 20°C

Линейный полиэтиленимин в безводном состоянии имеет кристаллическую структуру в виде двойной спирали, выровненной вдоль оси с конвенциональной кристаллической решетки. Линейный полиэтиленимин обладает антибактериальными свойствами по отношению к различным патогенам, что позволяет использовать его в качестве бактериостатического агента (Yu et al., 2022).

3. Методы синтеза линейного полиэтиленимина

Существует множество способов получения л-ПЭИ с различными молекулярными массами и характеристиками.

Анионная и катионная полимеризация азиридина. Полимеризация азиридина осуществляется двумя основными методами: катионной и анионной полимеризацией. Катионная полимеризация азиридина приводит к образованию р-ПЭИ и характеризуется неконтролируемым ростом цепей, что приводит к широкому распределению молекулярной массы и сложности в регулировании структуры полимера. В отличие от нее, анионная полимеризация позволяет получать линейный полиэтиленимин с узким молекулярно-массовым распределением и предсказуемыми свойствами. Paul A. Rupar и др. разработали метод синтеза л-ПЭИ с использованием живой анионной полимеризации функционализированных азиридиновых мономеров. Этот метод обеспечивает точный контроль молекулярной массы, минимизирует полидисперсность и исключает образование амидных примесей, что делает его перспективным для биомедицинских и промышленных применений (Rupar et al., 2017). Tassilo Gleede и др. провели всесторонний анализ методов полимеризации азиридинов и азетидинов для получения полиаминов, с особым акцентом на синтез л-ПЭИ. Они подчеркнули важность стадии десульфирования, которая позволяет получать чистый л-ПЭИ после анионной полимеризации, а также сравнили эффективность различных инициаторов и растворителей (Gleede et al., 2019). Основные различия между методами катионной и анионной полимеризацией азиридина приведены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение катионной и анионной полимеризации азиридина

Параметр	Анионная полимеризация	Катионная полимеризация
Тип получаемого полиэтиленимина	Линейный	Разветвленный
Контроль молекулярной массы	Высокий (узкий индекс полидисперсности)	Низкий (широкий индекс полидисперсности)
Основные инициаторы	Щелочные металлы, органические основания (NaNH ₂ , LDA, KOBu)	Протонные кислоты, алкилгалогениды (BF ₃ , HCl, AlCl ₃)
Температура реакции	25–80°C	0–50°C
Механизм роста цепи	Нуклеофильное раскрытие кольца	Электрофильное раскрытие кольца
Полидисперсность	Узкая (индекс полидисперсности ≤ 1.10)	Широкая (индекс полидисперсности > 2.0)
Очистка продукта	Десульфирование для удаления защитных групп	Отсутствие стадий очистки

Следовательно, анионная полимеризация является более контролируемым и перспективным методом получения полиэтиленимина, в то время как катионная полимеризация применяется в случаях, когда требуется разветвленная структура полимера.

Катионная полимеризация 2-оксазолинов – это эффективный метод получения поли(оксазолинов), которые после гидролиза могут быть превращены в л-ПЭИ. Этот метод позволяет контролировать молекулярную массу, дисперсность и структуру полимеров, что делает его привлекательным для биомедицинских и промышленных приложений. Fangyu Hu и др. (Hu et al., 2014) исследовали катионную полимеризацию 2-оксазолинов с использованием трифлатов редкоземельных металлов (RE(OTf)₃) в качестве инициаторов. Такой подход позволил синтезировать поли(оксазолины) с высокой степенью контроля над молекулярной массой и узким распределением молекулярного веса. Кроме того, использование трифлатов редкоземельных металлов открывает возможности для создания сложных макромолекулярных структур, таких, как блок-сополимеры, с четко контролируемой архитектурой. С. Petit и коллеги (Petit et al., 2017) продемонстрировали, что применение ионных жидкостей в качестве реакционной среды и использование микрофлюидных технологий значительно ускоряют процесс полимеризации и улучшают контроль над молекулярной массой. Это особенно важно для синтеза л-ПЭИ, где точность молекулярных характеристик влияет на его конечные свойства. Кроме того, использование ионных жидкостей делает процесс более экологически чистым и энергоэффективным. Основные различия между методами катионной полимеризации 2-оксазолинов приведены в таблице 4.

Оба метода позволяют синтезировать поли(оксазолины), которые после гидролиза превращаются в л-ПЭИ, используемый в биомедицинских и промышленных технологиях.

Гидролиз поли(2-оксазолина) – это процесс, при котором полученный методом полимеризации ПОЗ обрабатывается кислотными или щелочными растворами, что приводит к удалению защитных групп и образованию л-ПЭИ. Особенно важно рассмотреть кислотный гидролиз, поскольку он не только эффективно удаляет защитные группы, но и позволяет целенаправленно регулировать молекулярные характеристики ПЭИ. Благодаря своей простоте и возможности оптимизации условий реакции этот метод становится все более востребованным в синтетической химии.

В следующей главе мы подробно рассмотрим кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина), его механизмы, условия проведения и влияние на характеристики конечного продукта, что подчеркивает его ключевую роль в получении функциональных полимеров.

Таблица 4. Основные различия между методами катионной полимеризации 2-оксазолинов, использованными Hu et al. (Hu et al., 2014) и Petit et al. (Petit et al., 2017)

Параметр	Hu et al., 2014	Petit et al., 2017
Инициатор полимеризации	Редкоземельные трифлаты	Ионная жидкость
Растворитель	Нуклеофильный органический (например, толуол)	Ионная жидкость
Температура полимеризации	100–140°C	80–140°C
Время реакции	4–24 ч	2–6 ч (при микроволновом нагреве – 1–2 ч) контроль
Контроль молекулярной массы	Высокий, узкий индекс полидисперсности	Высокий, точный
Выход полимера	≈ 80–85 %	≈ 90 %
Скорость реакции	Средняя	Быстрая, особенно под микроволнами
Оборудование	Традиционный реактор с термостатом	Микрофлюидный реактор
Основные преимущества	Простота, воспроизводимость	Быстрый контроль, низкая полидисперсность, меньшая вязкость системы
Ограничения	Необходимость высоких температур	Требуется специализированное микрофлюидное оборудование

Кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина). Кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина) обычно инициируется в присутствии сильных кислот, таких как HCl. Этот процесс характеризуется превращением амидных групп в этилениминовые звенья, что приводит к образованию л-ПЭИ. Hanneke M. L. Lambermont-Thijs и др. исследовали кинетику кислотного гидролиза ПМОЗ и ПОЗ, устанавливая линейную зависимость между степенью гидролиза и временем реакции (Lambermont-Thijs et al., 2010). Важным аспектом этого метода является возможность точного контроля над процессом, что позволяет регулировать свойства конечного продукта. Работа Halacheva, V. D. и др. демонстрирует успешный синтез линейных и комбинированных полимеров на основе полиэтиленимина и поли(2-этил-2-оксазолина). Полученные полимеры обладают уникальными свойствами в водных растворах, включая термочувствительность и возможность формирования различных морфологий агрегатов (Halacheva et al., 2011). Lutz Tauhardt и др. исследовали оптимизированный метод синтеза л-ПЭИ через кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина) с использованием микроволнового синтезатора. Авторы достигли высокой степени гидролиза и улучшенной чистоты конечного продукта (Tauhardt et al., 2011). Victor R. de la Rosa и др. предложили быстрый и надежный метод частичного гидролиза поли(2-этил-2-оксазолина) в линейные полиэтилениминовые сополимеры с возможностью контроля степени гидролиза (de la Rosa et al., 2014). Использование микроволнового излучения позволяет значительно сократить время реакции и повысить эффективность гидролиза без

риска разрушения полимерных цепей. Такой подход обеспечивает лучший контроль над степенью гидролиза и свойствами получаемого л-ПЭИ, что особенно важно для его дальнейшего использования в сложных технологических процессах. Maarten A. Mees и др. продемонстрировали, что контролируемый гидролиз позволяет получить полимеры с заданными свойствами, что имеет большое значение для разработки новых носителей для доставки генов и других биомолекул. В рамках этих исследований Mees совместно с Richard Hoogenboom провели кинетический анализ кислотного гидролиза поли(2-этил-2-оксазолина) для получения л-ПЭИ (Mees, 2017; Mees & Hoogenboom, 2018). В результате работы Ondrej Sedlacek и его коллег, был представлен метод получения л-ПЭИ через контролируемый кислотный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина) с последующей ациляцией (Sedlacek et al., 2018). Marius Bauer и др. получили л-ПЭИ путем полного кислотного гидролиза поли(2-оксазолинов), синтезированных методом катионной кольцевой полимеризации. Они описали синтез л-ПЭИ и частично гидролизованного поли(2-этил-2-оксазолина) как ключевой полимер для доставки генов (Bauer et al., 2018). Natalie E. Göppert и др. описали метод получения л-ПЭИ из поли(2-этил-2-оксазолина) через гидролиз, частичное окисление и реацилирование. Полученные полимеры продемонстрировали хорошую термическую стабильность и перспективы для применения в биомедицине (Göppert et al., 2020). Xiaoning Shan и др. описали синтез метакрилизованного поли(2-этил-2-оксазолина) и его оценку в качестве мукоадгезивного полимера для назальной доставки лекарств. Метод включает частичный гидролиз поли(2-этил-2-оксазолина) до получения л-ПЭИ, который затем модифицируется с помощью метакрилового ангидрида (Shan et al., 2020). В таблице представлены основные методы получения л-ПЭИ и их ключевые характеристики на основе рассмотренных исследований (таблица 5).

Таблица 5. Сравнение методов кислотного гидролиза ПОЗ

№	Метод гидролиза	Основные характеристики	Применение	Источники, год
1	Кислотный гидролиз (HCl)	Линейная зависимость степени гидролиза от времени	Контроль молекулярных характеристик	Lambermont-Thijs et al., 2010
2	Гидролиз + комбинирование с ПЭИ	Термочувствительность, агрегаты в водных растворах	Биоразлагаемые полимеры	Halacheva et al., 2011
3	Микроволновой кислотный гидролиз	Высокая чистота и скорость реакции	Биомедицинские приложения	Tauhardt et al., 2011
4	Частичный кислотный гидролиз	Контроль степени гидролиза, стабильность структуры	Контроль степени гидролиза, стабильность структуры	de la Rosa et al., 2014
5	Кислотный гидролиз с кинетическим анализом	Оптимизация гидролиза для доставки ДНК	Векторы для генной терапии	Mees et al., 2017
6	Гидролиз + ациляция	Модификация структуры для заданных свойств	Биоматериалы	Sedlacek et al., 2018
7	Полный кислотный гидролиз	Использование катионной полимеризацией азиридина, высокая эффективность трансфекции	Доставка генов	Bauer et al., 2018

8	Гидролиз + окисление	Биодеградируемые полимеры	Имплантаты, фармацевтика	Göppert et al., 2020
9	Частичный гидролиз + метакрилирование	Мукоадгезивные свойства	Назальная доставка лекарств	Shan et al., 2020

Представленные данные показывают, что кислотный гидролиз ПОЗ можно модифицировать для различных целей, включая контроль молекулярных характеристик, функционализацию полимеров и биомедицинские применения. В частности, использование микроволнового излучения позволяет ускорить реакцию, а частичный гидролиз дает возможность точно регулировать структуру полиаминов. Эти различия подчеркивают важность выбора метода гидролиза в зависимости от конечного применения материала.

Учитывая уникальные характеристики, полученные в результате синтеза л-ПЭИ, следующая глава будет посвящена его применениям. Мы рассмотрим различные области применения ПЭИ, включая системы доставки лекарств, биосенсоры и другие высокотехнологичные биомедицинские решения. Это исследование позволит углубить понимание функциональных возможностей ПЭИ и его роли в современных медицинских технологиях.

4. Применение линейного полиэтиленамина

Применение л-ПЭИ в современных технологиях и исследованиях представляет собой широкий аспект, охватывающий различные области.

Генная терапия и доставка лекарств. ПЭИ активно используется в качестве невирусного вектора для доставки генетического материала (Gosselin et al., 2001; Neuberg & Kichler, 2014). В клеточной линии НЕК293 эффективность трансфекции с использованием л-ПЭИ достигает 75–90 % (Huh et al., 2007), тогда как в первичных или менее восприимчивых клетках этот показатель снижается до 30–40 % (Maurisse et al., 2010). Различные модификации ПЭИ разрабатываются с целью повышения трансфекционной эффективности и снижения цитотоксичности (Socia et al., 2020). В последние годы внимание исследователей сосредоточено на создании многофункциональных ПЭИ-основанных систем доставки, обладающих улучшенной стабильностью, биосовместимостью и возможностью направленного действия (Hao et al., 2019). Coulembier O. и др. разработали сополимеры на основе линейного полиэтиленмина и полимолочной кислоты путём органокаталитической полимеризации. Синтезированные сополимерные структуры формировали наночастицы (~400 нм), способные инкапсулировать гидрофобные соединения и проникать в клетки. Благодаря наличию незамещённых аминогрупп, эти материалы рассматриваются как перспективные носители для доставки нуклеиновых кислот и лекарств в системах генной терапии и контролируемого высвобождения (Coulembier et al., 2014). А. А. Rosenkranz и А. S. Sobolev рассмотрели особенности создания и применения наночастиц-полиплексов на основе ПЭИ для доставки нуклеиновых кислот в клетки. Авторы подчеркнули высокую эффективность ПЭИ в качестве вектора для генной терапии, отметив его способность образовывать стабильные комплексы с ДНК и РНК, что обеспечивает защиту генетического материала от деградации и успешную трансфекцию клеток (Rosenkranz & Sobolev, 2015). Zakeri и др. рассмотрели образование полиплексов ПЭИ, их взаимодействие с клетками и механизмы трансфекции. Показано, что ПЭИ стабильно связывается с нуклеиновыми кислотами, защищая их от деградации и способствуя доставке в клетки. Однако токсичность ПЭИ ограничивает его клиническое применение, что требует разработки безопасных модификаций и комбинированных систем доставки (Zakeri et al., 2018). Yadav и Kumar создали линейный полиэтиленмин, модифицированный борновой кислотой, для доставки ДНК. Полученные комплексы лучше проникали в клетки и обеспечивали высокую эффективность трансфекции при низкой токсичности. Такие материалы считаются

перспективными для генной терапии благодаря улучшенному захвату и доставке ДНК (Yadav & Kumar, 2018). Priyam и др. разработали конъюгированные наночастицы на основе полиэтиленimina (ПЭИ) и полидопамина (PDA) для генной доставки (Priyam et al., 2017). Jiang и др. исследовали полиэтиленiminовый вектор для безопасной и эффективной доставки нуклеиновых кислот. Они отметили, что ПЭИ остаётся одним из перспективных невиальных векторов благодаря способности конденсировать ДНК и защищать её от деградации (Jiang et al., 2019). Dai Y. и Zhang X. разработали биоредуцируемый полиэтиленимин с дисульфидными связями для доставки микроРНК в клетки рака молочной железы. Полученные наночастицы легко разрушались внутри клетки, высвобождая активную РНК. Такая система показала высокую эффективность трансфекции, низкую токсичность и способность подавлять рост опухоли у мышей, что делает модифицированный полиэтиленимин перспективным невиальным вектором для генной терапии (Dai & Zhang, 2019). Zou и др. изучили наногели на основе ПЭИ и их потенциал в генной терапии. Они показали, что ПЭИ эффективно комплексирует с ДНК и РНК, формируя стабильные структуры, которые защищают генетический материал и способствуют его доставке в клетки (Zou et al., 2019). Casper и др. исследовали механизмы трансфекции с использованием ПЭИ и его производных. Они подтвердили, что ПЭИ остаётся одним из наиболее эффективных катионных полимеров для доставки генетического материала (Casper et al., 2023).

Очистка воды. ПЭИ применяется для удаления тяжелых металлов и органических загрязнений в процессах очистки воды. Сорбционная ёмкость ПЭИ-модифицированных материалов достигает 158 мг/г для Cu^{2+} , 139 мг/г для Zn^{2+} и до 161 мг/г для Pb^{2+} . Равновесие адсорбции устанавливается в течение 5–10 минут, а оптимальные условия сорбции наблюдаются при pH 5–7, при которых аминогруппы депротонированы и активно координируют катионы металлов (Pang et al., 2011; Khalaj et al., 2023). Goncharuk V. V. и др. исследовали эффективность модификации природного минерала монтмориллонита ПЭИ с целью удаления ионов тяжёлых металлов, таких, как Co(II) и Ni(II) , из водных растворов. Полученный композитный сорбент демонстрировал значительно более высокую сорбционную способность по сравнению с немодифицированным монтмориллонитом, особенно при нейтральном значении pH и в условиях высокой ионной силы раствора. Авторы отметили, что связывание ионов металлов происходит преимущественно за счёт аминогрупп ПЭИ, закреплённых на поверхности минерала. Такие модифицированные сорбенты показали перспективность применения для очистки средне- и высокоминерализованных сточных вод от тяжёлых металлов, что особенно актуально для промышленных выбросов (Goncharuk et al., 2010). Sun и др. разработали магнитные микросферы на основе ПЭИ и поливинилового спирта для удаления шестивалентного хрома (Cr(VI)) из водных растворов (Sun et al., 2015). Ma и др. разработали нанопроволочные сорбенты на основе ПЭИ для эффективного удаления хроматов и арсенатов из питьевой воды (Ma et al., 2016). Liu и др. разработали композитный гидрогель на основе полиэтиленimina (ПЭИ) и соевого белка (SPI) для селективного удаления ионов меди (Cu^{2+}) из сточных вод (Liu et al., 2017). Авторы использовали метод химического сшивания для создания пористого материала, обладающего высокой сорбционной способностью (Liu et al., 2018). Guo D.-M. и др. создали целлюлозный аэрогель, модифицированный ПЭИ, для удаления Cr(VI) из воды. Материал показал высокую сорбционную ёмкость (до 229,1 мг/г) и хорошо работал как в статических, так и в проточных условиях (Guo et al., 2017). Zeng и др. разработали новый композиционный сорбент на основе гиперразветвлённого ПЭИ и карбоксиметилхитозана для высокоэффективного удаления ионов ртути (Hg^{2+}) из водных растворов (Zeng et al., 2019). Bediako J. K. и др. разработали волокнистые сорбенты на основе полиэтиленimina и кальций-алгината для извлечения ионов золота (AuCl_4^-) из водных растворов. Волокна формировались методом ионной гелеобразной экструзии и стабилизировались с помощью глутаральдегида. Композит проявил высокую сорбционную ёмкость (более 2300 мг/г) за счёт электростатического взаимодействия аминогрупп ПЭИ с

анионами золота и восстановления Au^{3+} до элементарного золота. Материал сохранял эффективность после многократного использования, что подтверждает потенциал ПЭИ-содержащих волокон в технологиях очистки сточных вод и вторичной переработки драгоценных металлов (Bediako et al., 2020). Wong S. и др. показали, что кофейные отходы, модифицированные полиэтиленмином (ПЭИ), эффективно удаляют анионные красители из сточных вод. Благодаря положительно заряженным аминогруппам ПЭИ сорбент обеспечил высокую степень очистки, что делает его перспективным для очистки текстильных сбросов (Wong et al., 2020). Finny и др. разработали 3D-печатаемые гидрогели на основе полиэтиленмина для удаления тяжёлых металлов из водных растворов. Авторы предложили инновационный подход, используя биосовместимые чернила для 3D-печати, содержащие альгинат, желатин и ПЭИ. Было показано, что ПЭИ играет ключевую роль в стабилизации структуры гидрогеля и повышении его сорбционных свойств (Finny et al., 2022). Huang T. и др. создали сорбент на основе меламиновой пены, модифицированной ПЭИ, для удаления ионов Cr(VI) из сточных вод (Huang et al., 2022). Xanthopoulou M. и Katsoyiannis I. A. проанализировали эффективность модификации различных сорбентов ПЭИ для удаления тяжёлых металлов, в частности, хроматов и арсенатов, из загрязнённой водной среды. Авторы подчёркивают высокую перспективность применения ПЭИ-модифицированных материалов в системах очистки питьевых и сточных вод, особенно в регионах с повышенным содержанием шестивалентного хрома и арсена, где традиционные методы очистки демонстрируют ограниченную эффективность. Результаты обзора свидетельствуют о том, что введение ПЭИ значительно повышает сорбционную ёмкость материалов за счёт увеличения плотности активных аминогрупп и усиления электростатического взаимодействия с анионными формами металлов (Xanthopoulou & Katsoyiannis, 2023).

ПЭИ в антимикробных материалах. ПЭИ является перспективным компонентом для создания антимикробных материалов благодаря своей способности разрушать клеточные мембраны бактерий и предотвращать образование биоплёнок. Nuzhdina и др. разработали алкилированные и сшитые производные ПЭИ для создания антимикробных покрытий (Nuzhdina et al., 2017). Mayandi и др. исследовали л-ПЭИ как антимикробный агент (Mayandi et al., 2019). Pandey и др. представили антибактериальную поверхность на основе ПЭИ для медицинских устройств. Результаты исследования демонстрируют потенциал модификации ПЭИ для создания антибиотик-альтернативных биоматериалов, снижая зависимость от системных антибиотиков (Pandey et al., 2024). Xing и др. разработали долговечное антимикробное покрытие на основе ПЭИ и фитиновой кислоты для предотвращения загрязнения стоматологических водопроводов (Xing et al., 2024).

Недавние достижения в области материалов на основе ПЭИ подтверждают его значимость в биотехнологии, медицине, экологии и материаловедении. Благодаря высокой катионной плотности и способности к химической модификации, ПЭИ активно используется в генной терапии, системах доставки лекарств, антимикробных покрытиях, очистке воды, сорбционных материалах и биокатализе. Однако его высокая цитотоксичность и ограниченная биосовместимость остаются ключевыми вызовами, требующими дальнейшей оптимизации. Как отмечают Chen и др., современные исследования сосредоточены на разработке биоинспирированных и адаптивных ПЭИ-материалов, сочетающих высокую эффективность с улучшенными характеристиками безопасности. Инновационные подходы к модификации структуры, комбинированию с биосовместимыми полимерами и внедрению в многофункциональные наноматериалы открывают новые перспективы для его использования в медицине, фармацевтике, охране окружающей среды и промышленности (Chen et al., 2020).

Учитывая совокупность структурных и функциональных характеристик, ПЭИ продолжает удерживать позицию одного из наиболее востребованных материалов, а его дальнейшее развитие открывает перспективы для расширения сферы применения в инновационных технологиях.

5. Заключение

Полиэтиленминин представляет собой многофункциональный полимер, обладающий высоким потенциалом для применения в биотехнологиях, медицине, фармацевтике и экологических технологиях. Его уникальные физико-химические свойства, такие, как высокая растворимость, способность к комплексообразованию и термическая стабильность, делают его важным компонентом для генной терапии, очистки воды, антимикробных покрытий и сорбционных материалов.

Несмотря на многочисленные преимущества, основными ограничениями ПЭИ остаются его высокая цитотоксичность и ограниченная биосовместимость. В этой связи продолжаются исследования, направленные на разработку биосовместимых модификаций, улучшение структуры полимера и снижение его негативного воздействия на клетки. Современные подходы к химической модификации, комбинированию с другими полимерами и созданию адаптивных наноматериалов открывают новые возможности для его безопасного и эффективного использования.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация - А.Г.; методология - С.З.; курирование данных - С.З., Ж.Г.; написание - подготовка оригинального черновика - Н.Т, М.Ж., написание - рецензирование и редактирование - А.Г. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах

Нурлыбаева, Томирис – магистрант, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, пр. Алии Молдагуловой, 34, Актобе, Казахстан, 030000; diable.samaaa@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-8190-3888>

Абилова, Гузель – PhD, доцент кафедры, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, пр. Алии Молдагуловой, 34, Актобе, Казахстан, 030000; guzelab82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0028-4598>

Махамбетова, Жанагуль – магистр, старший преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, пр. Алии Молдагуловой, 34, Актобе, Казахстан, 030000; mahambetova25@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7836-3426>;

Султамуратова, Задагул – к.х.н., доцент кафедры, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, пр. Алии Молдагуловой, 34, Актобе, Казахстан, 030000; zadasb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3052-9338>;

Жакупова, Гулмира – старший преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, пр. Алии Молдагуловой, 34, Актобе, Казахстан, 030000; gulmira.zhakupova80@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3055-4464>.

9. Финансирование. Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по проекту № BR24992882.

10. Благодарности. Обзор написан в рамках диссертационной работы магистранта Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова Нурлыбаевой Т. на тему: «Гидрогели на основе продуктов гидролиза поли(2-этил-2-оксазолина)».

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

12. Список литературы

1. Barros, J., Dias, A., Rodrigues, M. A., Pina-Vaz, C., Lopes, M. A., & Pina-Vaz, I. (2015). Antibiofilm and antimicrobial activity of polyethylenimine: An interesting compound for endodontic treatment. *Journal of Contemporary Dental Practice*, 16(6), 427–432. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-1701>
2. Bauer, M., Tauhardt, L., Lambermont-Thijs, H. M. L., Kempe, K., Hoogenboom, R., Schubert, U. S., & Fischer, D. (2018). Rethinking the impact of protonable amine density on cationic polymers for gene delivery. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 128, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2018.10.003>
3. Bediako, J. K., Lin, S., Sarkar, A. K., Zhao, Y., Choi, J.-W., Song, M.-H., Wei, W., Reddy, D. H. K., Cho, C.-W., & Yun, Y.-S. (2020). Benignly-fabricated crosslinked polyethylenimine/calcium-alginate fibers as high-performance adsorbents for effective recovery of gold. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119389>
4. Boussif, O., Lezoualc'h, F., Zanta, M. A., Djavaheri Mergny, M., Scherman, D., Demeneix, B., & Behr, J. P. (1995). A versatile vector for gene and oligonucleotide transfer into cells in culture and in vivo: Polyethylenimine. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92(16), 7297–7301.
5. Casper, J., Schenk, S. H., Parhizkar, E., Detampel, P., Dehshahri, A., & Huwyler, J. (2023). Polyethylenimine (PEI) in gene therapy: Current status and clinical applications. *Journal of Controlled Release*, 362, 667–691. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2023.09.001>
6. Chen, Z., Lv, Z., Sun, Y., Chi, Z., & Qing, G. (2020). Recent advancements in polyethyleneimine-based materials and their biomedical, biotechnology, and biomaterial applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 8(15), 2951–2973. <https://doi.org/10.1039/C9TB02271F>
7. Coulembier, O., Moins, S., Maji, S., Zhang, Z., De Geest, B. G., Dubois, P., & Hoogenboom, R. (2014). Linear polyethyleneimine as (multi)functional initiator for organocatalytic L-lactide polymerization. *Journal of Materials Chemistry B*. Advance Article. <https://doi.org/10.1039/C4TB01387E>
8. Dai, Y., & Zhang, X. (2019). MicroRNA delivery with bio-reducible polyethylenimine as a non-viral vector for breast cancer gene therapy. *Macromolecular Bioscience*, 19(4), 1800445. <https://doi.org/10.1002/mabi.201800445>
9. de la Rosa, V. R., Bauwens, E., Monnery, B. D., De Geest, B. G., & Hoogenboom, R. (2014). Fast and accurate partial hydrolysis of poly(2-ethyl-2-oxazoline) into tailored linear polyethylenimine copolymers. *Polymer Chemistry*, 5(17), 4957–4964. <https://doi.org/10.1039/c4py00355a>
10. Finny, A. S., Cheng, N., Popoola, O., & Andreescu, S. (2022). 3D printable polyethyleneimine-based hydrogel adsorbents for heavy metal ions removal. *Environmental Science: Advances*, 1, 443–455. <https://doi.org/10.1039/d2va00064d>
11. Gleede, T., Reisman, L., Rieger, E., Mbarushimana, P. C., Rupar, P. A., & Wurm, F. R. (2019). Aziridines and azetidines: Building blocks for polyamines by anionic and cationic ring-opening polymerization. *Polymer Chemistry*, 10, 3257–3283.
12. Goncharuk, V. V., Puzyrnaya, L. N., Pshinko, G. N., Bogolepov, A. A., & Demchenko, V. Ya. (2010). The removal of heavy metals from aqueous solutions by montmorillonite modified with polyethylenimine. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 32(2), 67–72. <https://doi.org/10.3103/S1063455X10020013>
13. Gosselin, M. A., Guo, W., & Lee, R. J. (2001). Efficient gene transfer using reversibly cross-linked low molecular weight polyethylenimine. *Bioconjugate Chemistry*, 12(6), 989–994. <https://doi.org/10.1021/bc0100455>

14. Göppert, N. E., Kleinstaub, M., Weber, C., & Schubert, U. S. (2020). Degradable poly(2-oxazoline) analogues from partially oxidized poly(ethylene imine). *Macromolecular Rapid Communications*, 41(11), 1900615. <https://doi.org/10.1002/marc.201900615>
15. Guo, D.-M., An, Q.-D., Xiao, Z.-Y., Zhai, S.-R., & Shi, Z. (2017). Polyethylenimine-functionalized cellulose aerogel beads for efficient dynamic removal of chromium(VI) from aqueous solution. *RSC Advances*, 7, 54039–54052. <https://doi.org/10.1039/c7ra09940a>
16. Halacheva, S., Madsen, J., Ladmira, V., Haddleton, D. M., & Howdle, S. M. (2011). Thermoresponsive behavior and self-assembly of linear poly(ethylene imine)-poly(2-ethyl-2-oxazoline) comb block copolymers. *Macromolecules*, 44(19), 7567–7574. <https://doi.org/10.1021/ma201461e>
17. Hao, F., Li, Y., Zhu, J., Sun, J., Marshall, B., Lee, R. J., Teng, L., Yang, Z., & Xie, J. (2019). Polyethylenimine-based formulations for delivery of oligonucleotides. *Current Medicinal Chemistry*, 26(13), 2264–2284. <https://doi.org/10.2174/0929867325666181031094759>
18. Hu, F., Li, Z., Xia, Y., Li, S., & Wu, C. (2014). Rare-earth triflate-initiated cationic ring-opening polymerization of 2-oxazolines: Synthesis of linear polyethyleneimine with controlled properties. *Journal of Polymer Science*, 52(6), 1047–1059. <https://doi.org/10.1039/C4RA11404C>
19. Huang, T., Cao, S., Luo, D., Zhang, N., Lei, Y.-Z., & Wang, Y. (2022). Polydopamine-assisted polyethylenimine grafting melamine foam and the application in wastewater purification. *Chemosphere*, 287, 132054. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132054>
20. Huh, S.-H., Do, H.-J., Lim, H.-Y., Kim, D.-K., Choi, S.-J., Song, H., Kim, N.-H., Park, J.-K., Chang, W.-K., Chung, H.-M., & Kim, J.-H. (2007). Optimization of 25 kDa linear polyethylenimine for efficient gene delivery. *Biologicals*, 35(3), 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.biologicals.2006.08.004>
21. Jiang, C., Chen, J., Li, Z., Wang, Z., Zhang, W., & Liu, J. (2019). Recent advances in the development of polyethylenimine-based gene vectors for safe and efficient gene delivery. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 16, 1–15. <https://doi.org/10.1080/17425247.2019.1604681>
22. Khalaj, M., Khatami, S.-M., Kalhor, M., Zarandi, M., Anthony, E. T., & Klein, A. (2023). Polyethylenimine grafted onto nano-NiFe₂O₄@SiO₂ for the removal of CrO₄²⁻, Ni²⁺, and Pb²⁺ ions from aqueous solutions. *Molecules*, 29(1), 125. <https://doi.org/10.3390/molecules29010125>
23. Lambermont-Thijs, H. M. L., van der Woerd, F. S., Baumgaertel, A., Bonami, L., Du Prez, F. E., Schubert, U. S., & Hoogenboom, R. (2010). Linear poly(ethylene imine)s by acidic hydrolysis of poly(2-oxazoline)s: Kinetic screening, thermal properties, and temperature-induced solubility transitions. *Macromolecules*, 43(2), 927–933. <https://doi.org/10.1021/ma9020455>
24. Liu, J., Su, D., Yao, J., Huang, Y., Shao, Z., & Chen, X. (2017). Soy protein-based polyethylenimine hydrogel and its high selectivity for copper ions removal in wastewater treatment. *Journal of Materials Chemistry A*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1039/C6TA10814H>
25. Liu, M., Li, J., & Li, B. (2018). Mannose-modified polyethylenimine: A specific and effective antibacterial agent against *Escherichia coli*. *Langmuir*, 34(5), 1574–1580. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b03556>
26. Ma, Y., Zhang, B., Ma, H., Yu, M., Li, L., & Li, J. (2016). Electrospun nanofibrous polyethylenimine mat: A potential adsorbent for the removal of chromate and arsenate from drinking water. *RSC Advances*, 6, 30739–30746. <https://doi.org/10.1039/c5ra26973c>
27. Maurisse, R., De Semir, D., Eamekhoo, H., Bedayat, B., Abdolmohammadi, A., Parsi, H., & Gruenert, D. C. (2010). Comparative transfection of DNA into primary and transformed mammalian cells from different lineages. *BMC Biotechnology*, 10, 9. <https://doi.org/10.1186/1472-6750-10-9>

28. Mayandi, V., Sridhar, S., Fazil, M. H. U. T., Goh, E. T. L., Htton, H. M., Orive, G., Choong, Y.K., Saravanan R., Beuerman, R. W., Barkham, T., Yang, L., Baskaran, M., Jhanji, V., Loh, X. J., Verma, N. K., & Lakshminarayanan, R. (2019). Protective action of linear polyethylenimine against *Staphylococcus aureus* colonization and exaggerated inflammation. *ACS Infectious Diseases*, 5(8), 1411–1420. <https://doi.org/10.1021/acsinfecdis.9b00102>
29. Mees, M. A. (2017). Poly(2-alkyl-2-oxazoline)s and poly(ethylene imine): How one thing led to the other [Doctoral dissertation, Ghent University, Belgium]. Ghent University Academic Bibliography. <https://biblio.ugent.be/publication/8516651>
30. Mees, M. A., & Hoogenboom, R. (2018). Full and partial hydrolysis of poly(2-oxazoline)s and subsequent post-polymerization modification. *Polymer Chemistry*, 9, 4957–4964. <https://doi.org/10.1039/C8PY00978C>
31. Neuberg, P., & Kichler, A. (2014). Recent developments in nucleic acid delivery with polyethylenimines. In T. Friedmann (Ed.), *Advances in Genetics* (Vol. 88, pp. 263–284). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800148-6.00009-2>
32. Nuzhdina, A. V., Morozov, A. S., Kopitsyna, M. N., Strukova, E. N., Shlykova, D. S., Bessonov, I. V., & Lobakova, E. S. (2017). Simple and versatile method for creation of non-leaching antimicrobial surfaces based on cross-linked alkylated polyethyleneimine derivatives. *Materials Science and Engineering: C*, 70, 788–795. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.09.033>
33. Pandey, R., Pinon, V., Garren, M., Maffe, P., Mondal, A., Brisbois, E. J., & Handa, H. (2024). N-acetyl cysteine-decorated nitric oxide-releasing interface for biomedical applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16, 24248–24260. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c02369>
34. Pang, Y., Zeng, G., Tang, L., Zhang, Y., Liu, Y., Lei, X., Li, Z., Zhang, J., & Xie, G. (2011). PEI-grafted magnetic porous powder for highly effective adsorption of heavy metal ions. *Desalination*, 281(1), 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.001>
35. Petit, C., Grassl, B., Mignard, E., Luef, K. P., Wiesbrock, F., & Reynaud, S. (2017). Cationic ring-opening polymerization of 2-oxazolines in ionic liquids and microfluidic reactors for fast and controlled polymerization. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 218(16), 1700253. <https://doi.org/10.1039/C7PY01255A>
36. Priyam, A., Nagar, P., Sharma, A. K., & Kumar, P. (2017). Mussel-inspired polydopamine-polyethylenimine conjugated nanoparticles as efficient gene delivery vectors for mammalian cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.10.063>
37. Rosenkranz, A. A., & Sobolev, A. S. (2015). Polyethylenimine-based polyplex nanoparticles and features of their behavior in cells and tissues. *Russian Chemical Bulletin, International Edition*, 64(12), 2749–2755.
38. Rupa, P. A., Reisman, L., & Mbarushimana, P. C. (2017). Synthesis of linear polyethyleneimine by living anionic polymerization (U.S. Patent Application No. US20170204224A1). U.S. Patent and Trademark Office.
39. Sedlacek, O., Janoušková, O., Verbraeken, B., & Hoogenboom, R. (2018). Superhydrophilic poly(2-oxazoline)s via acylation of polyethylenimine. *Biomacromolecules*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.8b01366>
40. Shan, X., Williams, A. C., & Khutoryanskiy, V. V. (2020). Polymer structure and property effects on solid dispersions with haloperidol: Poly(N-vinyl pyrrolidone) and poly(2-oxazolines) studies. *International Journal of Pharmaceutics*, 590, 119884. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119884>
41. Socia, A., Liu, Y., Zhao, Y., Abend, A., & Wuelfing, W. P. (2020). Development of an ultra-high-performance liquid chromatography-charged aerosol detection/UV method for the quantitation of linear polyethylenimines in oligonucleotide polyplexes. *Journal of Separation Science*, 43(24), 4421–4429. <https://doi.org/10.1002/jssc.202000414>

42. Sun, X., Yang, L., Li, Q., Liu, Z., Dong, T., & Liu, H. (2015). Polyethylenimine-functionalized poly(vinyl alcohol) magnetic microspheres as a novel adsorbent for rapid removal of Cr(VI) from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 262, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.045>
43. Tanaka, R., Ueoka, I., Takaki, Y., Kataoka, K., & Saito, S. (1983). High molecular weight linear poly(ethyleneimine) and poly(N-methylethylenimine). *Macromolecules*, 16(6), 849–853.
44. Tauhardt, L., Kempe, K., Knop, K., Altuntaş, E., Jäger, M., Schubert, S., Fischer, D., & Schubert, U. S. (2011). Linear polyethyleneimine: Optimized synthesis and characterization - on the way to pharma-grade batches. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 212(19), 1918–1924. <https://doi.org/10.1002/macp.201100190>
45. Weyts, K. R., & Goethals, E. J. (1988). New synthesis of linear polyethyleneimine. *Polymer Bulletin*, 19(1), 13–19.
46. Wong, S., Abd Ghafar, N., Ngadi, N., Razmi, F. A., Inuwa, I. M., Mat, R., & Saidina Amin, N. A. (2020). Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. *Scientific Reports*, 10, 2928. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60021-6>
47. Xanthopoulou, M., & Katsoyiannis, I. A. (2023). Enhanced adsorption of chromate and arsenate ions from contaminated water with emphasis on polyethyleneimine modified materials: A review. *Separations*, 10, 441. <https://doi.org/10.3390/separations10080441>
48. Xing, M., Zhang, H., Li, Z., Zhang, L., & Qian, W. (2024). Long-lasting renewable antibacterial N-halamine coating enable dental unit waterlines to prevention and control of contamination of dental treatment water. *Frontiers in Materials*, 11, 1399597. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1399597>
49. Yadav, S., & Kumar, P. (2018). Enhanced uptake of plasmid at boronic acid decorated linear polyethylenimines results in higher transfection efficiency. *Biointerphases*, 13(6), 061003. <https://doi.org/10.1116/1.5054930>
50. Yu, B., Zhang, Y., Zheng, W., Fan, C., & Chen, T. (2022). Polyethyleneimine-based drug delivery systems for cancer theranostics. *ACS Macro Letters*, 11(8), 1043–1056. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.2c01308>
51. Zakeri, A., Kouhbanani, M. A. J., Beheshtkhoo, N., Beigi, V., Mousavi, S. M., Hashemi, S. A. R., Zade, A. K., Amani, A. M., Savardashtaki, A., Mirzaei, E., Jahandideh, S., & Movahedpour, A. (2018). Polyethyleneimine-based nanocarriers in co-delivery of drug and gene: A developing horizon. *Nano Reviews & Experiments*, 9(1), 1488497. <https://doi.org/10.1080/20022727.2018.1488497>
52. Zeng, H., Wang, L., Zhang, D., Yan, P., Nie, J., Sharma, V. K., & Wang, C. (2019). Highly efficient and selective removal of mercury ions using hyperbranched polyethyleneimine functionalized carboxymethyl chitosan composite adsorbent. *Chemical Engineering Journal*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.001>
53. Zhuk, D. S., Gembitskii, P. A., & Kargin, V. A. (1965). Advances in the chemistry of polyethyleneimine (polyaziridine). *Russian Chemical Reviews*, 34(7), 515–525.
54. Zou, Y., Li, D., Shen, M., & Shi, X. (2019). Polyethyleneimine-based nanogels for biomedical applications. *Macromolecular Bioscience*, 19(9), 1900272. <https://doi.org/10.1002/mabi.201900272>
55. von Zelewsky, A., Barbosa, L., & Schlöpfer, C.-W. (1993). Poly(ethylenimines) as Brønsted bases and as ligands for metal ions. *Coordination Chemistry Reviews*, 123, 229–246.

Көпфункционалды полиэтиленамин: физика-химиялық қасиеттері және қазіргі қолдану салалары

Томирис Нурлыбаева, Гузель Абилова, Жанагул Махамбетова, Задагул Сұлтамұратова, Гүлмира Жакупова

Аңдатпа. Полиэтиленимин (ПЭИ) – амин топтарының жоғары тығыздығына ие синтетикалық полимер, бұл оның ерекше физика-химиялық қасиеттерін және құрылымдық түрлендіру мүмкіндігін анықтайды. Жоғары реакциялық қабілеттілігі, термиялық тұрақтылығы мен кешен түзу қасиеттерінің үйлесуі ПЭИ-ді қазіргі материалтанудағы ең көпқырлы полимерлердің бірі етеді. Бұл шолуда сызықтық және тармақталған ПЭИ-ді алу әдістері жүйеленіп берілген, олардың ішінде азиридиннің аниондық полимерленуі, 2-оксазолиндердің катиондық полимерленуі және поли(2-этил-2-оксазолиннің) қышқылдық гидролизі қарастырылған. Синтез әдісінің молекулалық архитектураға, полидисперстілікке және функционалды топтардың таралуына әсері талданған, себебі бұл факторлар полимердің еру қабілетін, құрылымдық тұрақтылығын және конформациялық қасиеттерін айқындайды.

ПЭИ-дің негізгі физика-химиялық сипаттамаларына ерекше көңіл бөлінген: металл иондарымен координациялық кешендер түзу қабілеті, термиялық және химиялық тұрақтылығы, сондай-ақ рН-қа тәуелді қасиеттері. ПЭИ-дің гендік терапияда және дәрілік заттарды жеткізу жүйелерінде қолданылуы талданған, мұнда оның катиондық табиғаты нуклеин қышқылдарымен тиімді байланысу мен тасымалдануды қамтамасыз етеді. Сондай-ақ ПЭИ-дің ауыр металдар мен органикалық ластаушыларды кетіруде тиімді сорбент ретіндегі рөлі және биомедициналық жабындар құрамында антимикробтық әсері көрсетілген.

Сонымен қатар, ПЭИ-дің биосәйкестілігін арттыру және цитоуыттылығын төмендету бағытындағы химиялық модификациялау, композиттер түзу және табиғи биополимерлермен функционалдандыру стратегиялары қарастырылған. Жинақталған деректер полиэтилениминнің құрылымдық икемділігі мен функционалдық бейімделгіштігі жоғары, келешегі зор көпфункционалды материал екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: тармақталған полиэтиленимин (b-PEI), сызықтық полиэтиленимин (l-PEI), поли (2-этил-2-оксазолин), қышқыл гидролиз, анионды полимерлеу, катионды полимерлеу.

Multifunctional polyethyleneimine: physicochemical properties and modern applications

Tomiris Nurlibayeva, Guzel Abilova, Zhanagul Makhambetova, Zadagul Sultamuratova, Gulmira Zhakupova

Abstract: Polyethylenimine (PEI) is a synthetic polymer characterized by a high density of amino groups, which determines its distinct physicochemical properties and wide potential for structural modification. Due to its combination of high reactivity, thermal stability, and complexation ability, PEI is considered one of the most versatile polymers of modern materials science. This review systematizes current knowledge on the synthesis of linear and branched PEI, including anionic polymerization of aziridine, cationic polymerization of 2-oxazolines, and acid hydrolysis of poly(2-ethyl-2-oxazoline). The influence of the synthesis route on the molecular architecture, polydispersity, and distribution of functional groups is analyzed, as these factors determine the solubility, structural stability, and conformational behavior of the polymer.

Particular attention is given to the key physicochemical characteristics of PEI, such as its ability to form coordination complexes with metal ions, resistance to thermal and chemical degradation, and pH-dependent properties in aqueous systems. The review summarizes recent research on the use of PEI in gene therapy and drug delivery systems, where its cationic nature ensures efficient binding and transport of nucleic acids. The effectiveness of PEI as a sorbent for the removal of heavy metals

and organic pollutants in water treatment processes is discussed, along with its antimicrobial potential in protective coatings and biomedical materials.

Finally, the review highlights promising strategies for improving the biocompatibility and reducing the cytotoxicity of PEI through chemical modification, composite formation, and functionalization with natural biopolymers. The summarized findings demonstrate that polyethylenimine is a multifunctional next-generation material combining structural flexibility, high adaptability, and broad potential for applications in medicine, pharmaceuticals, environmental technologies, and materials science.

Keywords: branched polyethylenimine (b-PEI), linear polyethylenimine (l-PEI), poly(2-ethyl-2-oxazoline), acid hydrolysis, anionic polymerization, cationic polymerization.

Анализ динамики пожаров в Наурзумском природном заповеднике и прилегающих территориях с использованием спутниковых данных

Татьяна Брагина^{1,2}, Гульжиян Кабдулова^{3*}, Даникер Чепашев⁴, Гульсезим Жусупова⁵,
Арсен Шингужинов⁶, Руслан Жилкибаев⁷, Елизавета Максимкина⁸

¹Костанайский региональный университет имени Ахмета Байтурсынулы, Костанай, Казахстан; e-mail: tm_bragina@mail.ru

²Азово-Черноморский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: braginatm@azniir.kh.vniro.ru

^{3,4,5,6,7,8}ТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан;

g.a.kabdulova@gmail.com, d.chepashev@ionos.kz,

zhussupova@ionos.kz, a.shinguzhinov@ionos.kz,

zhilkiabayev@ionos.kz, maximkina.y@ionos.kz

*Корреспонденция: g.a.kabdulova@gmail.com

Цитирование: Брагина, Т., Кабдулова Г., Чепашев Д., Жусупова Г., Шингужинов А., Жилкибаев Р., Байтелиева, А. (2025). Долгосрочный анализ динамики пожаров (2000-2025 гг.) в Наурзумском природном заповеднике и на прилегающих землях (Костанайская область, Казахстан) с помощью спутникового зондирования. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География, 153(4), 74-90. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-74-90>

Академический редактор:
Н.Е. Рамазанова

Поступила: 04.12.2025
Исправлена: 16.12.2025
Принята: 18.12.2025
Опубликована: 24.12.2025



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

Аннотация. Пожары являются одним из мощных факторов краткосрочного и долгосрочного изменения экосистем, в том числе на особо охраняемых природных территориях. Число и интенсивность пожаров значительно возросли под влиянием освоения человеком земель, изменений климата, социально-экономического состояния населения.

Основная цель данных исследований заключалась в долгосрочном анализе (2000–2025 гг.) частоты возгораний и площадей пожаров в пределах границ Наурзумского государственного природного заповедника (2000–2025) и на прилегающих к заповеднику землях.

Особое значение данному исследованию придает высокий статус Наурзумского государственного природного заповедника как части объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО «Сарыарка – Степи и Озера Северного Казахстана (UNESCO World Heritage Site «Saryarka – Steppe and Lakes of Northern Kazakhstan»)). Для выполнения работ использовались современные технологии анализа спутниковых снимков в базах данных Landsat 8 и Sentinel-2. Учитывались термальные точки, даты наблюдений, площади пожаров.

Впервые было показано, что за период с 2000 по 2025 гг. произошло 29 пожаров, суммарная площадь возгораний составила 833 589 га, из них в пределах границ заповедника 236 300 га.

Для минимизации последствий пожаров предлагаются профилактические меры через постоянный контроль и мониторинг состояния ценных объектов природного наследия с использованием современных технологий дистанционного зондирования Земли. Результатами исследований стали количество и площади выгоревших территорий, влияющих на биоразнообразие заповедника за длительный период времени.

Ключевые слова: дистанционное зондирование; спутниковые исследования; пожары; Наурзумский заповедник; прилегающие территории; Костанайская область.

1. Введение

Объектом исследования являются выгоревшие территории Наурзумского государственного природного заповедника (далее Наурзумский ГПЗ) и прилегающие земли (Костанайская область, Казахстан). Наурзумский заповедник расположен в зоне сухих степей (типчак-ковыльных). Благодаря разнообразию почв по механическому составу на сравнительно небольшой территории можно обнаружить ассоциации, относящиеся к нескольким формациям степной растительности. Сообщества степного типа занимают участки западного и восточного плато, его склоны, террасовидные равнины по бортам Тургайской ложбины, встречаются в виде фрагментов в комплексной растительности на днище Тургайской ложбины. Плакорные местообитания в классическом смысле на территории заповедника представлены узкой полосой степей вдоль склона западного плато Терсек-Карагай (Naurzumsky Zapovednik). (2016).

Наурзумский ГПЗ был создан в 1931 году и является одним из старейших заповедников Казахстана. Географически его территория находится в Северо-Тургайской физико-географической провинции степной зоны Евразии, в подзоне сухих дерновинно-злаковых степей на темно-каштановых почвах (географические координаты 51°29' с. ш. 64°18' в. д.). Общая площадь заповедника в современных границах 191 381 га. Территория заповедника расположена в центральной части Тургайской ложбины, соединяющей Западно-Сибирскую низменность с Туранской низменностью, где по засоленным почвам на север продвигаются южные флористические и фаунистические элементы, а в лесах присутствуют бореальные виды. На 63% общей площади заповедника (после расширения и обустройства новых границ в 2004 г. (Bragina, 2009, 2021) занимают степные экосистемы, на 21% территории расположены системы пресных и соленых озер, на 16% произрастают сосновые и осиново-березовые леса. Климат резко континентальный, с жарким летом (средняя температура июля +24,2 °С с абсолютным максимумом +41,6 °С) и холодной малоснежной зимой (средняя температура января минус 17-18 °С, абсолютный минимум - 45,7 °С). Продолжительность солнечного сияния более 2000 часов в год. Среднегодовая сумма осадков 233 мм. Летом часты засухи и суховеи, влажность воздуха опускается до 30 % на месяц и более, что способствует возникновению и распространению пожаров. Особое значение данному исследованию придает высокий статус Наурзумского ГПЗ как части первого в Казахстане и странах Центральной Азии объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО «Сарыарка – Степи и Озера Северного Казахстана».

В эволюционном отношении пожары являются природным фактором и возникают под влиянием различных причин (He et al., 2019; Keeley et al., 2022; Sayedi et al., 2024; Kamp et al., 2025). В степных экосистемах они могут иметь положительные аспекты, так как разрушают накопившиеся растительные остатки, возвращая минеральные вещества в почву; способствуют поддержанию разнообразия некоторых видов, например, через улучшение условий прорастания семян и питания растений, и выступают как драйверы естественных изменений экосистем и поддержания их природного разнообразия (Leys et al., 2018; Galaktionova et al., 2019; Alvarez et al., 2022). Но в большинстве случаев пожары – это серьезная проблема, которая требует особого внимания со стороны государств и населения. Пожары приводят к разрушению почвенно-растительного покрова, мест обитания дикой флоры и фауны, снижению численности популяций многих видов, приводя их к состоянию уязвимости или исчезновению, изменяют экологические процессы и связи (Kamp et al., 2016; Rachkovskaya et al., 2012; Bragina et al., 2018; Duane et al., 2021; Jolly et al., 2022). В ряде случаев потери могут быть невозполнимыми.

Возгорания происходят под влиянием различных причин, среди которых можно выделить накопление запасов растительной мортмассы (ветоши), сухие грозы, шквалистый ветер, потепление климата и другие (2020; Jones et al., 2022; Shi et al., 2022). Хозяйственное освоение природных территорий вызвало перестройку почвенно-растительных условий,

гидрологического режима, структуры и функции экосистем, привело к деградации обширных территорий, в том числе вследствие обширных и повторяющихся пожаров по вине человека (Pavleychik et al., 2022). Кроме того, пожары приводят к значительному экономическому ущербу, загрязнению атмосферы (угарный газ, оксиды азота и др.) и способствуют выделению углекислого газа, усиливая парниковый эффект, что, в свою очередь, отрицательно влияет на окружающую среду и сохранение биологического разнообразия.

Ключевую роль в сохранении биоразнообразия играют особо охраняемые природные территории (ООПТ). Но и они испытывают значительный пресс от деятельности человека и природных пожаров. В то же время количественной оценки числа пожаров и выгоревших площадей на территории ООПТ сравнительно немного (Resco de Dios et al., 2025). Данные ДЗЗ широко используются в Казахстане с 2018 года для мониторинга выгоревших территорий (Kabdulova et al., 2019).

Цель исследования - ретроспективный анализ пожаров на территории Наурзумского государственного природного заповедника и на прилегающих к нему территорий за последнюю четверть века объективными методами дистанционного зондирования Земли. В задачи работы входил анализ частоты и площадей пожаров в период 2000-2025 гг. с фиксацией термальных точек и дат наблюдений.

Результатами исследования является картирование территорий заповедника с использованием термальных точек по данным ДЗЗ как основы получения достоверной и детальной информации о выгоревших площадях за многолетний период наблюдения.

Впервые в Костанайской области на территории ООПТ были использованы дистанционные методы для выявления, анализа и создания разновременных карт с целью изучения частоты, интенсивности и динамики выгоревших территорий за последние десятилетия (2000-2025 гг.).

2. Материалы и методы

В работе использованы дистанционные методы исследования: спутниковые данные.

Для выявления пожаров за многолетний период были использованы данные спутникового мониторинга. Термальные точки (термоточки) за 25 летний период (с 2000-2025 гг.) были получены из системы NASA FIRMS (Fire Information for Resource Management System) на территорию Наурзумского ГПЗ. NASA FIRMS предоставляет координаты тепловых аномалий, зафиксированных сенсорами MODIS и VIIRS. Эти данные использовались как первичный индикатор возможных возгораний, а также как дополнительный слой проверки для временной и пространственной локализации пожаров. По термоточкам определяют время и место пожара.

Дополнительно были загружены спутниковые снимки из облачной платформы Sentinel Hub за каждый анализируемый год, а именно проведен анализ с 2000 по 2025 гг. Основой служила облачная платформа Sentinel Hub, которая содержит снимки Landsat (серии 7, 8-9), а также Sentinel-2 для более поздних лет. Все изображения прошли стандартную предварительную обработку: приведение к единому пространственному разрешению и проекции. После подготовки данных для каждого года были рассчитаны спектральные показатели, необходимые для выделения сгоревших участков.

Ключевым инструментом оценки ущерба стал индекс NBR (Normalized Burn Ratio), рассчитанный для каждого снимка. Для выявления территорий, пострадавших от пожара, наиболее эффективно использовать индекс NBR-RAW. Он формируется на основе каналов 8 и 12 для Sentinel-2 и позволяет уверенно выделять крупные выгоревшие участки. Для оценки степени пожарного воздействия вычисляют разницу между значениями NBR до пожара и после него (Kabdulova et al., 20120). При таком подходе более темные пиксели на финальном изображении соответствуют наиболее сильно выгоревшим зонам. На основе NBR были

сформированы карты dNBR - разницы значений индекса до и после пожара. Это позволило выявлять факты выгорания и степень интенсивности повреждения растительности.

NBR индекс для оценки выгоревших участков:

$$\text{Sentinel-2: NBR} = (B8 - B12) / (B8 + B12) \quad (1)$$

$$\text{Landsat 8/9: NBR} = (B5 - B7) / (B5 + B7) \quad (2)$$

$$\text{Landsat 7: NBR} = (B4 - B7) / (B4 + B7) \quad (3)$$

Для оцифровки векторных полигонов границ пожаров по снимкам NBR была создана персональная база данных в программном обеспечении ESRI ArcMap, где было проанализировано около 30 пожаров за 2000-2025 гг. Определяется площадь пожара по полигонам пожаров.

Термоточки интегрируют в базу данных как вспомогательный слой: проверки, что пожар действительно был на этой территории; уточнения дат; подтверждения, что изменения NBR связаны именно с огнём, а не, например, с сезонными колебаниями.

Для получения значений высот, на которых происходил пожар чаще или реже всего, была использована цифровая модель рельефа Copernicus GLO-30 DEM на эллипсоидной высоте. На рисунке 1 показана Copernicus DEM и границы пожаров.

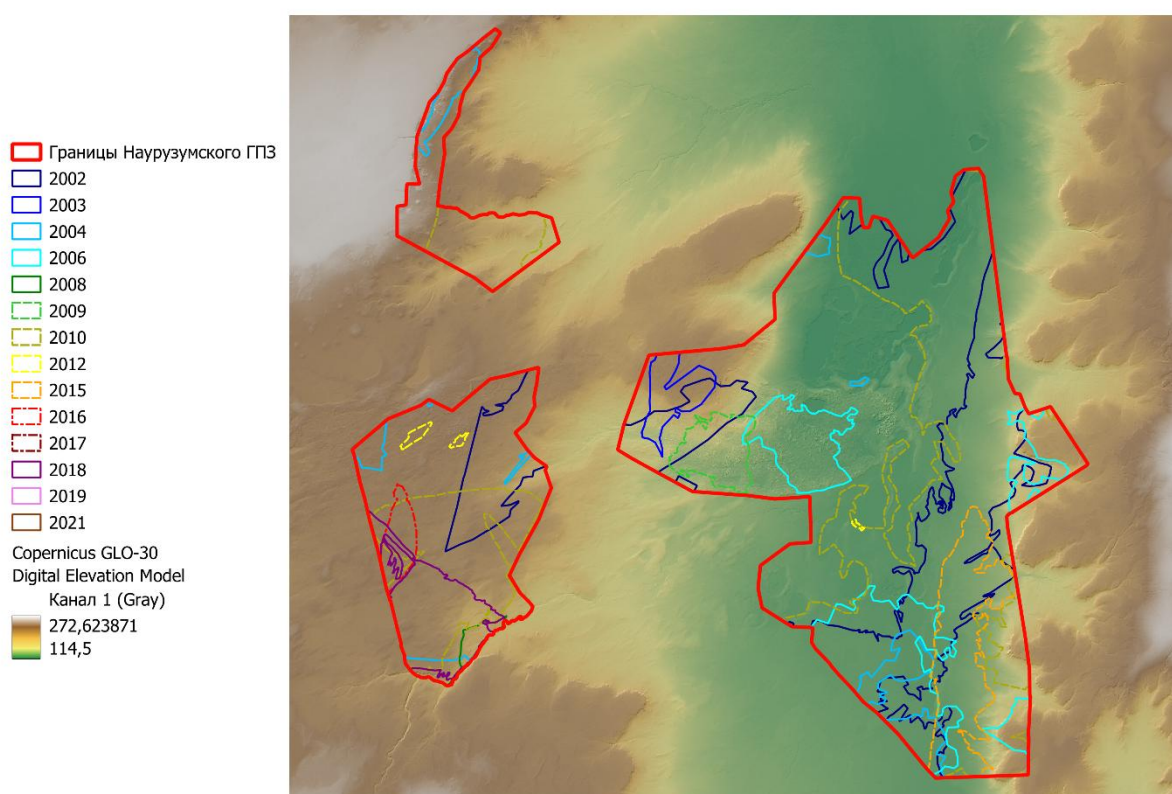


Рисунок 1. Границы пожаров, нанесенные на Copernicus GLO-30 DEM с разрешением 30 м

Copernicus GLO-30 DEM была переведена в проекцию WGS84 UTM zone N41. Для получения реальных высот была скачана модель геоида EGM2008, а затем перепроецирована и обрезана по границам полигона заповедника. Через калькулятор растра были вычислены ортометрические высоты. Ортометрические высоты - это высоты точки поверхности относительно среднего уровня моря (MSL – Mean Sea Level) с учётом геоида, то есть фактической “средней поверхности воды Земли”. Для вычисления ортометрических высот используется следующая формула:

$$H=h-N \quad (4)$$

h - эллипсоидальная высота (исходный DEM);

H - ортометрическая высота (результат после Raster Calculator);

N - геоидная высота (модель EGM96 / EGM2008).

Впоследствии обработки через ПО QGIS была проведена классификация пикселей на высоты с помощью инструмента «анализ растров». Подсчет площадей по классам проводился через инструмент «зональная гистограмма». Для подсчета реальных площадей необходимо умножить полученное число на 900 (если размер пикселя 30x30) и разделить на 10 000 для подсчета площадей в гектарах. Таким образом были вычислены площади на разных высотных интервалах Наурзумского ГПЗ.

Таблица 1. Распределение выгоревшей площади по высотным интервалам на территории Наурзумского ГПЗ методом подсчета классифицированных по высотам растровых пикселей, га

Годы	Площадь выгоревшей территории на высоте до 100, га	Площадь выгоревшей территории на высоте 100-200 м, га	Площадь выгоревшей территории на высоте 200-300 м, га	Общая площадь выгоревшей территории за год, га
2021	0	8567,1	0	8567,1
2019	0	1315,71	4614,75	5930,46
2018	0	0	8671,59	8671,59
2016	0	0	2386,89	2386,89
2015	0	12220,38	0	12220,38
2012	0	45,09	374,13	419,22
2010	3,06	70629,39	28953,9	99586,35
2009	0	4213,53	157,05	4370,58
2008	0	7,02	938,88	945,9
2006	0,36	21258,36	3432,87	24691,59
2004	0,54	4765,68	38518,02	43284,24
2003	0,27	569,34	2718,63	3288,24
2002	1,53	35652,42	9818,64	45472,59
Итого	5,76	159244	100585,4	259835,1

Анализ динамики частоты пожаров и выгоревших площадей проведен методом дистанционного зондирования с использованием обработки спутниковых снимков Landsat 7,8-9 и Sentinel-2 на территории Наурзумского заповедника и прилегающих землях за 25-летний период (2000-2025 гг). Термоточки на обследованной территории определялись после проведения тематической обработки результатов космической съемки.

Материалы обработаны статистически с использованием Microsoft Excel (версия 365). На рисунке 2 представлена блок-схема процессов, необходимых для анализа выгоревших территорий пошагово, с указанием этапов работы.

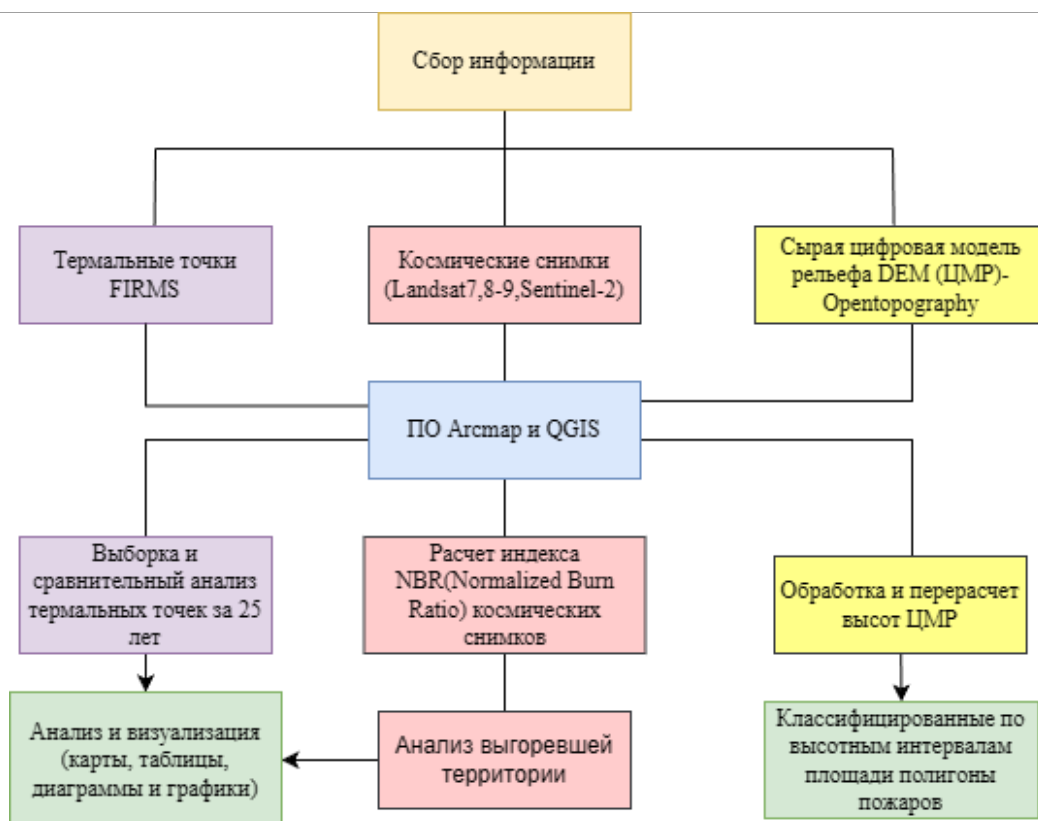


Рисунок 2. Блок-схема процессов сбора, анализа и обработки космических снимков

3. Результаты

Анализ материалов показал, что на территории Наурзумского ГПЗ за исследуемый период произошло 29 возгораний (таблица 1). Число зарегистрированных термоточек составило 1474.

Максимальная выгоревшая площадь зарегистрирована в 2010 году - 100 890 га (52,7 % от общей площади заповедника) с числом зарегистрированных термоточек 266. За весь период наблюдений максимальное число термоточек (416) было отмечено в 2019 году при общей площади пожара 6012 га. Наибольшее число возгораний было зарегистрировано в 2004 году (таблица 2).

Общая площадь возгораний на территории заповедника составила 236 300 га. Наименьшая площадь из выявленных возгораний на территории заповедника 46 га (19.07.2012 г. в 21:34 часов), максимальная 76 170 га (10.06.2010 г. в 21:14 часов). Средняя площадь пожара за период 2000-2025 гг. на территории заповедника составила $8\,148,28 \pm 2813,63$ га, что указывает на высокий разброс площадей выгорания на территории заповедника.

Таблица 2. Пожары в пределах границ Наурзумского ГПЗ (2000–2025). Костанайская область, Казахстан

Год	Термоточки/ спутник	Дата	Выгоревшая площадь, га/спутник	% выгоревшей территории
2000-2001	-	-	-	
2002	61/ Terra	2002-09-20-17:32	14044/ Landsat 7	52,64
		2002-09-25-06:39	1534/ Landsat 7	
		2002-10-01-07:40	30490/ Landsat 7	
2003	22/ Terra	2003-09-02-07:38	3334/ Landsat 7	3,81
2004	84/ Terra,Aqua	2004-06-28-06:25	1832/ Landsat 7	22,94
		2004-08-24-08:04	366/ Landsat 7	
		2004-09-24-07:14	88/ Landsat 7	
		2004-09-27-06:06	4288/ Landsat 7	
		2004-10-02-08:02	37331/ Landsat 7	
2005	-	-	-	-
2006	85/ Terra	2006-06-20-07:50	1277/ Landsat 7	13,06
		2006-07-28-07:14	14024/ Landsat 7	
		2006-08-12-08:17	3557/ Landsat 7	
		2006-08-12-17:42	6145/ Landsat 7	
2007	-	-	-	-
2008	3/ Terra	2008-08-27-07:09	959/ Landsat 7	0,5
2009	33/ Terra	2009-06-20-07:03	4429/ Landsat 7	2,31
2010	266/ Terra, Aqua	2010-06-10-21:14	76170/ Landsat 7	52,71
		2010-07-29-17:49	6331/ Landsat 7	
		2010-08-12-18:01	18389/ Landsat 7	
2011	-	-	-	-
2012	17/ VIIRS SUOMI, Aqua	2012-07-07-08:06	270/ Landsat 7	0,22
		2012-07-07-08:42	109/ Landsat 7	
		2012-07-19-21:34	46/ Landsat 7	
2013	-	-	-	-
2014	-	-	-	-
2015	251/ VIIRS SUOMI	2015-08-03-07:34	12376/ Landsat 8-9	6,46
2016	22/ Terra	2016-08-27-07:45	2423/ Landsat 8-9	1,26
2017	-	-	-	-
2018	30 / J1 VIIRS C2	2018-04-18-09:17	8799/ Sentinel-2	4,59
2019	415/ MODIS, Terra	2019-07-23-09:06	1307/ Sentinel-2	3,14
		2019-07-23-17:06	1159/ Sentinel-2	
		2019-07-20-16:23	3546/ Sentinel-2	
2020	-	-	-	-
2021	184/ Aqua, Terra	2021-08-17-08:42	5662/ Sentinel-2	2,95
		2021-07-22-16:45	3015/ Sentinel-2	1,57
2022-2025	-	-	-	-

Сравнительный анализ динамики пожаров показал, что за этот же период на границах и прилегающих к заповеднику территориях общая площадь выгоревших участков составила 833 589 га, что более чем в 3,5 раза больше, чем на территории заповедника (таблица 3). При этом число термоточек было 4,3 раза выше. Самые крупные пожары на сопредельных территориях произошли в те же годы, что и на территории заповедника: в 2004 году (102 949 га) (рисунок 3) и в 2010 году (214 716 га). Это косвенно указывает на доминирующее влияние природных факторов на распространение огня в эти периоды.

Таблица 3. Сравнительная таблица динамики пожаров в 2000-2025 гг. в Наурзумском ГПЗ в пределах границы и на прилегающих территориях. Костанайская область, Казахстан

Год	Динамика пожаров на границах и прилегающих территориях		Динамика пожаров в пределах границы	
	Термоточки	Площадь, га	Термоточки	Площадь, га
1	2	3	4	5
2000 -2001	-	-	-	-
2002	296	25680	61	14044
		26363	-	1534
		82295	-	30490
2003	160	3383	22	3334
2004	256	1879	84	1832
		987	-	366
		88	-	88
		47611	-	4288
		102949	-	37331
2005	-	-	-	-
2006	295	4497	85	1277
		92487	-	14024
		12548	-	3557
		6145	-	6145
2007	-	-	-	-
2008	175	4576	3	959
2009	68	4429	33	4429
2010	635	214716	266	76170
		35601	-	6331
		19324	-	18389
2011	-	-	-	-
2012	53	270	17	270
		109	-	109
		46	-	46
2013	-	-	-	-
2014	-	-	-	-
2015	543	21048	251	12376
2016	272	2423	22	2423

1	2	3	4	5
2017	86	201	1	-
		686	-	-
		161	-	-
		1154	-	-
2018	67	12457	30	8799
2019	3037	1365	415	1307
		87453	-	1159
		10370	-	3546
2020	-	-	-	-
2021	332	6442	184	5662
		3846	-	3015
2022 -2025	-	-	-	-

В качестве примера приведен космический снимок Landsat-7 ETM+L2 от 2 октября 2004, где показаны выгоревшие площади в границах заповедника и на сопредельных землях (рисунок 3).

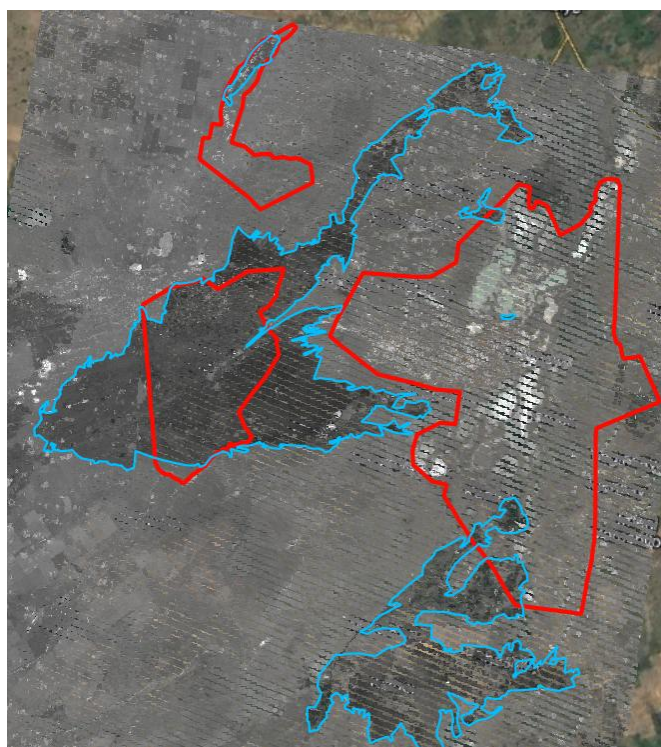


Рисунок 3. Космический снимок Landsat-7 ETM+L2 от 02.10.2004 г. Костанайская область
Условные обозначения: 1) красные линии - границы Наурзумского ГПЗ; 2) голубые линии - граница выгоревшей территории в результате пожара

На рисунке 4 визуализированы выгоревшие территории в пределах границ Наурзумского ГПЗ в 2000-2025 гг.

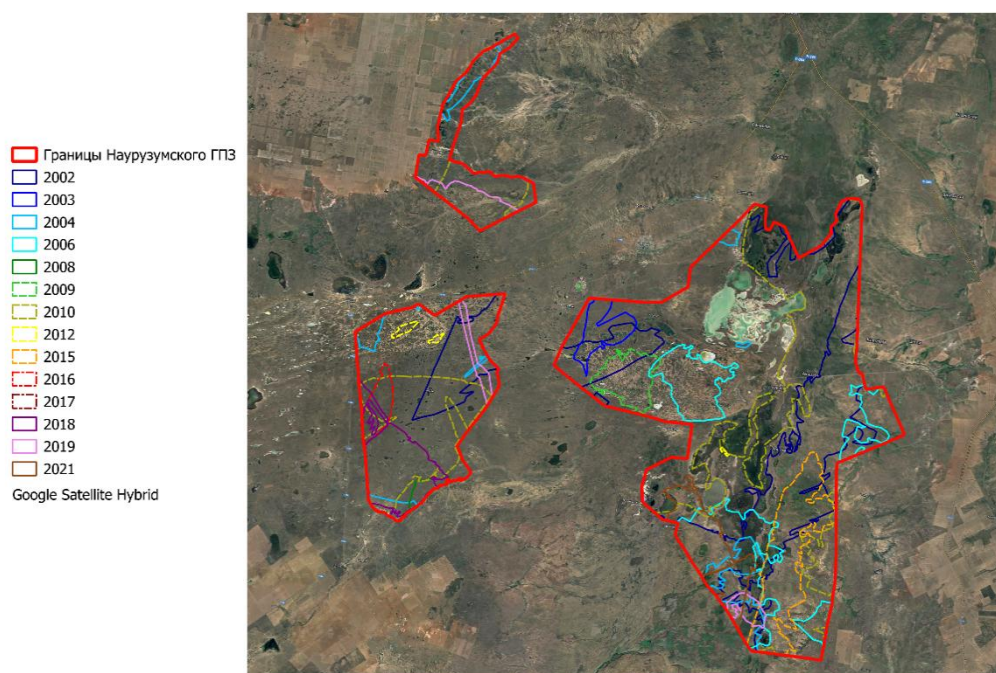


Рисунок 4. Выгоревшие территории в пределах границ Наурзумского ГПЗ в 2000-2025 гг. приведены на рисунке 4

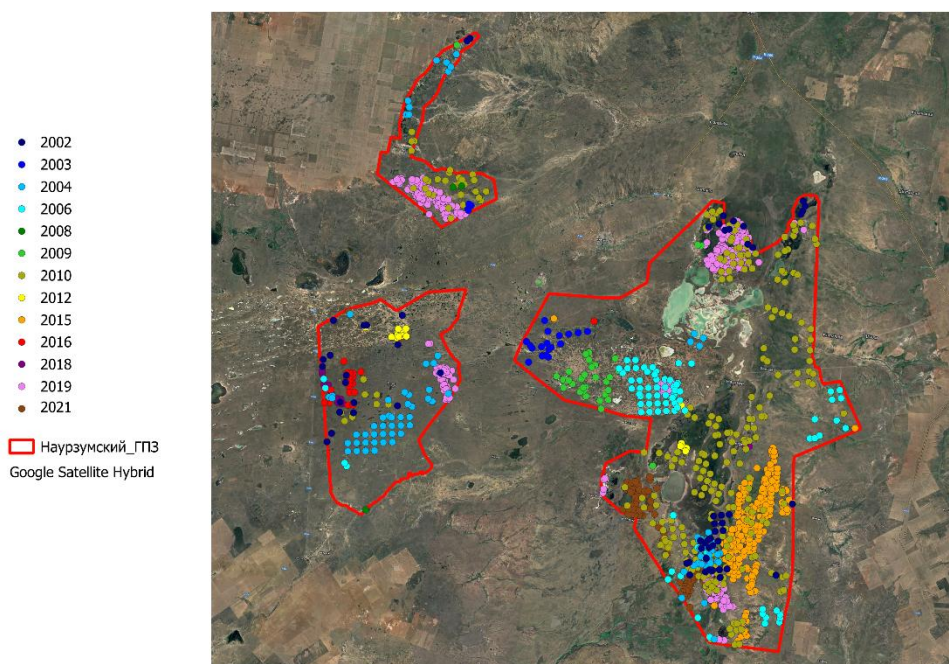


Рисунок 5. Термоточки возгораний на территории Наурзумского ГПЗ за период 2000-2025 гг

Анализ данных показал, что в течение 25 лет в Наурзумском ГПЗ и прилегающих территориях выгоревшая площадь составила 833 589 га, из них в пределах границ ГПЗ 236 300 га (рисунок 6).

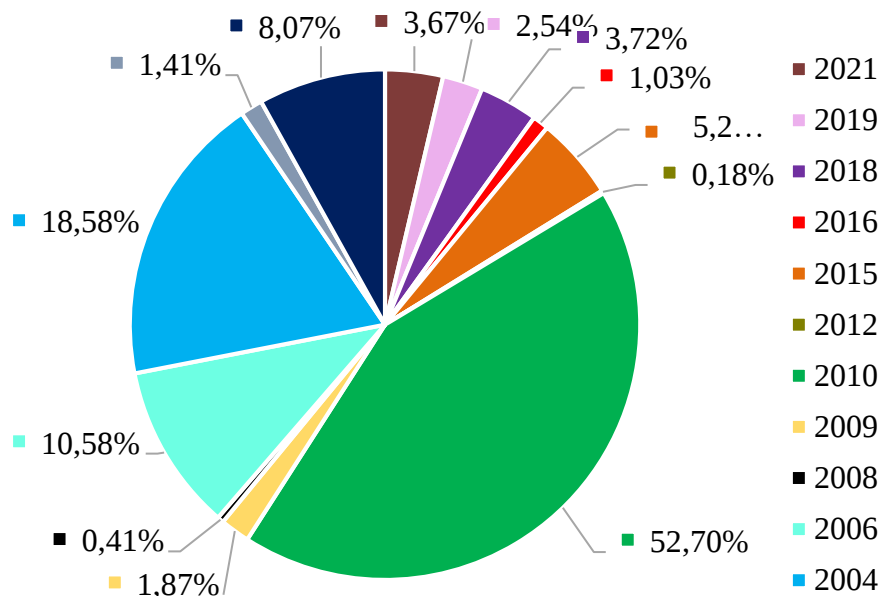


Рисунок 6. Сравнительная диаграмма выгоревших площадей (в %) на территории Наурзумского ГПЗ по годам (2000-2025 гг.)

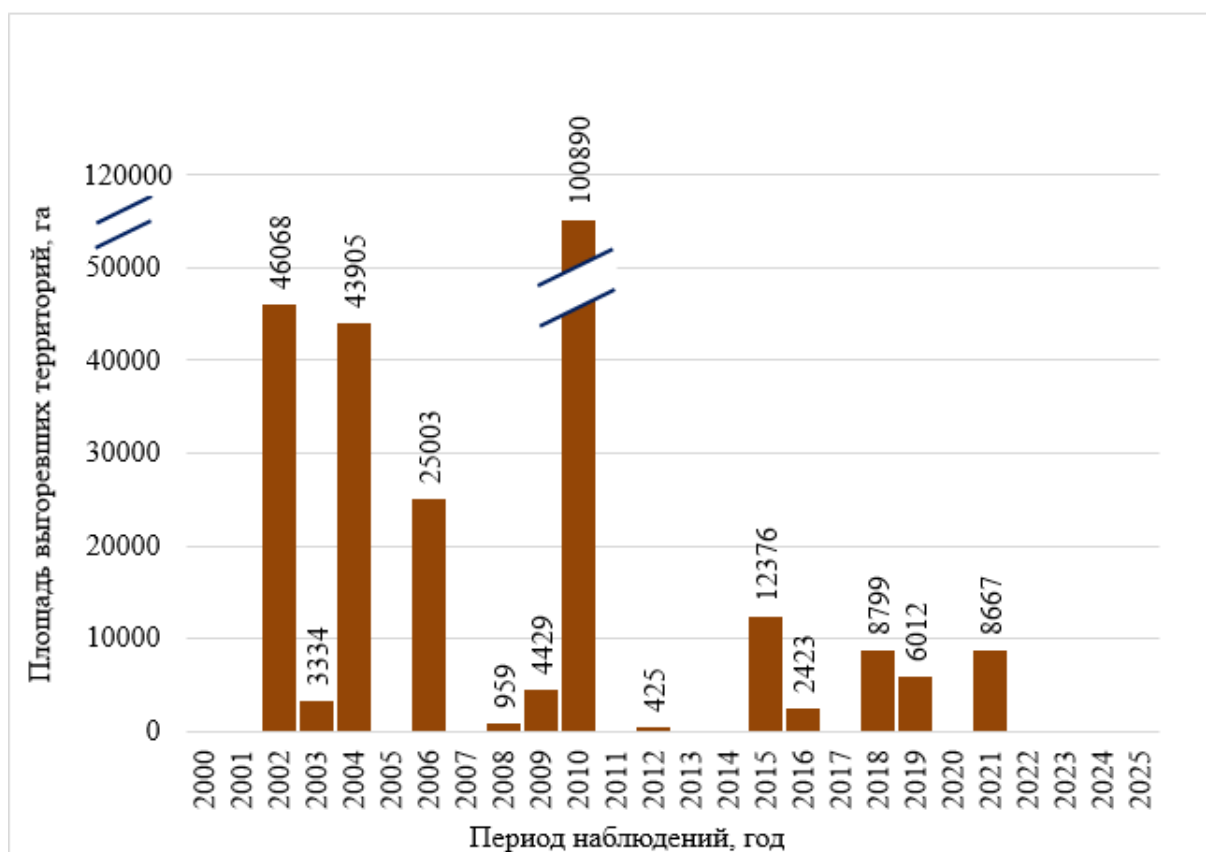


Рисунок 7. Сравнительная диаграмма площадей выгоревших территорий Наурзумского ГПЗ (2000-2025 гг.)

Самые крупные площади выгоревших территорий по данным ДЗЗ отмечаются в 2002, 2004, 2006 и 2010 годах (рисунок 7), а с 2022 года на протяжении 4-х лет отсутствуют

выгоревшие территории, возможно, это связано и с активным проведением космического мониторинга гослесфонда в республиканском масштабе, когда ведется ежедневный контроль за термоточками и своевременным оповещением через геосервисы заинтересованных организаций и государственных органов.

4. Обсуждение

В последние десятилетия отмечается значительный рост научных исследований о пожарах и их последствиях (Keeley et al., 2022; Alvarez et al., 2024). Повышенный интерес к особо охраняемым природным территориям связан с тем, что стратегия в области сохранения биоразнообразия до 2030 г. призывает к расширению ООПТ не менее, чем на 30 % суши и моря (CBD, 2022). С появлением новых технологий появилась возможность дистанционного зондирования Земли и обработки данных космических исследований обширных территорий (Suresh Babu et al., 2024). Результаты проведенных исследований в регионе представительства Наурзумского государственного природного заповедника выявили значительные площади выгоревших участков в последнюю четверть века как внутри границ заповедника, так и на сопредельных территориях. Впервые на данной территории проведен анализ частоты и площадей пожаров в период 2000-2025 гг. с фиксацией термоточек и дат наблюдений. Полученные результаты согласуются с данными других авторов о необходимости современных подходов к оценке опасности и необходимости профилактики возгораний на особо охраняемых природных территориях (Kamp et al., 2016; Rachkovskaya et al., 2012; Bragina et al., 2018; Pavleychik et al., 2022). Особый интерес представляют данные о том, что в отдельные годы площадь пожаров достигала 52,7 % от общей площади заповедника, а на сопредельных территориях общая площадь возгораний была в 3,5 раза больше, чем на территории заповедника.

В настоящее время все больше научных исследований посвящено работам по прогнозу и моделированию пожаров на территории Казахстана (Chepashev et al., 2025; Babu et al., 2024; Babu et al., 2025).

В связи с этим необходимо провести аналогичные исследования и анализ на других природных территориях особого статуса для объективной оценки воздействий пирогенного фактора.

5. Заключение

Проведенный анализ показал, что ООПТ подвергаются опасности выгорания значительных площадей, угрожающих сохранению биологического разнообразия. Это требует дальнейшего анализа состояния пожарной опасности ООПТ и последствий возгораний в долгосрочном аспекте на основе современных технологий.

В целом частота и интенсивность пожаров увеличивается во всем мире, что обусловлено изменением климата и его региональными флуктуациями, изменениями в системах землепользования и сменой растительного покрова, неэффективными мерами борьбы с пожарами. В результате обширные участки различных ландшафтов повысили степень пожарной опасности. Повышение эффективности управления пожарами и их предотвращение, особенно на охраняемых природных территориях, их раннее предупреждение требуют применения новых стратегий и технологий экологических исследований.

Дистанционное зондирование Земли является одним из наиболее эффективных и доступных методов при оценке частоты и интенсивности пожаров при использовании спутниковых снимков, термальных точек и использования индекса возгорания (NBR-индекс).

На основе анализа данных ДЗЗ, полученных по материалам спутниковых миссий Landsat-7, Landsat-8, Landsat-9 и Sentinel-2, а также информации о термических аномалиях системы NASA FIRMS, выполнен многолетний анализ динамики пожаров. Установлено, что

за 25-летний период суммарная площадь выгоревших территорий в пределах Наурзумского ГПЗ и на прилегающих землях составила 833 589 га, из которых 236 300 га приходится непосредственно на территорию заповедника.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

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

8. Информация об авторах

Брагина, Татьяна - доктор биологических наук, профессор, Костанайский региональный университет им. А. Байтурсынова, ул. Тауелсіздік, 118, Костанай, Казахстан, 110000; главный научный сотрудник Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), ул. Береговая, 21В, Ростов-на-Дону, Россия, 344002; tm_bragina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5568-9082>

Кабдулова, Гульжиян – кандидат географических наук, Ph.D., главный научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы», Садоводческое товарищество «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020, g.a.kabdulova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7738-7624>

Чепашев, Даникер – заведующий лабораторией, ТОО «Институт ионосферы», Садоводческое товарищество «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020, d.chepashev@ionos.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8417-3990>

Жусупова, Гульсезим - младший научный сотрудник, докторант, ТОО «Институт ионосферы», Садоводческое товарищество «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020, zhussupova@ionos.kz, <https://orcid.org/0009-0009-5330-9697>

Шингужинов, Арсен – инженер, ТОО «Институт ионосферы», Садоводческое товарищество «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020, a.shinguzhinov@ionos.kz, <https://orcid.org/0009-0003-2024-6104>

Жилкибаев, Руслан - инженер, ТОО «Институт ионосферы», Садоводческое товарищество «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020, zhilkibayev@ionos.kz, <https://orcid.org/0009-0006-2057-9197>

Максимкина, Елизавета - младший научный сотрудник, ТОО «Институт ионосферы», Садоводческое товарищество «Ионосфера», 117, Алматы, Казахстан, 050020, maximkina.y@ionos.kz, <https://orcid.org/0009-0007-6925-1202>

9. Финансирование: Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках ПЦФ BR24992865 «Разработка многофункциональной системы наземно-космического мониторинга и раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» на 2024-2026 годы.

10. Благодарности: нет

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

12. Список литературы

1. Alvarez, A. J., Lecina-Diaz, E., Batllori, A., Duane, L., Brotons, L., & Retana, J. (2024). Spatiotemporal patterns and drivers of extreme fire severity in Spain for the period 1985–2018. *Agricultural and Forest Meteorology*, 358, 110185. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110185>
2. Bragina, T. M. (2009). Naurzum ecological network (history of study, current status, and long-term conservation of biological diversity in the region of representation of a UNESCO World Natural Heritage site (Naurzumskaya ekologicheskaya set' (istoriya izucheniya, sovremennoe sostoyanie i dolgosrochnoe sohranenie biologicheskogo raznoobraziya regiona predstavitel'stva prirodnogo ob'ekta Vsemirnogo naslediya YUNESKO) in Russian). Kostanay printing (Kostanaj poligrafiiya). ISBN 978-601-7109-10-3.
3. Bragina, T. M., Nowak, A., Vanselow, K. A., & Wagner, V. (2018). *Grasslands of Kazakhstan and Middle Asia: The ecology, conservation and use of a vast and globally important area*. In V. R. Squires, J. Dengler, H. Feng, & L. Hua (Eds.), *Grasslands of the world* (pp. 139–167). CRC Press. <https://www.crcpress.com/link/link/p/book/9781498796262>
4. Bragina, T. M. (2021). Composition and structure of soil invertebrate communities (mesofauna) of the Naurzum Nature Reserve (Sostav i struktura soobshchestv pochvennykh bespozvonochnykh (mezofauna) Naurzumskego zapovednika in Russian). Kostanay printing (Kostanaj poligrafiiya). ISBN 978-601-7640-54-5.
5. CBD (Convention on Biological Diversity). (2022). *Kunming-Montreal global biodiversity framework*. <https://www.cbd.int/doc/c/e6d3/cd1d/daf663719a03902a9b116c34/cop-15-l-25-en.pdf>
6. Chepashev, D., Nurakynov, S., Sharma, D., Sydyk, N., & Kabdulova, G. (2025). Mapping fire hazard potential in Kazakhstan. *International Journal of Wildland Fire*, 34(9), WF24232. <https://doi.org/10.1071/WF24232>
7. Duane, A., Castellnou, M., & Brotons, L. (2021). Towards a comprehensive look at global drivers. *Climatic Change*, 165, 43. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03066-4>
8. Galaktionova, L. V., & Vasilchenko, A. V. (2019). Sustainability of soils to fires. *Nature Conservation Research*, 4(Suppl. 2), 98–103. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.041>
9. He, T., Lamont, B. B., & Pausas, J. G. (2019). Fire as a key driver of Earth's biodiversity. *Biological Reviews*, 94(6), 1983–2010. <https://doi.org/10.1111/brv.12544>
10. Jolly, C. J., Dickman, C. R., Doherty, T. S., van Eeden, L. M., Geary, W. L., Legge, S. M., Woinarski, J. C. Z., & Nimmo, D. G. (2022). Animal mortality during fire. *Global Change Biology*, 28(6), 2053–2065. <https://doi.org/10.1111/gcb.16044>
11. Jones, M. W., Abatzoglou, J. T., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forkel, M., Smith, A. J. P., Burton, Ch., Betts, R. A., van der Werf, G. R., Sitch, S., Canadell, J. G., Santin, C., Kolden, C., Doerr, S. H., & Le Quere, C. (2022). Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics*, 60(2), e2020RG000726. <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>
12. Kabdulova, G., Kabzhanova, G., Baktybekov, K., Aimbetov, A., & Aligazhiyeva, L. (2019). *Satellite remote sensing for monitoring of the forest resources of Kazakhstan*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Conference paper. <https://doi.org/10.1117/12.2533563>
13. Kabdulova, G., Meirmanova, T., Aimbetov, A., Kabzhanova, G., & Baktybekov, K. (2020). *GIS capabilities in monitoring of forest logging and assessment of burned areas based on Earth remote sensing data*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Conference paper. <https://doi.org/10.1117/12.2570965>
14. Kamp, J., Bhagwat, T., Hölzel, N., & Smelansky, I. (2025). Collapse and recovery of livestock systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 380(1874). <https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0062>

15. Kamp, J., Koshkin, M. A., Bragina, T. M., Katzner, T. E., Milner-Gulland, E. J., Schreiber, D., Sheldon, R., Shmalenko, A., Smelansky, I., Terraube, J., & Urazaliev, R. (2016). Persistent and novel threats. *Biodiversity and Conservation*, 25(12), 2521–2541. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1083-0>
16. Keeley, J. E., & Pausas, J. G. (2022). Evolutionary ecology of fire. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 53, 203–225. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102320-095612>
17. Leys, B. A., Marlon, J. R., Umbanhowar, C., & Vannière, B. (2018). Global fire history of grassland biomes. *Ecology and Evolution*, 8(17), 8831–8852. <https://doi.org/10.1002/ece3.4394>
18. Naurzum State Nature Reserve (Naurzumsky Zapovednik in Russian). (2016). Scientific activity (Nauchnaya deyatel'nost'). <https://naurzum.kz/ru/o-zapovednike/nauchnaya-deyatelnost>
19. Pavleychik, V. M., Chibilev, A. A., & Padalko, Y. A. (2022). Pyrological situation in the steppes of northern Eurasia. *Doklady Earth Sciences*, 505(1), 591–597. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22080141>
20. Rachkovskaya, E. I., & Bragina, T. M. (2012). Steppes of Kazakhstan. In M. Werger & M. van Staalduinen (Eds.), *Eurasian steppes* (pp. 103–148). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-3886-7_3
21. Resco de Dios, V., Cunill Camprubí, À., Campos-Arceiz, A., Clarke, H., He, Y., Zveushe, O. K., Domènech, R., Ying, H., & Yao, Y. (2025). Protected areas show substantial. *Fire*, 8, 405. <https://doi.org/10.3390/fire8100405>
22. Sayedi, S. S., Abbott, B. W., Vanniere, B., Leys, B., Colombaroli, D., Romera, G. G., Stowinski, M., Aleman, J. C., Blarquez, O., Feurdean, A., Brown, K., Aakala, T., Alenius, T., Allen, K., Andric, M., Bergeron, Y., Biagioni, S., Bradshaw, R., Bremond, L., Brisset, E., Brooks, J., Brugger, S. O., Brussel, Th., Cadd, H., Cagliero, E., Carcaillet, Ch., Carter, V., Catry, F. X., Champreux, A., Chaste, E., Chavardes, R. D., Chipman, M., Conedera, M., Connor, S., Constantine, M., Mustaphi, C. C., Dabengwa, A. N., Daniels, W., De Boer, E., Dietze, E., Estrany, J., Fernandes, P., Finsinger, W., Flantua, S. G. A., Fox-Hughes, P., Gaboriau, D. M., Gayo, E. M., Girardin, M. P., Glenn, J., Gluckler, R., Gonzalez-Arango, C., Groves, M., Hamilton, D. S., Hamilton, R. J., Hantson, S., Hapsari, K. A., Hardiman, M., Hawthorne, D., Hoffman, K., Inoue, J., Karp, A. T., Krebs, P., Kulkarni, Ch., Kuosmanen, N., Lacourse, T., Ledru, M.-P., Lestienne, M., Long, C., Lopez-Saez, J. A., Loughlin, N., Niklasson, M., Madrigal, J., Maezumi, S. Y., Marcisz, K., Mariani, M., McWethy, D., Meyer, G., Molinari, Ch., Montoya, E., Mooney, S., Morales-Molino, C., Morris, J., Moss, P., Oliveras, I., Pereira, J. M., Pezzatti, G. B., Pickarski, N., Pini, R., Rehn, E., Remy, C. C., Revelles, J., Rius, D., Robin, V., Ruan, Y., Rudaya, N., Russell-Smith, J., Seppa, H., Shumilovskikh, L., Sommers, W. T., Tavsanoğlu, C., Umbanhowar, Ch., Urquiaga, E., Urrego, D., Vachula, R. S., Wallenius, T., You, Ch., & Daniau, A.-L. (2024). Assessing changes in global fire regimes. *Fire Ecology*, 20(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s42408-023-00237-9>
23. Shi, K., & Touge, Y. (2022). Characterization of global wildfire burned area spatiotemporal patterns. *Scientific Reports*, 12(1), 644. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04726-2>
24. Suresh Babu, K. V., Singh, S., Kabdulova, G., Kabzhanova, G., & Baktybekov, G. R. (2024). Burned area mapping based on KazEOSat-1. *Environmental Sciences Proceedings*, 29(1), 82. <https://doi.org/10.3390/ECRS2023-16841>
25. Suresh Babu, K. V., Singh, S., Kabdulova, G., & Kabzhanova, G. (2025). A novel framework for fire risk assessment in Kazakhstan: integrating machine learning and remote sensing. *Front. For. Glob. Change*, Sec. Fire and Forests, 8. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1680856>

Спутниктік мәліметтерді пайдалана отырып, Наурызым қорығы мен оған жақын аумақтардағы өрт динамикасын талдау

Татьяна Брагина, Гульжиян Кабдулова, Даникер Чепашев, Гульсезим Жусупова, Арсен Шингужинов, Руслан Жилкибаев, Елизавета Максимкина

Аңдатпа. Өрт экожүйелердің қысқа мерзімді және ұзақ мерзімді өзгерістеріне, соның ішінде ерекше қорғалатын табиғи аумақтарға да әсер ететін ең күшті факторлардың бірі болып табылады. Өрттің саны мен қарқындылығы жерді игеру, климаттың өзгеруі, халықтың әлеуметтік-экономикалық жағдайы сияқты факторлардың әсерінен айтарлықтай артты.

Бұл зерттеудің негізгі мақсаты – Наурызым мемлекеттік табиғи қорығы (2000–2025 жж.) және оған іргелес аумақтар шегінде 2000-2025 жылдар аралығындағы өрттердің жиілігі мен олардың көлемін ұзақ мерзімді талдау.

Бұл зерттеудің маңыздылығын арттыратын жайт – Наурызым мемлекеттік табиғи қорығының ЮНЕСКО-ның Бүкіләлемдік мұра нысаны «Сарыарқа – Солтүстік Қазақстанның далалары мен көлдері» құрамына енуі. Зерттеу жұмыстарын орындау үшін Landsat 8 және Sentinel-2 дерекқорларындағы спутниктік суреттерді өңдеудің заманауи технологиялары қолданылды. Термалды нүктелер, бақылау күндері, өрт аудандары ескерілді.

Алғаш рет 2000–2025 жылдар аралығында 29 өрттің тіркелгені, олардың жалпы ауданы 833 589 гектарды құрағаны, оның ішінде қорық аумағында 236 300 гектар болғаны көрсетілді.

Өрт салдарын азайту мақсатында табиғи мұраның аса құнды нысандарын заманауи қашықтықтан зондтау технологияларын пайдалана отырып, тұрақты бақылау мен мониторинг жүргізу арқылы профилактикалық шаралар ұсынылады.

Зерттеудің нәтижелері ұзақ уақыт аралығында қорықтың биоалуантүрлілігіне әсер ететін өрт саны мен олардың аудандарын анықтауға мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: қашықтықтан зондтау; спутниктік зерттеулер; өрттер; Наурызым қорығы; іргелес аумақтар; Қостанай облысы.

Analysis of fire dynamics in the Naurzum Nature Reserve and adjacent areas using satellite data

Tatyana Bragina, Gulzhiyan Kabdulova, Daniker Chepashev, Gulsezim Zhusupova, Arsen Shinguzhinov, Ruslan Zhilkibaev, Yelizaveta Maximkina

Abstract: Wildfires are one of the major drivers of short-term and long-term ecosystem change, including within protected natural areas. The number and intensity of fires have increased significantly due to land use expansion, climate change, and the socio-economic conditions of local populations.

The main objective of this study was a long-term analysis (2000–2025) of fire frequency and burned area within the boundaries of the Naurzum State Nature Reserve (2000–2025) and in the adjacent territories.

The importance of this research is highlighted by the high conservation status of the Naurzum State Nature Reserve as a part of the UNESCO World Heritage Site “Saryarka – Steppe and Lakes of Northern Kazakhstan.” Modern satellite image analysis technologies and databases (Landsat 8 and Sentinel-2) were used to conduct the study. Thermal hotspots, observation dates, and burned areas were taken into account.

For the first time, it was demonstrated that during the period from 2000 to 2025, a total of 29 wildfires occurred, with a combined burned area of 833,589 ha, of which 236,300 ha were within the reserve's boundaries.

To minimize the consequences of wildfires, preventive measures are proposed through continuous monitoring and assessment of valuable natural heritage areas using modern Earth remote sensing technologies.

The results of the study include the number and extent of burned areas that have influenced the biodiversity of the reserve over an extended period.

Keywords: remote sensing; satellite research; wildfires; Naurzum Reserve; adjacent territories; Kostanay Region.

Geoenvironmental assessment of hydro-mineral recreational resources in the eastern and southeastern parts of the Alakol lakes system

Myrzabay Jetimov, Yerkin Tokpanov, Roza Mukhitdinova*, Aiman Yessengabylova

Zhetysu University named after I. Zhansugurov, Taldykorgan, Kazakhstan; make_d_61@mail.ru; tokpanov1960@mail.ru; aiman_13_90@mail.ru

*Correspondence: mukhitdinova.ra@gmail.com

Abstract: The article discusses the natural and balneological characteristics of the hydromineral resources of the Alakol–Zhalanashkol lake system located in the south-eastern part of the Abai region. The study was conducted in an arid climate, taking into account the spatial variability of the chemical composition of water and mud deposits. Field and laboratory observations conducted in 2024–2025 were aimed at determining the physical and chemical characteristics of mineral waters and therapeutic muds, as well as assessing their potential for recreational and health purposes. Field work covered the eastern, western, northern and south-eastern coastal zones, including areas of active mud accumulation. Analyses performed in the laboratories of the “Shakarim University” NCJSC and the Sanitary and Epidemiological Service of the Zhetysu region showed that concentrations of the main chemical elements and minerals meet acceptable sanitary standard. Variations in water chemistry between the eastern and western sectors were found to depend on hydrological and climatic factors. Sulfates, chlorides, and bischofite (MgCl_2) were found to predominate in the composition, imparting pronounced therapeutic properties to the muds. The results confirm the high balneological value and environmental safety of the lakes, supporting their potential use in health tourism, balneotherapy and sustainable regional development.

Keywords: Alakol; Zhalanashkol; hydromineral resources; therapeutic mud; bischofite; recreation; tourism; balneology; chemical composition; sustainable development

Citation: Jetimov, M., Tokpanov, Ye., Mukhitdinova, R. Yessengabylova, A. (2025). Geoenvironmental assessment of hydro-mineral recreational resources in the eastern and southeastern parts of the Alakol lakes system. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 153(4), 91-105.

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-91-105>

Academic Editor:
N.Ye. Ramazanova

Received: 09.11.2025
Revised: 17.12.2025
Accepted: 18.12.2025
Published: 24.12.2025



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

1. Introduction

The southern and south-eastern regions of the Abai region are characterised by high natural resource potential, determined by the unique hydromineral resources of the Alakol Lakes system. These water bodies represent a complex natural and geographical complex, combining a wide variety of landscapes, climatic conditions and recreational opportunities. In recent decades, this territory has been the subject of intensive research by domestic and foreign scientists studying its natural-geographical, hydrochemical and recreational features, as well as the impact of anthropogenic factors on the state of ecosystems.

One of the first comprehensive studies devoted to assessing the

natural resource potential of the Alakol Basin was the work of S. Erdavletov and A. Aktymbaeva (Erdavletov et al., 2012), in which the authors characterised Alakol as a natural resource subsystem of the local tourism and recreation complex. The scientists substantiated the spatial structure of recreational development, identifying key nodes and functional zones of tourist activity. This research was continued in the work of A.S. Aktymbaeva and M.T. Taukebayeva, which provided a geo-ecological description of the region, assessed its tourism and recreation potential, and identified limiting natural factors (Aktymbaeva et al., 2015).

Previously, A.S. Aktymbaeva studied the hydroecological characteristics of the Alakol group of lakes, identifying patterns in the distribution of hydrochemical parameters and their seasonal dynamics (Aktymbaeva, 2006). K.A. Iskakova, A.A. Zhakupova, Sh.T. Abdreeva, and G.R. Aizholova made a significant contribution to understanding the current state of the recreational potential of the Alakol basin by assessing the level of anthropogenic pressure and proposing methods for monitoring the recreational transformation of coastal landscapes (Iskakova et al., 2013).

A geo-ecological assessment of the territorial recreational systems of the Alakol Lake basin was presented by Zh.T. Mukaev, who emphasised the need for spatial analysis of natural resource use and biodiversity conservation (Mukaev, 2017). These provisions were developed in a collective monograph by J.T. Mukaev, K.M. Dzhanaleeva, L.D. David, Zh.O. Ozgeldinova, M.A. Beisembayeva, G.T. Ospan, Z. Kishkenbayeva and E. Sailaubay, which examines in detail the environmental challenges associated with the development of tourism and proposes approaches to the formation of a sustainable model for the recreational use of natural resources (Mukaev et al., 2017). In later works by Z. Kishkenbayeva and E. Sailaubay, the issue of environmental sustainability is considered in the context of integrating environmental protection measures into the region's tourism policy, emphasising the importance of balancing economic development and ecosystem conservation (Kishkenbayeva et al., 2024).

The works of N.A. Amirgaliyev, T.Y. Lopareva, L.A. Gogol, and Sh.Ch. Kanagatova present an analysis of the hydrochemical regime of the lakes, determine the key parameters of their mineral composition, and identify the factors influencing the formation of their balneological properties (Amirgaliyev et al., 2003). In her dissertation, N.E. Snegireva was the first to systematise data on the chemical composition of surface waters in the Sasyk-Alakol basin and determine their dependence on climatic and geomorphological conditions (Snegireva, 1970).

Research into hydromineral resources was continued in the works of D.M. Dzhetimov, E.A. Tokpanov, B.K. Asubaev and A.K. Esengabylova (Dzhetimov et al., 2014), who conducted physical, chemical and microbiological analyses of the therapeutic mud deposits at the Kossor site on Lake Alakol. The scientists identified a high concentration of biologically active elements, confirming their potential for medical use and the prospects for the development of balneological tourism. Recent foreign studies (Carbajo et al., 2017; Quattrini et al., 2017) confirm similar patterns in the study of hydrogen sulphide and mineral waters, emphasising their therapeutic and rehabilitative value.

In the context of comparative analysis, Kazakhstani authors (Akimzhanova et al., 2024) studied the chemical composition and physicochemical properties of natural therapeutic muds from the salt lakes of Kazakhstan, including the Alakol system, and identified directions for the rational use of their recreational potential. An important contribution to the understanding of historical and scientific aspects was made by S. Kairgeldina, K. Tekebaev, M. Baurzhan, K. Absattarova, and N. Slivkina made an important contribution to understanding the historical and scientific aspects, tracing the main stages of the development of Kazakh balneology and its connection with geographical research into natural therapeutic factors (Kairgeldina et al., 2024).

The problems of ecosystem degradation under the influence of anthropogenic factors are reflected in the works of T.I. Moiseenko, E.L. Cesonien and co-authors, as well as J.F. Artiola, I.L. Pepper and M.L. Brusseau, which show that the growth of recreational and economic pressure on water bodies requires constant monitoring of water quality (Moiseenko, 2022; Česonienė et al.,

2021; Artiola et al., 2004). Foreign authors A. Durán Sánchez, J. Álvarez-García and M.C. Del Río-Rama note the importance of active tourism and its impact on the sustainable development of regions, while M. Tosic and colleagues propose comprehensive approaches to assessing pollutant loads on coastal areas (Sánchez et al., 2014; Tosic et al., 2018). In turn, S.B. Wassie justifies the need to develop adaptive strategies to prevent the degradation of natural resources, which is in line with the objectives of environmental regulation of tourism activities in the Alacol Basin (Wassie, 2020).

The relevance of this study is determined by several important scientific issues. First, there is a need for a more detailed study of the chemical composition of the waters and therapeutic muds of the Alakol lakes. It is of considerable importance for the development of balneological practices and medical tourism in the region. Secondly, the impact of anthropogenic factors on the ecosystems of this water system remains insufficiently studied, which requires the development of effective methods for monitoring and assessing the sustainability of natural resources.

In addition, the study is of general scientific importance for the geoecology of arid areas, where specific climatic conditions and a high degree of water evaporation determine the formation of unique hydrochemical characteristics of water bodies. The results of the work may be useful for expanding knowledge about geoecological processes in other arid and semi-arid regions, as well as for developing methods for the rational use of natural resources in a changing climate.

Thus, analysis of existing studies shows that the issue of recreational development and rational use of the hydromineral resources of the Alakol lake system is multifaceted. Despite the availability of fundamental works, issues related to the variability of the physical and chemical composition of water and therapeutic muds, as well as the consequences of anthropogenic impact on the region's ecosystems, remain unresolved. This study aims to fill these gaps by conducting a comprehensive study of the hydromineral resources of the eastern and south-eastern parts of the Alakol lake system, assessing their recreational potential and developing recommendations for environmentally safe use.

2. Materials and methods

The Alakol Lakes system is a unique closed natural water body located in the intermountain basin of the same name between the Zhetysu Alatau (4,642 m), Barlyk-Maily (2,242 m) and Tarbagatai (2,992 m) mountain ranges. The main water supply for the reservoir comes from the Tenteq, Zhamanty, Yrgayty, Terekty, Kusak, Emel, Makanchi, Urdzhar and other tributaries. The geographical coordinates of the system range from the northern point (Lake Sasykol) at 46°41'48" N, 80°44'51" E to the southern point (Lake Zhalanashkol) at 45°31'56" N, 82°11'12" E. The western border is Lake Alakol (46°06'44" N, 81°20'48" E), and the eastern border is 46°11'27" N, 82°03'11" E.

The total area of the mirror surface of the lakes Sasykkol, Uiyaly (Koshkarkol), Alakol and Zhalanashkol is 3,589.5 km², with a total water volume of 61,58 km³. The average depth of the reservoirs is 22 m, with a maximum depth of 52 m. These physical and geographical characteristics determine the specific hydrochemical regime and the formation of therapeutic mud in the region.

Between May and October 2025, fieldwork was carried out to determine the physical and chemical composition of the water and therapeutic mud. Samples were taken from the northern, southern, western and eastern parts of Lake Alakol and Lake Zhalanashkol, as well as at the mouths of the Tenteq, Zhamanty and Yrgayty rivers. Additional samples were taken from three therapeutic mud deposits located in coastal areas of tourist and recreational activity. A total of 60 water samples and 12 therapeutic mud samples were taken.

Water and sludge sampling and analysis were carried out in accordance with generally accepted methods and current standards (GS 26449.1-85; GS 26449.2-85).

The selected samples were placed in sterile containers, sealed tightly and delivered to the laboratory. Only fresh samples that had not been frozen were used for analysis.

Classic methods were used to process the data obtained: statistical, geoenvironmental and cartographic, as well as systematic analysis to assess the tourist and recreational potential of the region's natural tourist and recreational resources.

The following analytical methods were used to determine the chemical composition of water and mud samples: scanning electron microscopy (SEM) combined with energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD), and measurement of physicochemical parameters using pH-metry and portable devices.

A scanning electron microscope (SEM) equipped with an EDS system allowed for qualitative and quantitative analysis of the elemental composition of the samples. During the analysis, X-ray spectra were obtained, including $K\alpha$ and $L\alpha$ lines characteristic of each element. Based on the intensity and energy of the spectrum peaks, the mass (%) and atomic (%) fractions of the elements were calculated. ZAF correction was used to process the data, taking into account the atomic number (Z), absorption (A) and fluorescence (F).

Additionally, the surface micro-morphology of the samples was analysed, and particle sizes, porosity and surface texture features were determined. Images obtained at the micron and nanometre scales were subjected to graphic processing.

3. Results

Field expedition studies with water sampling were conducted on the eastern, western, northern and south-eastern shores of Lake Alakol and Lake Zhalanashkol. The samples were analysed in the laboratories of Shakarim University, NCJSC and the sanitary and epidemiological service of the Zhetysu region.

The results of laboratory studies showed that the content of chemical elements and minerals in the water does not exceed the maximum permissible concentrations and is suitable for health and recreation (Table 1).

Table 1. Chemical composition of water in the eastern (Kabanbay village) and western (Akshi) parts of Lake Alakol

Cations	Share, mg/dm ³		Difference, %	Anions	Share, mg/dm ³		Difference, %
	East	West			East	West	
B	9.00	0.55	<8.45	Sulfates	13.2	36.0	>22.8
Ca	165.54	130.28	<78.7	Chlorides	6.3	11.2	>4.9
Si	2.74	1.40	<1.34	HCO ₃ ⁻	29.0	23.0	<6
Mg	18.81	0.79	<18.02	CO ₃ ⁻²	4.0	3.1	<0.9
K	35.51	13.41	<5.4	NH ₄ ⁺	0.3	0.4	<0.1
Hg	9.71			Nitrates	2.5	2.7	<0.2
Fe	5.25			Nitrides	1.031	1.034	<0.003
Sr	0.31	0.34	>0.03				
Li	0.26	0.40	>0.14				
Total mineralization	1920	1450	<4.70	pH	7.9	8.6	>0.7

Field analyses showed the presence of 16 chemical elements in the eastern part of Lake Alakol and 14 in the western part. In the western part, the concentrations of B, Ca, Mg, Si, K, HCO₃⁻, and CO₃²⁻ are lower than in the east, but there is an increase in the content of Li, Sr, chlorides, sulphates, nitrates, nitrites, and ammonia (Tokpanov et al., 2021). In the western recreation area of Akshi, Fe and Hg, which are present in the eastern part, have not been detected. The total mineralisation of water in the western part is lower, which is explained by the confluence

of the Zhamanta and Yrgayty rivers with an average annual water flow of more than 7.8 m³/s (Aktymbaeva et al., 2015; Tokpanov, 2016).

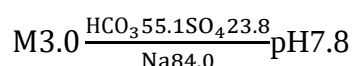
The results of the analysis of water samples from Lake Zhalanashkol showed significant differences in the chemical composition of the eastern and western parts (Table 2).

Table 2. Chemical composition of water in the eastern and western parts of Lake Zhalanashkol

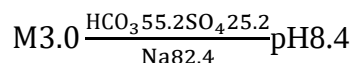
Cations	Share, mg/dm ³		Difference, %	Anions	Share, mg/dm ³		Difference, %
	East	West			East	West	
B	9.00	9.00		Sulfates	13.2	36.0	>22.8
Ca	2.04	23.60	>21.56	Chlorides	6.3	11.2	>4.9
Si	2.74	1.40	<1.34	HCO ₃ ⁻	29.0	23.0	<6
Mg	9.08	93.02	<83.22	CO ₃ ⁻²	4.0	4.6	>0.6
Na ⁺ + K	43.3	43.4	<0.1	Iodides	0.004	0.012	<0.0028
K	3.22	32.84	<29.62	Bromides	0.39	0.49	>0.1
Fe	0.01			Fluorides	0.23	0.21	<0.4
Sr	0.02	0.34	>0.03	NH ₄ ⁺	0.28	0.36	>0.1
Li	0.03	0.31	>0.14	Nitrates	2.45	2.6	>0.2
Hg	0.36	0.27	<7.5				
Ammonium	0.01	0.01		Nitrides	1.029	1.031	<0.002
Total mineralization	991	1010	>0.19	pH		7.8	>0.6

The main difference between the water of Zhalanashkol and Alakol is the absence of Hg and the presence of iodides, bromides and fluorides (Tokpanov, 2021; 2016). The concentration of magnesium in Zhalanashkol is relatively high, and the total mineralisation of water is slightly higher in the west.

Field and laboratory studies have shown that the water in the eastern part of the lake (pH = 7.8) has a mineralisation of 991 mg/dm³, a dry residue of 3.024 g/l, and a total hardness of 0.4–5.6.



In the western part (pH = 8.8) - mineralization 1010 mg/dm³, dry residue 3.022 g/l, total hardness 0.39–5.3.



During field studies (May–October 2025), samples of therapeutic mud were collected from four deposits located in the eastern and south-eastern coastal zone of Lake Alakol. The geographical location of the sampling points was 46°05'24" N, 82°02'01" E (Figure 1). Deposits (No. 1 and No. 2) are located on the northern edge of the recreation area of the village of Kabanbay, at a distance of 300–400 m from the shore, in areas with close groundwater deposits. Two additional deposits (No. 3 and No. 4) were identified within 30–40 m of the lake shore, also in areas with shallow groundwater (Figure 1).

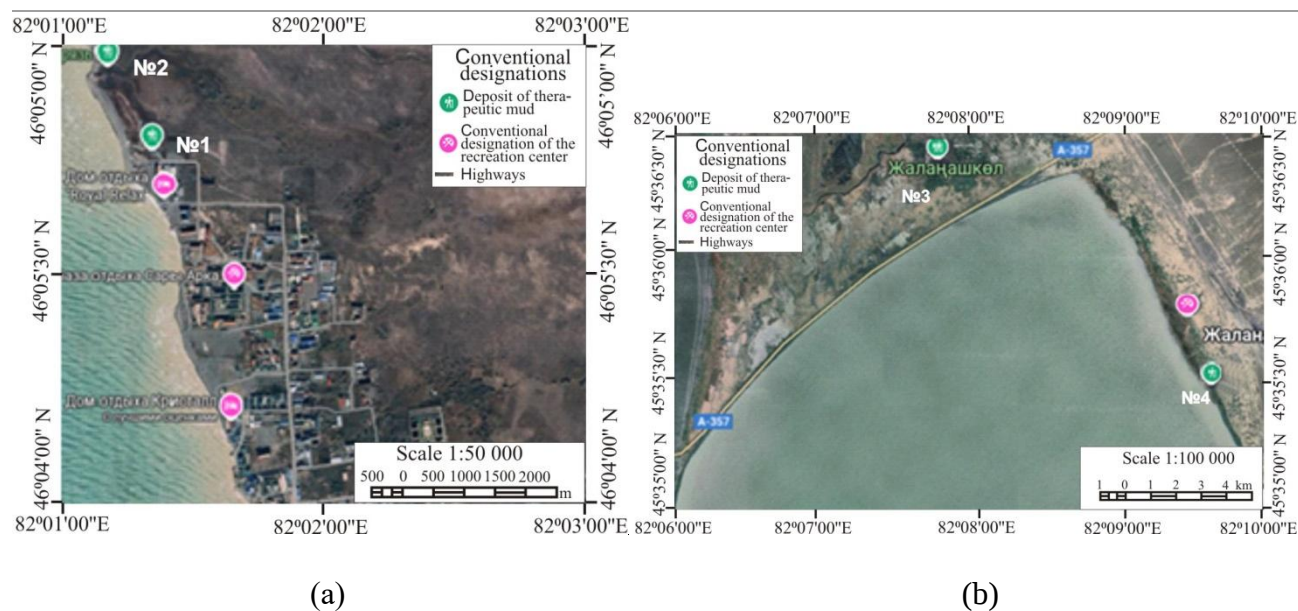


Figure 1. Satellite images of the recreation area of the village of Kabanbay on the eastern shore of Lake Alakol (a) (deposits No. 1 and No. 2) and the therapeutic mud deposits on the northern shore of Lake Zhalanashkol (b) (deposits No. 3 and No. 4) (Source Google maps, resolution 30 cm by 1 pixel)

Spectral and X-ray phase analysis showed that the composition of therapeutic muds No. 1 and No. 2 differs in the amount of chemical elements. Mud No. 2 contains more Ca (27.24 mg/g), Fe (14.34 mg/g), Al (11.44 mg/g), B (0.11 mg/g), Si (0.11 mg/g), Mn (0.52 mg/g), Sr (0.18 mg/g), Li (0.02 mg/g), Cr (0.51 mg/g), K (2.45 mg/g), while sample No. 1 has higher concentrations of P_2O_5 (3.36 g/kg), Mg (1.75 mg/g), Ag (1.03 mg/g). Cr and Si ions were detected only in the second sample (Figures 2, 3).

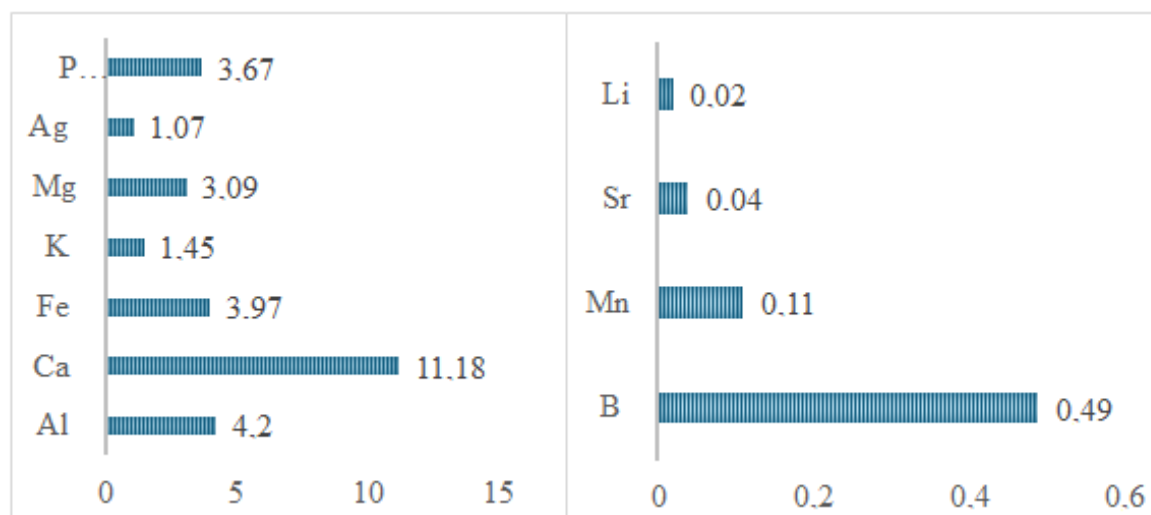


Figure 2. Chemical composition of therapeutic mud from the northern outskirts of the Kabanbay recreation area, mg/g (P_2O_5 , g/kg)

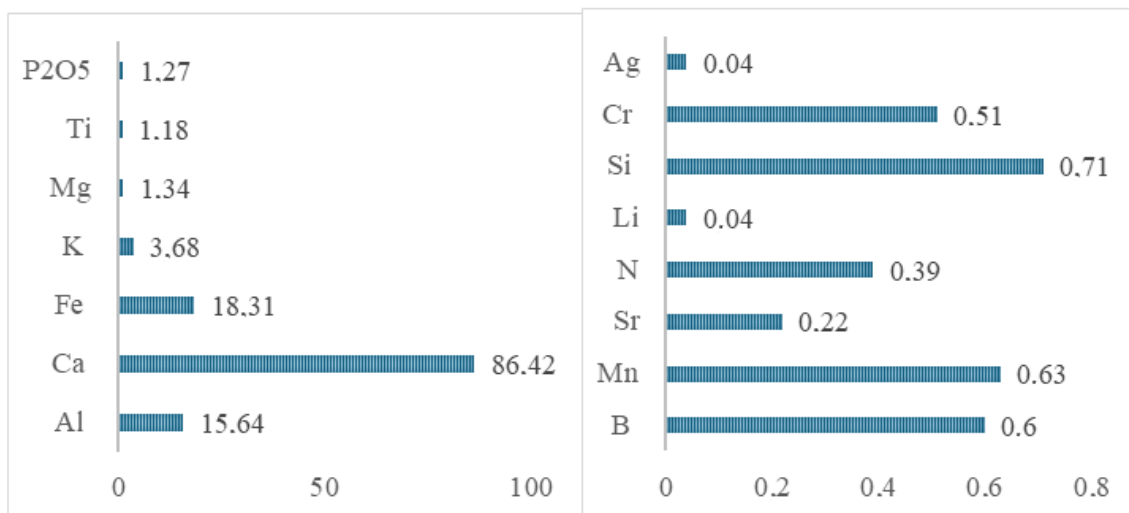


Figure 3. Chemical composition of therapeutic mud 300-400 m north of the Kabanbay recreation area on the eastern shore of Lake Alakol, mg/g (P₂O₅, g/kg)

Deposit No. 3 (east coast) contains more B (0.57 mg/g), Ni (0.34), Ti (1.78), Cr (0.53), Al (14.77), Fe (16.38 mg/g), K (4.28 mg/g), Li (0.01 mg/g), Mg (3.51 mg/g), Sr (0.02 mg/g), P₂O₅ (3.36 g/kg) than deposit No. 4 (north coast), where the concentrations of Ca (21.61 mg/g) and Mn (0.02 mg/g) are higher. Ag ions were recorded only in mud No. 4 (Figures 4, 5).

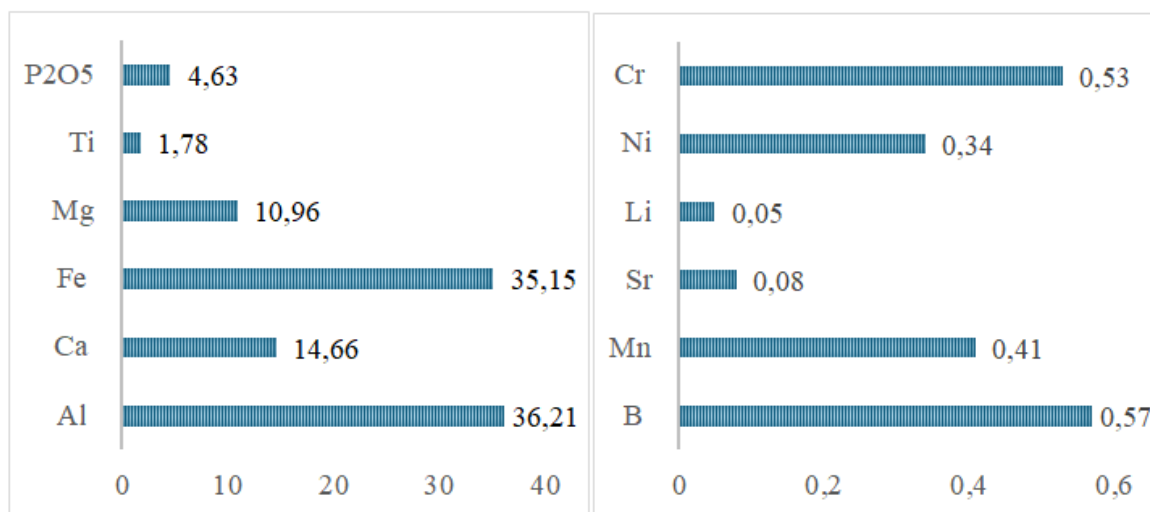


Figure 4. Chemical composition of therapeutic mud from deposit No. 3 in the eastern part of Lake Zhalanashkol, mg/g (P₂O₅, g/kg)

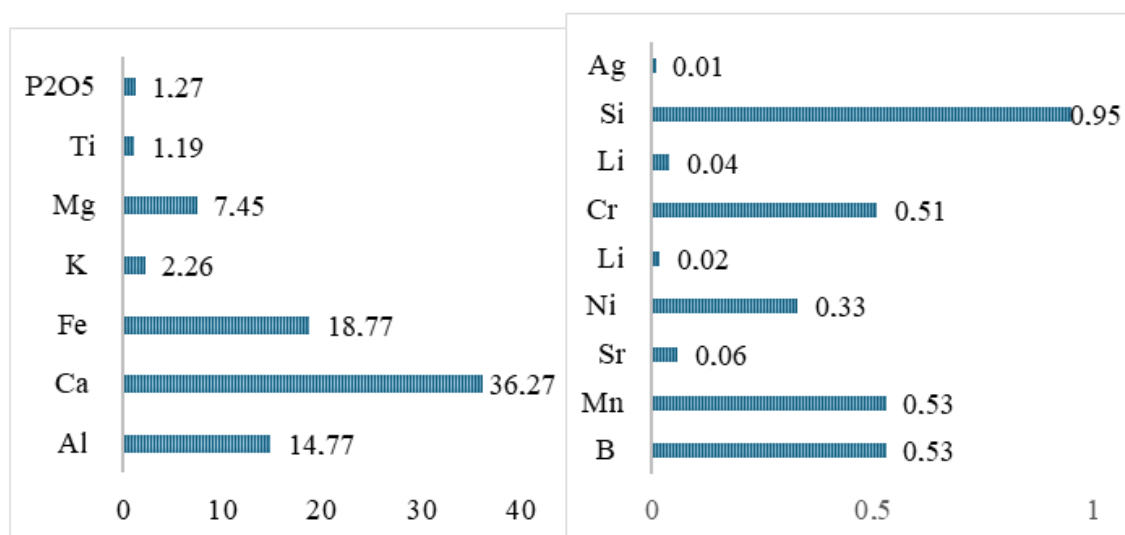


Figure 5. Chemical composition of therapeutic mud from deposit No. 4 in the northern part of Lake Zhalanashkol, mg/g (P₂O₅, g/kg)

The content of all chemical elements in therapeutic mud does not exceed the maximum permissible concentrations.

Field observations have established that in arid climates, lake water evaporation increases in summer, the concentration of dissolved substances rises, and a layer of highly mineralised silt forms at the bottom of water bodies. The mud is a three-component system: a clay solution, a medium-grained skeleton, and a fine-grained colloid.

The crystalline skeleton is composed of calcite, dolomite, heavy metals, organic plant residues, and silicates (up to 56%). Depending on the predominance of components, mud is classified as silicate, carbonate or mixed types.

According to Table 3, the therapeutic mud of Zhalanashkol belongs to the sulphide group.

Table 3. Composition indicators of sulfide therapeutic muds on the coast of Lake Zhalanashkol

№	Indicators	Standards, %	Actual
1.	Consistency, color, odor		The mud is black in color, quickly becomes covered with a gray film, spreads easily, has a dense consistency, smooth structure, and is odorless
2.	180°C humidity, % H ₂ O	37-70	26.15
3.	Diameter>0.25 mm cavity fill, %	< 3	0.76
4.	Filling types		Mineral crystals, plant remains
5.	Resistance to movement, dynes/cm ³	1500-2000	1260
6.	Loss on heating (900°C), %		12.99
7.	Heat capacity, cal/g, deg	no less 0.400	0.847
8.	Volume mass, g/dm ³	1.2-1.6	1.90
9.	Total mass of CO ₂ composition, %		3.62
10.	Saturated thermal index, total, pH		6.91
11.	Total proportion of H ₂ S, %		0.14

The colloidal fraction accounts for about 7% of the mass and includes organic acids, lipoids, pigments, oxide hydrates and sulphur, which determine the plasticity and therapeutic properties of the mud. The composition includes sulphates (62.38 g/100 g), chlorides (1.90 g/100 g), potassium (0.02 g/100 g), sodium (0.21 g/100 g), CaSO_4 (0.62%), MgSO_4 (0.83%), NaCl (2.78%), KCl (0.03%), MgCl_2 (92.35%).

The mud of the eastern shore is dominated by bischofite (MgCl_2), which is used in balneology for diseases of the musculoskeletal system, nervous system and cardiovascular disorders.

4. Discussion

This study is the first comprehensive assessment of the hydromineral resources of the eastern and south-eastern parts of the Alakol lake system. The results expand existing scientific knowledge about the hydrochemical characteristics of the lakes' waters and therapeutic muds, as well as the impact of anthropogenic factors on the region's ecosystems. In particular, a difference in the chemical composition of the waters and muds of the western and eastern parts of the lakes has been established, which can be used to refine approaches to the recreational and medical use of these resources.

In addition, the study proposes new approaches to the ecological assessment of the region's recreational potential and methods for monitoring the impact of tourism on the state of natural ecosystems. Particular attention is paid to the sustainable use of hydromineral resources in the context of growing anthropogenic impact and the need to create environmentally safe conditions for recreational development.

A comparative analysis of the chemical composition of the waters of Lake Alakol and Lake Zhalanashkol showed that both reservoirs are characterised by high mineralisation, which is due to their location in an arid climate zone, where high temperatures and minimal precipitation lead to intense evaporation, increasing the concentration of dissolved substances (Baimyrzayev et al., 2018). These patterns are also observed in other saltwater bodies around the world, such as the Great Salt Lake in the United States (Johnson et al., 2016) and the Dead Sea (Bawab et al., 2018), where high temperatures and a lack of freshwater inflow create similar conditions for mineralisation.

The differences in the chemical composition of the waters of the eastern and western parts of Lake Alakol and Lake Zhalanashkol are explained by hydrological features such as the degree of evaporation and river inflow, as well as the general circulation of water in the lake. Alakol is characterised by the inflow of fresh water from the Zhamantau and Yrgayty rivers, which leads to a decrease in mineralisation and the concentration of a number of chemical elements, such as sodium, calcium and magnesium. In contrast, Lake Zhalanashkol has a lower inflow of fresh water and, as a result, has a higher concentration of iodine, bromides and fluorides, which makes its waters potentially suitable for balneological procedures. This fact is confirmed by studies of the chemical composition of saltwater bodies such as the Dead Sea, where the high content of bromides and iodides is also due to geochemical processes (Bawab et al., 2018).

Statistical methods such as correlation and clustering were used for further analysis, which allowed us to identify the relationship between water mineralisation and temperature regimes. For example, a strong positive correlation was found between water temperature and mineralisation ($r = 0.75$, $p < 0.01$), which is confirmed by similar data for the Great Salt Lake (Johnson et al., 2016), where high water temperatures contribute to significant evaporation and mineral concentration. A negative correlation was also found between the level of freshwater inflow and mineralisation ($r = -0.60$, $p < 0.05$), confirming the influence of freshwater river inflow on the reduction of salt concentration in water, as observed in Lake Alakol.

The results of research into the therapeutic muds of both lakes confirm their unique chemical and mineralogical composition, which makes them suitable for medical use. The content of elements such as Ca, Mg, Fe, Al, Sr and Cr significantly affects the therapeutic properties of mud (Aktymbaeva et al., 2015; Mukaev, 2017; Amirgaliev et al., 2003; Tokpanov, 2016). The

predominance of bischofite (MgCl_2) in the muds of Lake Alakol deserves special attention. This mineral has a beneficial effect on diseases of the musculoskeletal system, which is also noted in scientific publications devoted to the medicinal properties of bischofite (Schwalfenberg et al., 2017).

The results of studies of the therapeutic muds of both lakes confirm their unique chemical and mineral composition. Differences in the content of Ca, Mg, Fe, Al, Sr, Cr and other elements determine the difference in therapeutic properties (Aktymbaeva et al., 2015; Mukaev, 2017; Amirgaliev et al., 2003; Tokpanov, 2016). The predominance of bischofite (MgCl_2) indicates its potential for widespread use in medical practice, especially for diseases of the musculoskeletal system.

The physicochemical structure of muds - the presence of colloids, clay phase and sulphide compounds - contributes to their high heat capacity, plasticity and ability to retain active substances.

At the same time, the increase in anthropogenic pressure in the recreation area on the eastern coast of Lake Alakol (500–600 thousand tourists per season) requires environmental regulation (Yessengabylova et al., 2025; Berezovikov, 2008). According to laboratory studies, pollution of Lake Alakol by anthropogenic factors such as solid waste and sewage significantly increases microbiological risks and deteriorates water quality. The average values of microbiological contamination of water exceed the maximum permissible concentrations (MPC) for coliphages (2.1×10^6 MPC/100 ml) and total coliform bacteria (1.5×10^6 MPC/100 ml), which exceeds the permissible MPC values by 1.5 times (SanR, 2023). Exceedances are also observed for chemical oxygen demand (COD), which indicates contamination of water with organic substances originating from runoff from coastal areas.

Pollution from solid household waste and sewage increases the risk of coastal ecosystem degradation. To stabilise the situation, it is necessary to introduce public-private partnership mechanisms, build treatment facilities and waste processing plants, and strengthen sanitary and environmental control in accordance with the Law of the Republic of Kazakhstan 'On Public-Private Partnership' dated 31 October 2015 No. 379-V RKZ (Law of the Republic of Kazakhstan dated October 2015).

Thus, the results of the studies confirm the high potential of the hydromineral resources of Lake Alakol and Lake Zhalanashkol for the development of medical and health tourism, provided that sustainable environmental management of the territory is ensured.

5. Conclusion

The development of tourism in the Alakol region has significant potential. Given that traditional holiday destinations are often unaffordable for the majority of the population, it is important to identify local and relatively inexpensive tourist and recreational resources. Tourism is a profitable sector of the national economy that contributes to the comprehensive development of the region's social infrastructure, the improvement of territories and the formation of more progressive forms of life and recreation for the population.

According to hydrological and geographical studies, as well as expeditionary and laboratory work carried out in 2024–2025, analysis of the composition of the water and therapeutic mud of Lake Alakol and Lake Zhalanashkol showed that the content of macro- and microelements, sulphates, nitrates, nitrides and carbonates does not exceed the maximum permissible concentrations.

The data obtained indicate that the composition of water and therapeutic mud complies with the sanitary and epidemiological requirements established by Decree No. 104 of the Government of the Republic of Kazakhstan dated 18 January 2012, applicable in sanatoriums and during physiotherapy procedures.

Consequently, for the effective use of therapeutic mud during the bathing season, compliance with sanitary standards and protection of the environment from pollution, it is advisable to open

specialised medical institutions (mud therapy centres) with resort doctors to serve holidaymakers in the recreation area.

Observations and analysis of statistical data have shown that on the eastern and western shores of Lake Alakol in the summer, due to the increase in the number of holidaymakers, the recreational load on the territory increases, which leads to environmental pollution with solid household waste and sewage.

Industry institutions in the Abai and Zhetysu regions, as well as the local authorities of the Makanchinsky and Alakol districts, should pay special attention to finding the best solutions to these issues within the framework of public-private partnerships.

6. Supplementary Materials: No supplementary materials.

7. Author Contributions

Conceptualization, methodology - M.J., Ye.T.; software, validation - R.M., A.Ye.; formal analysis, investigation - M.J., Ye.T.; writing, original draft preparation - Ye.T.; writing, review and editing - R.M., visualization - A.Ye.; supervision - M.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information

Jetimov, Myrzabay - Candidate of Technical Sciences, Zhetysu University named after I. Zhansugurov, I. Zhansugurov str. 187a, Taldykorgan, Kazakhstan, 040000; make_d61@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5103-4695>

Tokpanov, Yerkin – Candidate of Geographical Sciences, Zhetysu University named after I. Zhansugurov, I. Zhansugurov str. 187a, Taldykorgan, Kazakhstan, 040000; tokpanov1960@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2029-5278>

Mukhitdinova, Roza – lector, master, Zhetysu University named after I. Zhansugurov, I. Zhansugurov str. 187a, Taldykorgan, Kazakhstan, 040000; mukhitdinova.ra@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1820-4138>

Yessengabylova, Aiman – PhD, Zhetysu University named after I. Zhansugurov, I. Zhansugurov str. 187a, Taldykorgan, Kazakhstan, 040000; aiman_13_90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2956-5665>

9. Funding: This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992981).

10. Acknowledgements: absent

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

12. References

1. Akimzhanova, K., Sabitova, A., Mussabayeva, B., Kairbekov, Zh., Bayakhmetova, B., & Proch, J. (2024). Chemical composition and physicochemical properties of natural therapeutic mud of Kazakhstan salt lakes: a review. *Environ Geochem Health*, 46(2), 43. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01813-3>
2. Aktymbaeva, A. S., & Taukebaeva, M. T. (2015). Geoeological characteristics and assessment of the tourism and recreational potential of the Alakol region (Geoekologicheskaya harakteristika i ochenka turistsko-rekreacionnogo potenciala Alakol'skogo regiona in Russian). *Kazakhstan News (Novosti nauki Kazahstana)*, 2(124), 83-104. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-2-107-120.25>

3. Aktymbaeva, A. S. (2006). Hydroecology of the Alakol group of lakes (Gidroekologiya Alakol'skoj gruppy ozer in Russian). Hydrometeorology and ecology (Gidrometeorologiya i ekologiya), 2, 161-167.
4. Amirgaliev, N. A., Lopareva, T. Ya., Gogol', L. A., & Kanagatova, Sh. Ch. (2003). Hydrochemical regime of lakes in the Alakol depression (Gidrohimicheskij rezhim ozer Alakol'skoj vpadiny in Russian). Hydrometeorology and ecology (Gidrometeorologiya i ekologiya), 4, 115-125.
5. Artiola J. F., Pepper I. L., & Brusseau M. L. (2004). Environmental monitoring and characterization. Academic Press, 1-9. <https://doi.org/10.1016/B978-012064477-3/50003-5>
6. Baimyrzayev, K. M., Andasbayev, Ye. S., & Tokpanov, E. A. (2018). The value of the hydro resources of lake Zhalanashkol for the development of health tourism and recreation in the republic of Kazakhstan. *Espacios*, 1-7. <https://www.revistaespacios.com/a18v39n18/a18v39n18p20.pdf>
7. Bawab A. A., Bozeya, A., Abu-Mallouh, S., Abu Irmaileh, B., Daqour, I., & Abu-Zurayk, R. A. (2018). *The Dead Sea Mud and Salt: A Review of Its Characterization, Contaminants, and Beneficial Effects*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 305(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/305/1/012003>
8. Berezovikov, N. N. (2008). Works of the Alakol State Nature Reserve [Trudy Alakol'skogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika in Russian]. Almaty: Tethys, 252 pp.
9. Carbajo, J. M., & Maraver, F. Sulphurous mineral waters: new applications for health. (2017). *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 1, 8034084. <https://doi.org/10.1155/2017/8034084>
10. Česonienė, E. L., Šileikienė, D., Marozas, V., & Čiteikė, L. (2021). Influence of Anthropogenic Loads on Surface Water Status: A Case Study in Lithuania. *Sustainability*, 13, 4341. <https://doi.org/10.3390/su13084341>
11. Dzhetimov, M. A., Mazbayev, O., Asubayev, B. K., Yesengabylova, A., & Tokpanov, E. A. (2014). Physical And Chemical Microbiological Analysis Of The Therapeutic Mud Of «Kossor» Deposit Of Alakol Lake. *Life Science Journal*, 11(5), 217-221. <http://www.lifesciencesite.com>
12. Erdavletov, S., & Aktymbayeva, A. (2012). *Alakol lake as natural-recourse subsystem of local tourist-territorial recreational subsystem of Alakol basin*. International proceeding of chemical, biological and environmental engineering, 46, 80-86.
13. GS 26449.1-85 Stationary distillation and desalination units. Methods of chemical analysis of saline waters [GOST 26449.1-85 Ustanovki distillyacionnye opresnitel'nye stacionarnye. Metody himicheskogo analiza solenyyh vod in Russian]. 58-101.
14. GS 26449.2-85 Stationary distillation and desalination units. Methods of chemical analysis in the desalination of saline waters [GOST 26449.2-85 Ustanovki distillyacionnye opresnitel'nye stacionarnye. Metody himicheskogo analiza pri opresnenii solenyyh vod in Russian]. 103-124.
15. Iskakova, K. A., ZHakupova, A. A., Aktymbaeva, A. S., Abdreeva, S. H. T., & Ajzholova, G. R. (2013). The current state of the recreational potential of the Alakol basin (Sovremennoe sostoyanie rekreacionnogo potenciala Alakol'skogo bassejna in Russian). *KazNU Bulletin Geographical Series (Becmnyk Vestnik KazNU. Ser. Ekologicheskaya)*, 2/1(38), 60-64.
16. Johnson, W. P., Wurtsbaugh, W. A., Belovsky, G. E., & Baxter B. K. (2016). Geochemistry of Great Salt Lake. *Encyclopedia of Water*, 1-16. <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0072>
17. Kairgeldina, S., Tekebaev, K., Baurzhan, M., Absattarova, K., & Slivkina, N. (2024). Key Milestones and Events in the History of Kazakh Balneology. *Bulletin of rehabilitation medicine*, 23(6), 111-118. <https://doi.org/10.38025/2078-1962-2024-23-6-111-118>
18. Kishkenbayeva, Zh., & Sailaubay, E. (2024). Alakol's tourism industry and environmental challenges. *BIO Web of Conferences*, 145, 04027. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414504027>

19. Law of the Republic of Kazakhstan dated October 31, 2015 No. 379-V on public-private partnership (Zakon Respubliki Kazahstan ot 31 oktyabrya 2015 goda № 379-V "O gosudarstvenno-chastnom partnerstve in Russian). *Reference control bank of the NPA of the Republic of Kazakhstan (Etalonnyj kontrol'nyj bank NPA Respubliki Kazahstan)*. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1500000379>
20. Moiseenko, T. I. (2022). Surface water under growing anthropogenic loads: from global perspectives to regional implications. *Wate*, 14(22), 3730. <https://doi.org/10.3390/w14223730>
21. Mukaev Zh. T. (2017). Geocological assessment of territorial recreational systems of the lake basin Alakol (Geoekologicheskaya ocenka territorial'nyh rekreacionnyh sistem bassejna ozero Alakol' in Russian). Monografiya. Almaty, «Evero», 208.
22. Mukaev, J. T., Dzhanaaleeva, K. M., David, L. D., Ozgeldinova, Zh. O., Beisembayeva. M. A., Ospan, G. T. Kishkenbayeva, Zh., & Sailaubay, E. (2017). Alakol's tourism industry and environmental challenges. *Applied ecology and environmental research*, 15(4), 1733-1744. <https://doi.org/10.30892/gtg.49329-1113>
23. Quattrini, S., Pampaloni, B., & Brandi, M. L. (2017). Natural mineral waters: chemical characteristics and health effects. (2017). *Clinical Cases in Mineral and Bone Metabolism*, 13(3), 173. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5318167/>
24. On approval of the Sanitary Rules "Sanitary and Epidemiological Requirements for Water Sources, Water Intake Sites for Domestic and Drinking Purposes, Domestic and Drinking Water Supply, and Places of Cultural and Domestic Water Use and the Safety of Water Bodies" (Ob utverzhdenii Sanitarnyx pravil "Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k vodoistochnikam, mestam vodozabora dlya khozyajstvenno-pit'evykh tselej, khozyajstvenno-pit'evomu vodosnabzheniyu i mestam kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya i bezopasnosti vodnykh ob"ektov in Russian). <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2300031934>
25. Sánchez, A. D., Álvarez-García, J., & Del Río-Rama, M. C. (2014). Active tourism research: a literature review (1975-2013). *ROTUR, Revista de Ocio y Turismo*, 8, 62-76.
26. Snegireva, N. E. (1970). Chemistry of surface waters of the Sasyk-Alakol basin (Himiya poverhnostnykh vod Sasyk-Alakol'skogo bassejna in Russian). [Abstract of a dissertation for a candidate of chemical sciences] Avtoreferat dissertatsii kandidata khimicheskikh nauk.
27. Schwalfenberg G. K, & Genuis S. J. (2017). The Importance of Magnesium in Clinical Healthcare. *Scientifica (Cairo)*, 28, 4179326. <https://doi.org/10.1155/2017/4179326>
28. Tokpanov, E., Atasoy, E., Mendybayev, E., Abdimanapov, B., Andasbayev, Ye., & Mukhitdinova, R. (2021). Prospects for the development of health tourism on lake Ray in the Almaty region of the Republic of Kazakhstan. *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 37(3), 888-893. <https://doi.org/10.30892/gtg.37320-722>
29. Tokpanov, E. A. (2016). Hydromineral recreational resources of Lake Zhalanashkol. *Journal of Geography and Environmental Management*, 2(43), 304-309. <https://doi.org/10.26577/JGEM.2016.2.554>
30. Totic, M., Restrepo, J. D., Izquierdo, A., Lonin, S., Martins, F., & Escobar, R. (2018). An integrated approach for the assessment of land-based pollution loads in the coastal zone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 211, 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.08.035>
31. Wassie, S. B. (2020). Natural resource degradation tendencies in Ethiopia: a review. *Environmental systems research*, 9(1), 1-29 <https://link.springer.com/article/10.1186/s40068-020-00194-1>
32. Yessengabylova, A. K., Tokpanov, E. A., Jetimov, M. A., & Tuleubayev, Z. Z. (2025). Elaboration of effective mechanisms for the development of recreational tourism on the Alakol coast. *Tourism, leisure and hospitality*, 2(9), 74-86. <https://doi.org/10.59649/2959-5185-2025-2-74-86>

Алакөл көлдер жүйесінің шығыс және оңтүстік-шығыс бөліктерінің гидроминералдық рекреациялық ресурстарын геоэкологиялық тұрғыдан бағалау

Мырзабай Джетимов, Токпанов Еркін, Мухитдинова Роза, Айман Есенгабылова

Аңдатпа. Мақалада Абай облысының оңтүстік-шығыс бөлігінде орналасқан Алакөл-Жаланапшкөл көлі жүйесінің гидроминералдық ресурстарының табиғи және бальнеологиялық сипаттамалары қарастырылады. Зерттеу құрғақ климатта судың химиялық құрамы мен балшық шөгінділерінің кеңістіктік өзгергіштігін ескере отырып жүргізілді. 2024-2025 жылдары жүргізілген далалық және зертханалық бақылаулар минералды сулар мен емдік балшықтардың физика-химиялық сипаттамаларын анықтауға, сондай-ақ олардың рекреациялық және сауықтыру мақсаттары үшін әлеуетін бағалауға бағытталған. Далалық жұмыстар шығыс, батыс, солтүстік және оңтүстік-шығыс жағалау аймақтарын, соның ішінде белсенді балшық жиналатын аймақтарды қамтыды. «Шәкәрім университеті» КЕАҚ және Жетісу облысының санитарлық-эпидемиологиялық қызметінің зертханаларында жүргізілген талдаулар негізгі химиялық элементтер мен минералдардың концентрациясы қолайлы санитарлық нормаларға сәйкес келетіндігін көрсетті. Шығыс және Батыс секторлары арасындағы су химиясындағы айырмашылықтар гидрологиялық және климаттық факторларға байланысты екені анықталды. Композицияда сульфаттар, хлоридтер және бишофит ($MgCl_2$) басым, бұл кірге айқын емдік қасиеттер береді. Нәтижелер көлдердің жоғары бальнеологиялық құндылығын және экологиялық қауіпсіздігін растайды, бұл олардың сауықтыру туризмінде, бальнеотерапияда және тұрақты аймақтық дамуда әлеуетті пайдаланылуын негіздейді.

Түйін сөздер: Алакөл; Жаланапшкөл; гидроминералдық ресурстар; емдік балшық; бишофит; рекреация; туризм; бальнеология; химиялық құрамы; тұрақты дамуы.

Геоэкологическая оценка гидроминеральных рекреационных ресурсов восточной и юго-восточной части системы Алакольских озер

Мырзабай Джетимов, Токпанов Еркін, Мухитдинова Роза, Айман Есенгабылова

Аннотация. В статье рассматриваются природные и бальнеологические характеристики гидроминеральных ресурсов озерной системы Алаколь-Жаланапшколь, расположенной в юго-восточной части области Абай. Исследование проводилось в засушливом климате с учетом пространственной изменчивости химического состава воды и грязевых отложений. Полевые и лабораторные наблюдения, проведенные в 2024–2025 годах, были направлены на определение физико-химических характеристик минеральных вод и лечебных грязей, а также на оценку их потенциала для рекреационных и оздоровительных целей. Полевые работы охватывали восточную, западную, северную и юго-восточную прибрежные зоны, включая районы активного накопления грязи. Анализы, выполненные в лабораториях НАО «Шәкәрім университет» и санитарно-эпидемиологической службы области Жетісу, показали, что концентрации основных химических элементов и минералов соответствуют приемлемым санитарным нормам. Было установлено, что различия в химическом составе воды между восточным и западным секторами зависят от гидрологических и климатических факторов. В составе преобладают сульфаты, хлориды и бишофит ($MgCl_2$), что придает грязям выраженные лечебные свойства. Результаты подтверждают высокую бальнеологическую

ценность и экологическую безопасность озер, что обосновывает их потенциальное использование в оздоровительном туризме, бальнеотерапии и устойчивом региональном развитии.

Ключевые слова: Алаколь; Жаланашколь; гидроминеральные ресурсы; лечебная грязь; бишофит; рекреация; туризм; бальнеология; химический состав; устойчивое развитие.

Analysis of spatio-temporal changes of surface water within the Semipalatinsk test site based on the Google Earth Engine platform

Nazym Zhengissova^{1,2}, Omirzhan Taukebayev^{2,3}, Kamshat Temirbayeva^{2,*} and Aizhan Assylbekova²

¹Space Technologies, and Remote Sensing Center, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

nazym.zhengissova@kaznu.edu.kz

²Department of Cartography and Geoinformatics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

nazym.zhengissova@kaznu.edu.kz;

omirzhan.taukebayev@kaznu.edu.kz;

kamshat.temirbayeva@kaznu.edu.kz;

aizhan.assylbekova@kaznu.edu.kz

³Cluster of Engineering and High Technologies, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

omirzhan.taukebayev@kaznu.edu.kz

*Correspondence: kamshat.temirbayeva@kaznu.edu.kz

Citation: Zhengissova, N., Taukebayev, O., Temirbayeva, K., Assylbekova, A. (2025). Analysis of spatio-temporal changes of surface water within the Semipalatinsk test site based on the Google Earth Engine platform. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 153(4), 106-121.

<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-106-121>

Academic Editor:
N.Ye. Ramazanova

Received: 31.10.2025

Revised: 18.10.2025

Accepted: 18.10.2025

Published: 24.12.2025



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

Abstract: The article is devoted to analyzing the dynamics of spatio-temporal changes in water bodies within the Semipalatinsk Test Site using remote sensing data based on the Google Earth Engine platform, with the aim of developing a map of surface water and irrigation systems to support landscape planning of the area. Landsat and Sentinel-2 satellite imagery, ERA5-Land climatic data, and the SRTM digital elevation model were used as the primary input datasets. Water surfaces were extracted using the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) method. The results revealed that the largest extents of water surfaces were observed in years characterized by cold and snowy winters (2000 and 2010), whereas the smallest extents occurred during warm and low-snow periods (1996, 2012, and 2024). The proportion of temporary water bodies exceeds 60%, reflecting the instability of the hydrological regime and its strong dependence on climatic variability. The use of modern platforms such as Google Earth Engine for identifying spatio-temporal changes in water bodies has proven to be effective and demonstrates great potential for water resource management and dynamic assessment. The obtained results can be applied for environmental monitoring and landscape planning in the development of the former test site areas for agricultural purposes.

Keywords: water bodies; Google Earth Engine; remote sensing data; the Semipalatinsk test site (STS)

1. Introduction

Remote sensing is a key tool for monitoring and assessing surface water bodies. The advantages of high temporal resolution and repeated observations provided by optical satellite imagery make it widely used for the mapping and monitoring of water resources (Hossain et al., 2023).

The analysis of spatio-temporal changes in water bodies using the Google Earth Engine (GEE) platform represents a significant advancement in the field of environmental monitoring and water resource management (Ngamile et al., 2025; Zhang et al., 2022). It enables comprehensive analysis of spatio-temporal datasets and provides a cloud-based solution for fast and scalable processing of remote sensing data (Li et al., 2022; Zhao & Bang, 2024).

This approach employs advanced methodologies, including time series of remote sensing data and machine learning-based classification methods, to assess the dynamics of surface water. Google Earth Engine (GEE) has proven its effectiveness in visualizing water presence and analyzing the factors influencing changes in water bodies (Zhao & Bang, 2024; Alzurqani et al., 2024; Sherjah et al., 2023). However, the use of GEE for water body analysis is associated with several challenges. The availability and quality of data remain significant constraints. Methodological limitations, such as the potential misclassification of adjacent vegetation types, may also affect the reliability of the results. Moreover, the integration of community-sourced data presents both opportunities and challenges for the validation of satellite observations, highlighting the need for collaborative efforts in data collection and analysis (Alzurqani et al., 2024; Sherjah et al., 2023).

The aim of this study is to identify the spatio-temporal changes of surface water within the Semipalatinsk Test Site using satellite data and the analytical capabilities of the Google Earth Engine platform.

2. Materials and methods

2.1. Study Area

The Semipalatinsk Test Site (STS) is located in the eastern part of Kazakhstan, at the junction of the Abai, Pavlodar, and Karaganda regions, covering an area of approximately 18300 km² (Figure 1).

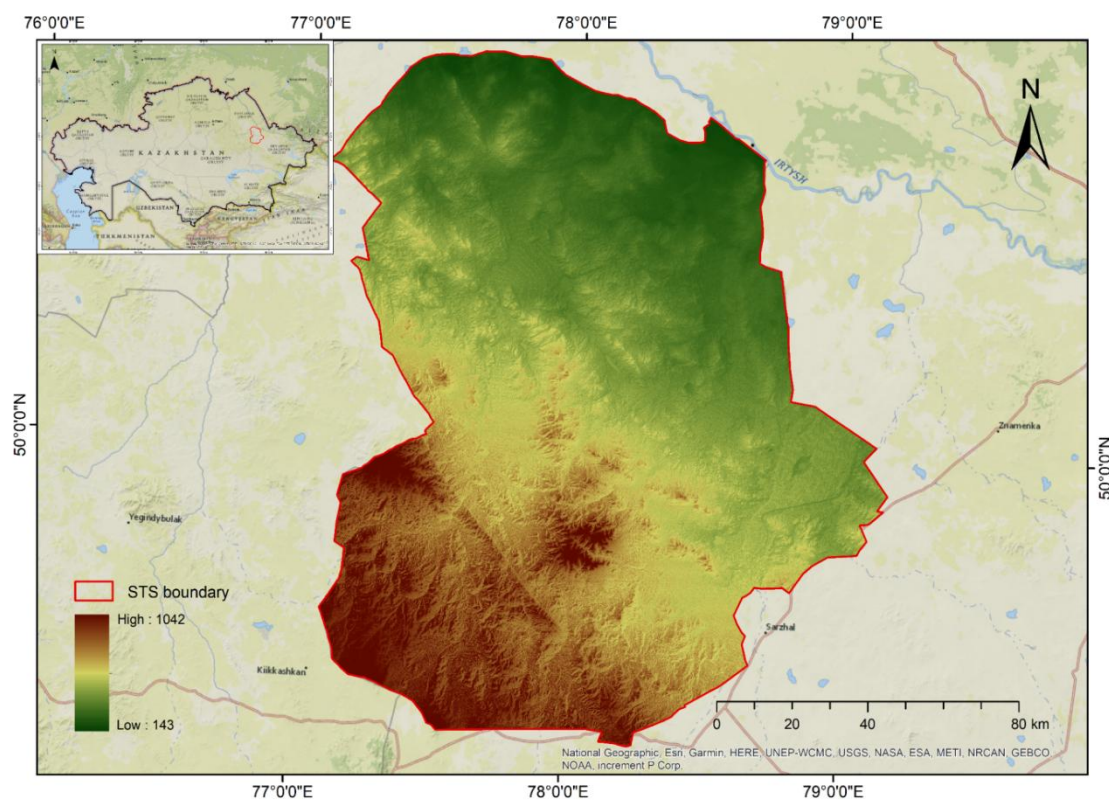


Figure 1. Study area

The territory of the test site extends from the Irtysh River valley southwestward for approximately 180 km and lies within the eastern part of the Kazakh Uplands, which are characterized by an arid, sharply continental climate. The mean annual air temperature ranges from +0.6°C to +5°C, and the annual precipitation amounts to 250–300 mm.

The hydrographic network is represented by the Shagan River with its tributary Ashchysu, as well as by small streams and lakes that become active during the spring flood period. In summer, most of the water bodies dry up, forming saline depressions. The primary source of water supply is snowmelt, which accounts for up to 95% of the annual runoff.

A distinctive feature of the study area is the complex combination of natural and anthropogenic factors resulting from the long-term use of the site for nuclear weapons testing during 1949–1989. This analyzes the spatio-temporal dynamics of water bodies crucial for assessing the current state and transformation of the region's aquatic ecosystems (Nazarbayev et al., 2016; Batyrbekov et al., 2021).

2.2. Data Sources

This study utilized all available surface imagery from Landsat (TM, ETM+, and OLI) and Sentinel-2 MSI covering the territory of the Semipalatinsk Test Site for the period 1996–2024. The analysis was performed on the Google Earth Engine (GEE) platform, followed by visualization and map composition in ArcGIS Pro.

For each image, a cloud, shadow, and snow masking function was applied to ensure high-quality scenes suitable for analyzing the dynamics of water bodies within the test site. Only images acquired during the vegetation period (May–September) were used in the analysis, which made it possible to minimize seasonal and atmospheric distortions.

A total of 90 scenes were used in the study, including 30 Landsat scenes (6 years $\times$ 5 scenes per year) and 60 Sentinel-2 scenes (2 years $\times$ 2 coverages $\times$ 15 scenes per year). In addition, the SRTM digital elevation model with a spatial resolution of 30 m was used to refine watershed boundaries and to analyze the influence of orography on the distribution of water bodies.

For the analysis of climatic factors, ERA5 reanalysis data (precipitation and air temperature) for the period 1996–2024 were used. These data made it possible to establish the relationship between changes in the extent of water bodies and the climatic conditions of the region (Gorelick et al., 2017; Drusch et al., 2012; Hersbach et al., 2020; Farr et al., 2007).

2.3. Processing Methods

The methodology applied for analyzing the spatio-temporal changes in water bodies using the Google Earth Engine (GEE) platform included several key components, such as data collection, classification methods, and accuracy assessment (Mutanga & Kumar, 2019). The workflow is illustrated in Figure 2, which shows the sequence of analysis stages. The approach is based on the integration of multitemporal satellite data from Landsat and Sentinel-2, climatic indicators from ERA5-Land, and the SRTM digital elevation model (Hansen & Loveland, 2012; Kaplan & Avdan, 2017; Yilmaz, 2023; Rodriguez et al., 2006). The use of the cloud-based GEE platform ensured consistent data processing, automation of calculations, and reproducibility of the results.

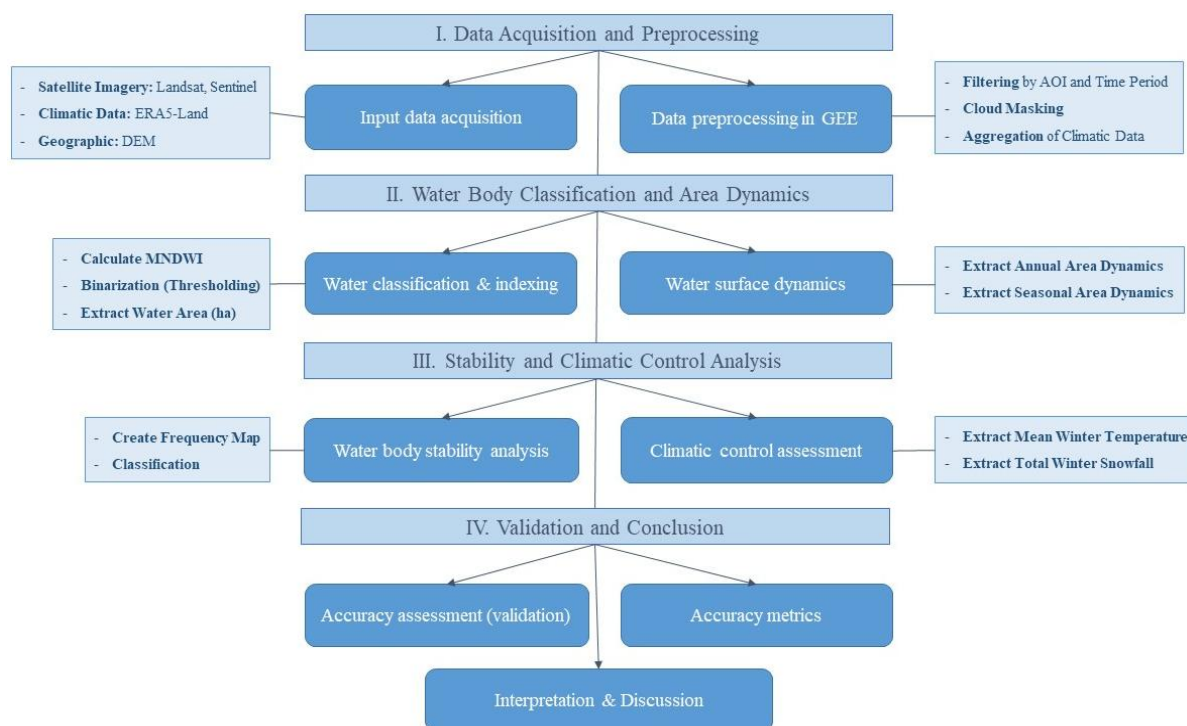


Figure 2. Workflow of the methodology for analyzing water bodies using GEE

The study covers six representative temporal snapshots – 1996, 2000, 2010, 2012, 2020, and 2024. This selection was determined both by the availability of high-quality satellite data and by the need to reflect key stages in the hydrological evolution of the region. Each of these periods characterizes a typical state of the water systems under different climatic and anthropogenic conditions. To minimize seasonal and atmospheric distortions, only images acquired during the vegetation period (May–September) were used, when water surfaces are most distinctly expressed in satellite imagery. Such a discrete observation structure made it possible to capture the stage-by-stage changes in the configuration and area of water bodies over nearly three decades and to ensure comparability between temporal intervals (Pekel et al., 2016; Xu, 2006).

Preprocessing of the data included spatial clipping to the boundaries of the test site and atmospheric noise removal using the tools available in Google Earth Engine (GEE). After masking, the reflectance values of the images were normalized to ensure the comparability of data obtained from different sensors.

Water surface extraction was performed using the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) (Gorelick et al., 2017):

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

where ρ_{Green} and ρ_{SWIR1} are the reflectance values in the green (0.52–0.60 μm) and shortwave infrared (1.55–1.75 μm) bands, respectively.

For the historical composites (2000 and 2010), an MNDWI threshold of > 0.30 was applied, whereas for the multiyear analysis and Sentinel-2 data, a more sensitive threshold of > 0.0 was used (Xu, 2006; Ji et al., 2009). This approach made it possible to account for both permanent and shallow or temporary water bodies.

The water frequency (WF) was calculated based on binary water masks, representing the proportion of observations in which a pixel was classified as a water surface:

$$WF = \frac{\sum N_{water}}{\sum N_{valid}} \times 100\%$$

$$WF = \sum N_{valid} \sum N_{water} \times 100\% \quad (2)$$

where N_{water} is the number of observations in which the pixel was classified as water, and N_{valid} is the total number of valid observations for the pixel.

Pixels with fewer than 20 valid observations were excluded from the analysis (Pekel et al., 2016; Donchyts et al., 2016). Based on the WF values, categories of water body persistence were identified: temporary (WF < 40%), semi-permanent (40–70%), and stable ($\geq 70\%$) water bodies (Pekel et al., 2016).

To analyze the climatic influence, ERA5-Land data (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [ECMWF], 2021) were used, including mean winter air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and total snowfall (mm) for the period from November to March. These parameters were averaged within the boundaries of the Semipalatinsk Test Site and compared with the time series of water body areas. Changes in surface water extent were quantified using the dynamic coefficient K (Pekel et al., 2016):

$$K = \frac{S_b - S_a}{S_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%$$

$$K = ((S_b - S_a) / S_a) \times (1 / T) \times 100\% \quad (3)$$

where S_a and S_b are the surface water areas at the beginning and end of the period, respectively, and T is the duration of the interval (in years).

To verify the classification accuracy, a quantitative assessment was conducted using reference samples from Sentinel-2 and Google Earth imagery based on a standard confusion matrix. Validation was performed using 150 randomly selected control points located within the study area. The year 2010, characterized by the maximum floodwater extent (14993.96 ha), was used as the reference period, allowing for the evaluation of the model's performance under extreme hydrological conditions.

Comparison of the “water” and “land” classes derived from MNDWI with visual interpretation of high-resolution imagery showed a high degree of consistency. The calculated accuracy metrics were as follows: overall accuracy (OA) – 94.0%, producer's accuracy (PA) for the “water” class – 75.0%, and user's accuracy (UA) – 85.7%. The obtained results confirm the reliability and reproducibility of the classification, providing a robust basis for further analysis of the spatial dynamics of water bodies and their climatic relationships (Gorelick et al., 2017; U.S. Geological Survey [USGS], 2022).

Thus, the proposed methodology integrates automated processing of multitemporal satellite data and statistical analysis of climatic factors, providing a comprehensive understanding of the spatio-temporal dynamics of water systems within the Semipalatinsk Test Site.

3. Results

3.1. Spatial distribution and long-term dynamics of water bodies

The Landsat and Sentinel-2 satellite composites (Figure 3) clearly reveal the spatial and temporal variations of water bodies within the Semipalatinsk Test Site over the period 1996–2024.

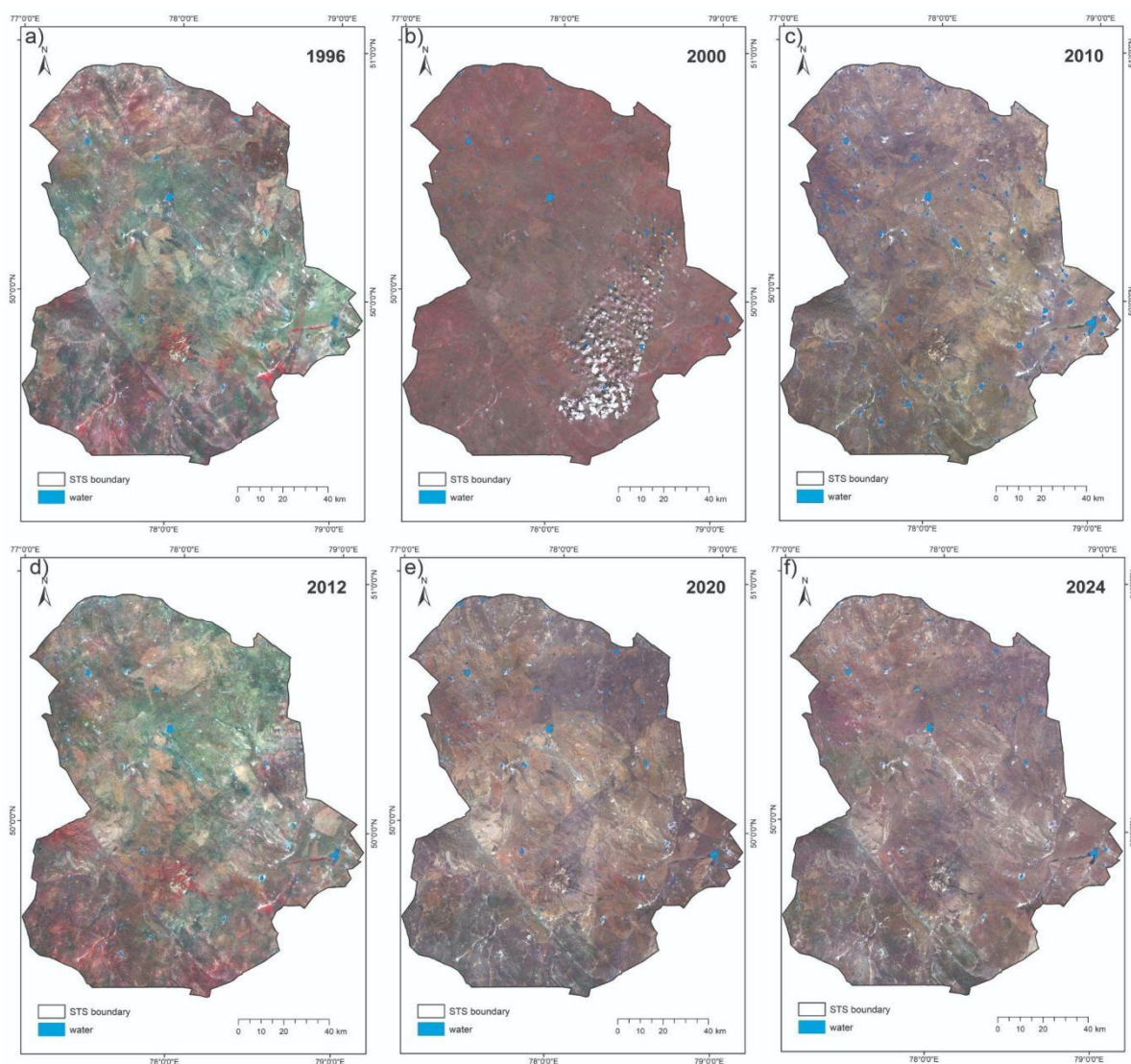


Figure 3. Spatial distribution of water bodies within the Semipalatinsk Test Site: (a) 1996; (b) 2000; (c) 2010; (d) 2012; (e) 2020; (f) 2024.

The water surfaces are mainly confined to the valleys of the Shagan and Ashchysu rivers, as well as to the closed depressions in the eastern and southeastern parts of the test site. In the early imagery (1996), water bodies were limited to small depressions, whereas by 2000 and 2010, a significant expansion of the water surface area was observed, particularly along the Shagan River channel and within the central lowlands. After 2010, a gradual reduction in the extent of water bodies was recorded, which is confirmed both visually and quantitatively.

According to Table 1, the total area of water surfaces varied from 4512.9 ha in 1996 to 14993.9 ha in 2010, accounting for 0.24% to 0.81% of the total area of the test site. The minimum values were recorded in 1996 and 2012, which corresponded to low-snow winters, while the maximum values occurred in 2000 and 2010. Thus, the amplitude of area fluctuations reached nearly a threefold difference, reflecting the extreme sensitivity of the hydrological regime to climatic variations during the winter–spring period.

Table 1. Water body areas within the Semipalatinsk Test Site area (1996-2024)

Year	Area of water bodies, ha	Share of territory, %
1996	4512.92	0.24
2000	7654.16	0.41
2010	14993.96	0.81
2012	4456.66	0.24
2020	6428.99	0.34
2024	5685.82	0.30

3.2. Spatial Structure Based on the MNDWI Index

The cartographic data derived from the MNDWI index (Figures 4 and 5) made it possible to visually assess the spatial changes in water surfaces within the test site and using Lake Ashchysu as an example.

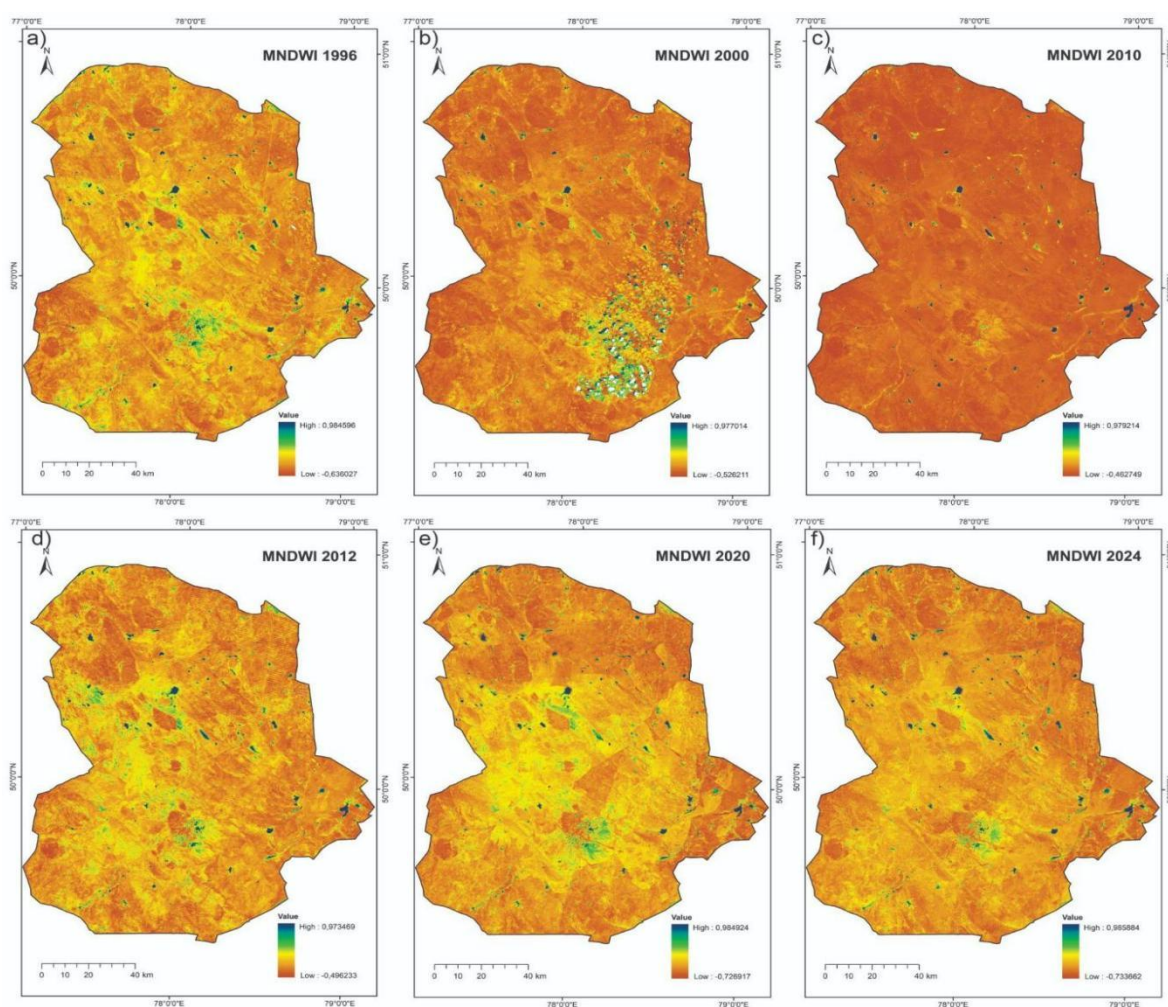


Figure 4. Spatial distribution of water bodies based on the MNDWI index: (a) 1996; (b) 2000; (c) 2010; (d) 2012; (e) 2020; (f) 2024

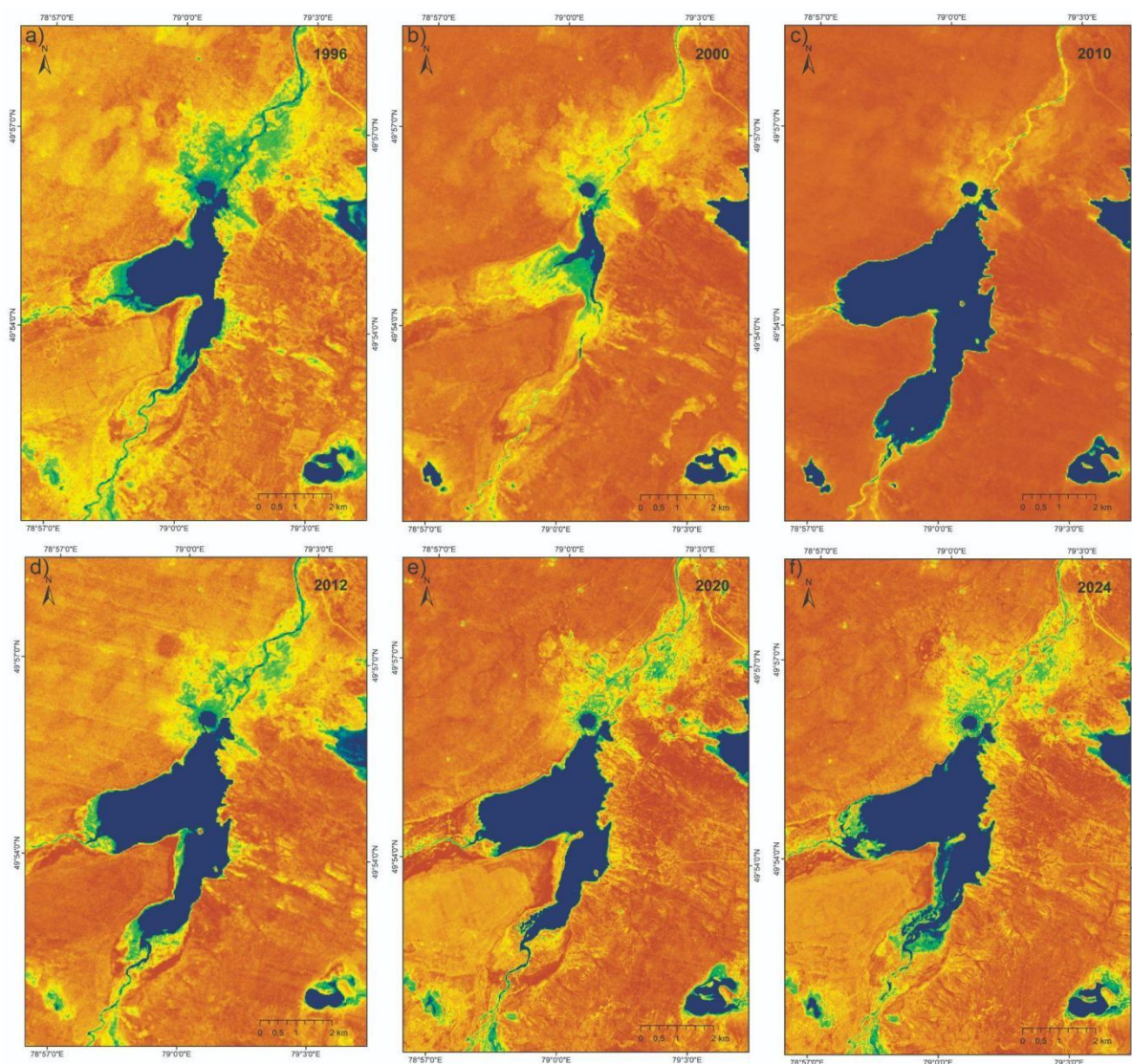


Figure 5. Dynamics of Lake Ashchysu surface area based on satellite data: (a) 1996; (b) 2000; (c) 2010; (d) 2012; (e) 2020; (f) 2024

On the MNDWI maps, zones of permanent and temporary water bodies are clearly distinguishable. The highest positive index values (above 0.3) are associated with the Shagan River valley, the depressions in the southeastern part of the test site, and the water area of Lake Ashchysu, where water persists throughout the entire vegetation period.

In the central part of the test site and in the interfluvial areas, regions with moderate or negative MNDWI values are observed, corresponding to seasonal water bodies that fill during the spring flood and dry up in summer.

In 2000 and 2010, the most extensive distribution of water bodies was observed, particularly in the area of Lake Ashchysu, whereas in 2020–2024, the water surfaces became more fragmented and localized. This indicates a gradual reduction of temporary water bodies and an overall decline in the water availability of the territory over recent decades.

3.3. Interannual and Seasonal Variability

The graphs of interannual and seasonal dynamics (Figure 6) show that the area of water surfaces within the test site varies greatly from year to year. In spring, water bodies consistently occupy a significantly larger area than in summer or autumn, which is associated with the inflow of meltwater.

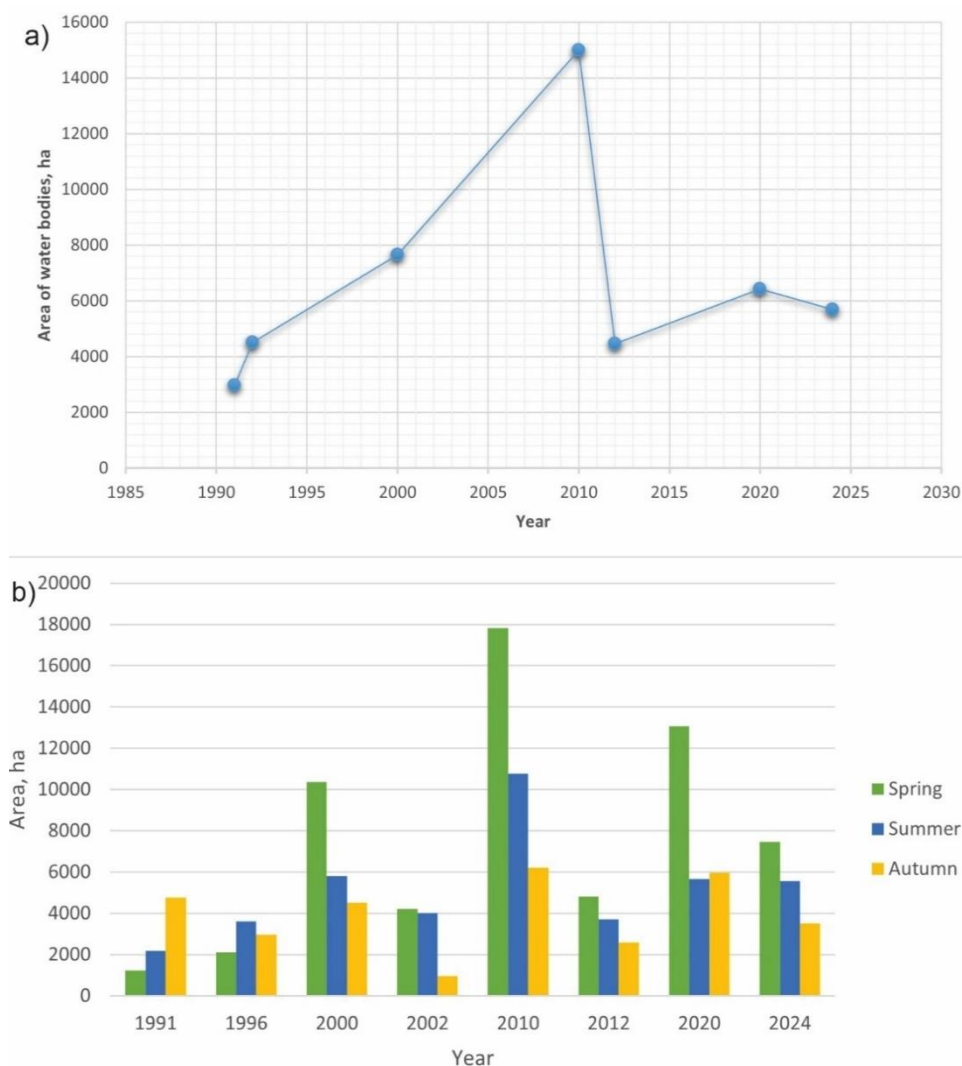


Figure 6. Changes in the surface water area within the Semipalatinsk Test Site: (a) interannual variability; (b) seasonal variability

According to Table 2, in the spring of 2010, the area of water bodies reached 17,826 ha, decreasing to 10774 ha in summer and 6202 ha in autumn. This indicates a typical spring maximum followed by a gradual reduction of water surface area throughout the summer. In dry years (1996 and 2012), the spring water area did not exceed 2–5 thousand hectares, reflecting weak floods and low snow accumulation during the winter.

In recent years (2020–2024), a trend toward faster drying of water bodies has been observed, with their areas starting to decrease as early as mid-summer. This is associated with an increase in mean air temperature and warmer winters, which cause earlier snowmelt and faster evaporation.

Since 2020, the region has shown a tendency toward an earlier peak in water availability and accelerated drying of temporary lakes by mid-summer. This corresponds to an increase in mean air temperature by 1.5–2 °C above the climatic norm, enhancing evaporation and shortening the duration of the water phase in small ponds and lakes. Such changes are particularly evident in the central part of the test site, where previously stable water bodies have gradually acquired a seasonal character.

Table 2. Seasonal dynamics of surface water area

Year	Spring, ha	Summer, ha	Autumn, ha
1996	2106.16	3605.7	2947.36
2000	10371.52	5813.7	4515.5
2002	4205.9	4020.11	949.8
2010	17826.13	10774.09	6202.42
2012	4810.16	3701.59	2582.64
2020	13072.35	5654.45	5966.43

3.4. Stability of Water Surfaces

The analysis of water surface stability (Figure 7) shows that temporary and seasonal water bodies prevail within the territory of the test site. Their share exceeds 60%, whereas permanent water bodies occupy about 30–35% of the total area (Table 3).

Table 3. Distribution of the water surface area by stability categories (1996-2024)

Category (Class)	Area, km ²	Area, ha	Share of Total Water, %	Share of territory, %
Permanent water	44.05	4405	31.91	0.24
Seasonal water	94.10	9410	68.09	0.51

The “River Network” layer data were taken from a previous study conducted by the authors. There are four large river basins located on the territory of the Semipalatinsk Test Site. These are the Saryozen river from south to north, Aschyozek and Karabulak from the center to the north, and Shagan from the south to the northeast. They are all left tributaries of the Irtys River (Valeyev et al., 2025).

The total length of the talwegs of the rivers in the study area is 13874 km, with sixth-order watercourses accounting for about 361 km or 2% of the total length of temporary and permanent watercourses. The main length of 95% of the talwegs, considering the factors of arid climate and steppe landscapes, falls on temporary watercourses. In summer, they form a dry gully-beam network or inconspicuous depressions. They are formed mainly during floods due to meltwater flows, as well as during precipitation in the warm season (Valeyev et al., 2025).

Permanent water bodies are located in the valleys of the Shagan and Ashchysu rivers, as well as in the southeastern depressions where water persists for longer periods. Temporary and seasonal water bodies occur in the central and western parts of the test site and appear only in years with heavy snowfall. This distribution indicates that the region’s hydrological system is highly dependent on weather conditions and exhibits an unstable character.

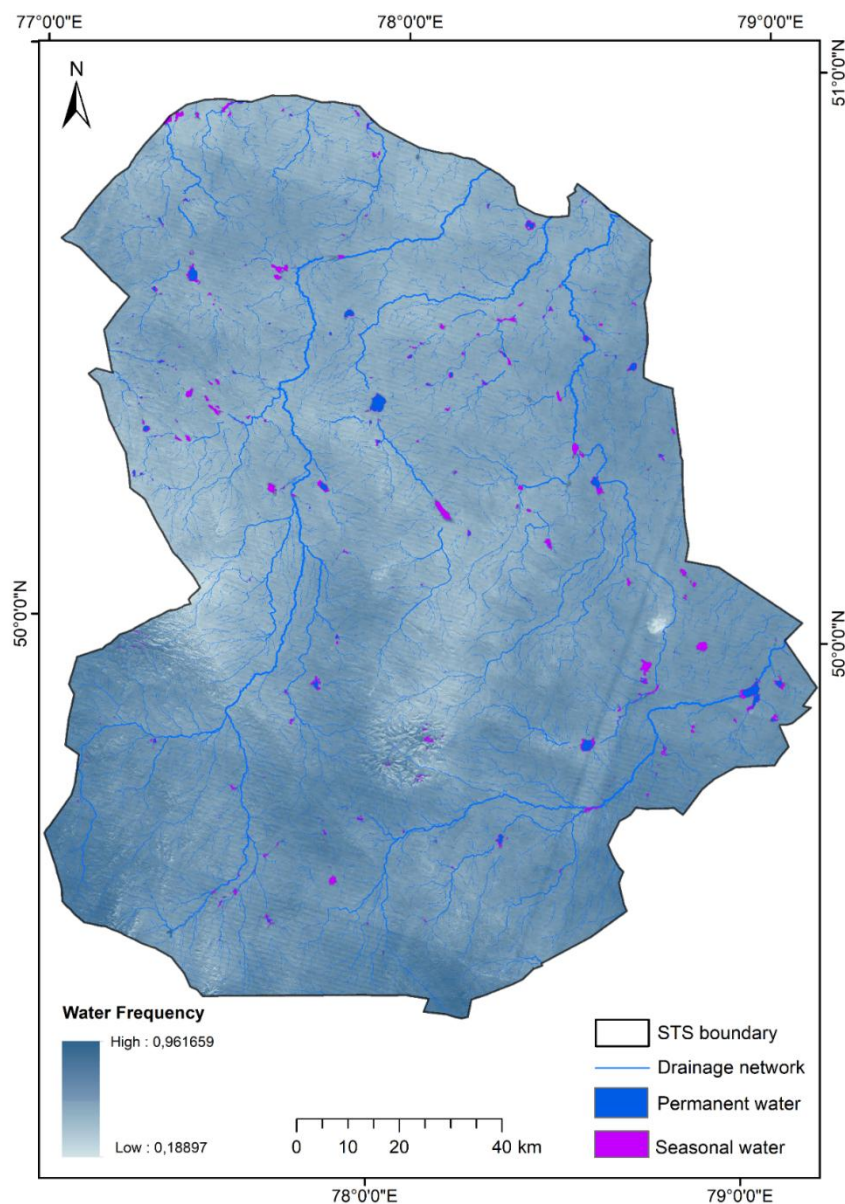


Figure 7. Surface water within the territory of the Semipalatinsk Test Site

3.5. Influence of Climatic Factors

Comparison of satellite data with ERA5-Land climatic indicators (Table 4) shows that interannual variations in the area of water bodies within the Semipalatinsk Test Site are directly related to winter season conditions - primarily to the amount of snowfall and air temperature.

In years with colder winters and higher snowfall, an expansion of water surfaces is observed, whereas warm and low-snow winters lead to a reduction in water area. For instance, in 1996, a moderately cold winter (-11 °C, 57 mm of precipitation) resulted in limited flooding and a minimum water surface area of about 4.5 thousand ha. In 2000, an increase in snow accumulation to 96 mm contributed to an expansion of the water area to 7.6 thousand ha.

The most pronounced hydrological anomaly was recorded in 2010, when the combination of the lowest air temperature (-13 °C) and record snowfall (106 mm) resulted in the maximum development of water surfaces-nearly 15 thousand ha. This situation highlights the role of the winter season as a key factor in shaping spring runoff and floodwater recharge of water bodies.

Table 4. Water Area Dynamics and Climatic Control (1996-2024)

Year	Area of water bodies, ha	Share of territory, %	Mean Winter T, Nov–Mar, °C	Snowfall, Winter, mm
1996	4512.92	0.24	-11	57.0
2000	7654.16	0.41	-10	96.0
2010	14993.96	0.81	-13	106.0
2012	4456.66	0.24	-13	65.0
2020	6428.99	0.34	-7	83.0
2024	5685.82	0.30	-6	52.0

In 2012, despite similarly low air temperatures (-13°C), a decrease in snowfall to 65 mm led to a reduction in the water surface area to about 4.5 thousand ha. In recent years (2020 and 2024), with warmer winters (-7°C and -6°C) and precipitation deficits (83 mm and 52 mm), earlier snowmelt and increased evaporation have been observed, limiting the water surface area to 6.4 thousand ha and 5.7 thousand ha, respectively.

4. Discussion

The results of the analysis confirm that the hydrological regime of the region is determined by winter climatic conditions rather than by the amount of summer precipitation. The volume and persistence of water bodies depend on the accumulation and preservation of the snow cover, which forms the main spring runoff. The peak water surface areas recorded in 2000 and 2010 correspond to periods of lower air temperatures and heavy snowfall, confirming the key role of winter moisture accumulation in shaping spring flow. In contrast, years with warm and low-snow winters (1996, 2012, 2024) are characterized by a sharp reduction in the extent of water bodies, reflecting the high sensitivity of local ecosystems to climatic fluctuations. Thus, long-term variations in temperature and snow reserves act as the primary drivers of the spatio-temporal variability of water systems within the Semipalatinsk Test Site.

Comparison of satellite observations with ERA5-Land reanalysis data revealed a clear negative correlation between mean winter air temperature and the area of water surfaces. At the same time, the amount of summer precipitation has a much weaker influence on the dynamics of water bodies, which is consistent with the sharply continental climate of the region. In this climate, the main recharge of water systems is formed by snowmelt, and the stability of water bodies is primarily determined by the snow balance of the winter season.

In addition to climatic factors, anthropogenic and technogenic impacts also play an important role. The territory of the Semipalatinsk Test Site, which was subjected to long-term nuclear and engineering activities, is characterized by a disturbed structure of soil–hydrological systems, altered permeability, and redistribution of surface runoff. This partly explains the spatial fragmentation of water surfaces, particularly in the central and western parts of the test site, where the highest instability of temporary water bodies is observed. Furthermore, the degradation of irrigation systems previously used for agricultural purposes has weakened the connection between surface and groundwater, reinforcing the seasonal nature of water bodies.

Comparison of the obtained data with the results of similar studies (Pekel et al., 2016; Ji et al., 2009) shows that the identified trends of decreasing water surface area and increasing seasonality correspond to global climatic patterns observed in the arid regions of Central Asia. However, the uniqueness of the Semipalatinsk Test Site lies in the combination of natural and technogenic factors, which makes this territory a model area for assessing the consequences of climatic and anthropogenic changes.

5. Conclusion

The analysis of spatio-temporal changes in water bodies within the Semipalatinsk Test Site for the period 1996-2024 revealed a pronounced climatic dependence of the region's hydrological regime. The main factors determining the extent and persistence of water bodies are winter conditions – air temperature and snowfall amount. The largest surface water areas were observed in years with cold and snowy winters (2000 and 2010), whereas the smallest areas occurred during warm and low-snow periods (1996, 2012, and 2024).

Spatial analysis showed that permanent water bodies are concentrated in the valleys of the Shagan and Ashchysu rivers, while temporary and seasonal ones are mainly distributed in the central and western parts of the test site. The share of temporary water bodies exceeds 60%, reflecting the instability of the hydrological regime and its high dependence on climatic fluctuations.

The use of the Google Earth Engine platform and the MNDWI index made it possible to effectively assess spatio-temporal changes, classify water body types, and establish their relationship with climatic parameters. The methodology demonstrated high reliability with an overall accuracy of 94% and can be applied for the monitoring of similar arid territories in Kazakhstan and Central Asia.

The obtained results have practical value for environmental monitoring, landscape planning, and the assessment of climate change impacts on the degraded lands of the former test site. Future research should focus on the integration of optical and radar sensor data, the application of machine learning models for automated classification, and the development of predictive models of water resource dynamics under global warming conditions.

6. Supplementary Materials: No supplementary materials.

7. Author Contributions

Conceptualization - A.A.; methodology - O.T.; software – O.T., N.Zh.; data collection – A.A., K.T.; data analysis – O.T., N.Zh., A.A.; writing - original draft preparation – N.Zh., O.T., A.A.; writing - review and editing – A.A., K.T.; project administration - A.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. Author Information

Zhengissova, Nazym - PhD student, Specialist. Space Technologies, and Remote Sensing Center / Department of Cartography and Geoinformatics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, 050040; nazym.zhengissova@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0618-1204>

Taukebayev, Omirzhan - PhD Candidate, General Director, Senior Lecturer. Cluster of Engineering and High Technologies / Department of Cartography and Geoinformatics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, 050040; omirzhan.taukebayev@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7959-1434>

Temirbayeva, Kamshat - PhD, Senior Lecturer. Department of Cartography and Geoinformatics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, 050040; kamshat.temirbayeva@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6810-5042>

Assylbekova, Aizhan - PhD, Associate Professor, Head of the Department. Department of Cartography and Geoinformatics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, 050040; aizhan.asylbekova@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8609-3855>

9. Funding: This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number AP19579264.

10. Acknowledgements: We thank the editor and the unknown reviewers of the journal for checking the manuscript and valuable comments. Also, we express our deep gratitude to Andrey Panitskiy for reviewing our article, a Candidate of Biological Sciences, PhD of the Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" of the National Nuclear Centre.

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

12. References

1. Alzurqani, S. A., Zurqani, H. A., White Jr, D., Bridges, K., & Jackson, S. (2024). Google Earth Engine application for mapping and monitoring drought patterns and trends: A case study in Arkansas, USA. *Ecological Indicators*, 168, 112759. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112759>
2. Batyrbekov, E. G., Aidarkhanov, A. O., Vityuk, V. A., Larionova, N. V., & Umarov, M. A. (2021). *Comprehensive radioecological survey of the Semipalatinsk Test Site: Monograph (Kompleksnoe radioekologicheskoe obsledovanie Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona: Monografiya in Russian)*. Institut radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii RGP NYaTs RK. ISBN 978-601-7972-64-6
3. Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H., Gorelick, N., Kwadijk, J., & van de Giesen, N. (2016). Earth's surface water change over the past 30 years. *Nature Climate Change*, 6(9), 810–813. <https://doi.org/10.1038/nclimate3111>
4. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
5. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). (2021). *ERA5-Land reanalysis dataset*. Copernicus Climate Change Service (C3S). <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
6. 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 (SRTM): Mission overview and results. *Reviews of Geophysics*, 45(2). <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
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. Hansen, M. C., & Loveland, T. R. (2012). A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024>
9. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., & Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
10. Hossain, M. J., Mahmud, M. M., & Islam, S. T. (2023). Monitoring spatiotemporal changes of urban surface water based on satellite imagery and Google Earth Engine platform in Dhaka City from 1990 to 2021. *Bulletin of the National Research Centre*, 47(1), 150. <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01127-5>
11. Ji, L., Zhang, L., & Wylie, B. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307–1317. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.11.1307>
12. Kaplan, G., & Avdan, U. (2017). Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 137–143. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1297540>
13. Li, J., Wang, J., Yang, L., & Ye, H. (2022). Spatiotemporal change analysis of long time series inland water in Sri Lanka based on remote sensing cloud computing. *Scientific Reports*, 12(1), 766. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04754-y>

14. Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google Earth Engine applications. *Remote Sensing*, 11(5), 591. <https://doi.org/10.3390/rs11050591>
15. Nazarbayev, N. A., Shkolnik, V. S., Batyrbekov, E. G., Berezin, S. A., Lukashenko, S. N., & Skakov, M. K. (2016). *Implementation of a set of scientific, technical, and engineering works to ensure the safe condition of the former Semipalatinsk Test Site (Provedenie kompleksa nauchno-tehnicheskikh i inzhenernykh rabot po privedeniyu byvshego Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona v bezopasnoe sostoyanie in Russian)* (Vol. 2). Kurchatov. ISBN 978-9965-675-95-9
16. Ngamile, S., Madonsela, S., & Kganyago, M. (2025). Trends in remote sensing of water quality parameters in inland water bodies: A systematic review. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1549301. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1549301>
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, 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
18. Rodriguez, E., Morris, C. S., & Belz, J. E. (2006). A global assessment of the SRTM performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 249–260. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.249>
19. Sherjah, P. Y., Sajikumar, N., & Nowshaja, P. T. (2023). Quality monitoring of inland water bodies using Google Earth Engine. *Journal of Hydroinformatics*, 25(2), 432–450. <https://doi.org/10.2166/hydro.2023.137>
20. U.S. Geological Survey. (2022). *Landsat Collection 2 Level-2 Science Product Guide*. United States Geological Survey. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-collection-2-level-2-science-product-guide>
21. Valeev, A., Assylbekova, A., Taukebayev, O., Kudaibergenov, M., Zhengissova, N., Zhanatbekov, Y., & Imandosov, T. (2025). Assessment of the morphometric conditions of the modern relief of the Semipalatinsk nuclear test site. *Bulletin of the L. N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series*, 150(1), 111–128. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-111-128>
22. Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
23. Yilmaz, M. (2023). Accuracy assessment of temperature trends from ERA5 and ERA5-Land. *Science of the Total Environment*, 856, 159182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159182>
24. Zhang, W., Zhang, Z., Wei, X., Hu, Y., Li, Y., & Meng, L. (2022). Long-term spatiotemporal changes of surface water and its influencing factors in the mainstream of Han River, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40, 101009. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101009>
25. Zhao, B., & Wang, L. (2024). Surface water monitoring from 1984 to 2021 based on Landsat time-series images and Google Earth Engine. *Heliyon*, 10(17). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36660>

Семей полигоны аумағындағы жер беті суларының кеңістіктік-уақыттық өзгерістерін Google Earth Engine платформасы негізінде талдау

Назым Жемісова, Өміржан Тәукебаев, Камшат Темірбаева, Айжан Асылбекова

Аңдатпа. Мақалада Семей сынақ полигоны аумағындағы су нысандарының кеңістіктік және уақыттық өзгерістерінің динамикасы талданған. Зерттеу барысында жерді қашықтықтан зондау деректері негізінде Google Earth Engine платформасы қолданылып, ландшафттық

жоспарлау кезінде жерүсті сулар мен ирригациялық жүйелер картасын құрастыру мақсат етілді. Бастапқы деректер ретінде Landsat және Sentinel-2 ғарыштық суреттері, ERA5-Land климаттық деректері және SRTM сандық бедер моделі пайдаланылды. Су айдындарын анықтау үшін модификацияланған нормаланған су индексі (MNDWI) әдісі қолданылды. Нәтижелерге сәйкес, су бетінің ең үлкен аудандары суық әрі қарлы қыстарда (2000, 2010 жж.) байқалды, ал ең аз көрсеткіштер жылы әрі қар аз түскен кезеңдерде (1996, 2012, 2024 жж.) тіркелді. Уақытша су айдындарының үлесі 60%-дан асады, бұл гидрологиялық режимнің тұрақсыздығын және климаттық ауытқуларға жоғары тәуелділігін көрсетеді. Google Earth Engine сияқты заманауи платформаларды пайдалану су нысандарының кеңістіктік-уақыттық өзгерістерін анықтауда тиімділігін және су ресурстарын басқаруда зор әлеуетін көрсетті. Алынған нәтижелер экологиялық мониторинг пен ландшафттық жоспарлау жұмыстарында, сондай-ақ бұрынғы полигон аумақтарын ауыл шаруашылығына игеру кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: су нысандары; Google Earth Engine; ЖҚЗ деректері; Семей сынақ полигоны (ССП).

Анализ пространственно-временных изменений поверхностных вод в пределах Семипалатинского полигона на основе платформы Google Earth Engine

Назым Женисова, Омиржан Таукеебаев, Камшат Темирбаева, Айжан Асылбекова

Аннотация: Статья посвящена анализу динамики пространственно-временных изменений водных объектов на территории Семипалатинского полигона с применением данных дистанционного зондирования Земли на основе платформы Google Earth Engine для дальнейшего составления карты поверхностных вод и ирригационных систем при ландшафтном планировании территорий. В качестве исходных данных применялись спутниковые снимки Landsat и Sentinel-2 и климатические данные ERA5-Land и цифровой модели рельефа SRTM. Выделение водных поверхностей осуществлялось с применением метода модифицированного нормализованного водного индекса (MNDWI). Результаты показали, что наибольшие площади водных поверхностей наблюдались в годы с холодными и снежными зимами (2000, 2010 гг.), а минимальные – в тёплые и малоснежные периоды (1996, 2012, 2024 гг.), и доля временных водоёмов превышает 60%, что отражает нестабильность гидрологического режима и высокую зависимость от климатических колебаний. Применение современных платформ, как Google Earth Engine для определения пространственно-временных изменений водных объектов показал свою эффективность и огромный потенциал в управлении водными ресурсами при оценке их динамики. Полученные результаты могут использоваться для экологического мониторинга и ландшафтного планирования при освоении территорий бывшего полигона для ведения сельского хозяйства.

Ключевые слова: водные объекты; Google Earth Engine; данные ДЗЗ; СИП.

Features of preservation of the Russian motor transport heritage and its participation in urban development

Anisya Lyadova*

Perm State University, Perm, Russia; geografizpermi@yandex.ru

*Correspondence: geografizpermi@yandex.ru

Abstract: The article deals with the specific features of the Russian motor transport heritage preservation based on the example of museums. This heritage also allows to develop the space of the cities themselves. Space reclamation represents one of the key aspects for Russian civilization. In addition, it is important to address motor transport heritage because it has no legal protection in Russia, though museums are being created actively and collections are growing, starting to change space in cities and their cultural environment. The current research aims at revealing space peculiarities of the motor transport museums development in Russia and the way they influence the cities where they are situated. The factors that favour the creation of museums include motor transport or neighbouring productions at the location, especially during the first stages of creation. Later, population number and the level of social and economic development of Russian cities and regions start to play an important role. The main territories where the museums are located include Central and Ural districts. Some museums are located in rural areas alongside with cities and towns. About half of the museums have foreign motor transport exhibits in their collections. The creation of children and public transport museums becomes an important event. The main directions, where museums develop local communities, create working places as well as many cultural events, include automobile rallies, the work with collections, devoted to the Soviet era, and joint projects with transportation companies (OAO “RZhD”), State archive and grant foundations. The work with big companies, state institutions and foundations is exemplified by the museum complex UGMK in Verkhnyaya Pyshma and Perm motor transport museum “Retro-garage”.

Keywords: motor transport heritage; Motor transport museums; Russian automobile museums; Technical museums; Scientific and technical heritage of Russia; Automobile culture; City museums; Russian cities and towns.

Citation: Lyadova, A. (2025). Features of preservation of the Russian motor transport heritage and its participation in urban development. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry, Geography Series, 153(4), 122-132.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-122-132>

Academic Editor:
N.Ye. Ramazanov

Received: 07.12.2025
Revised: 21.12.2025
Accepted: 21.12.2025
Published: 24.12.2025



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

1. Introduction

Soviet automobile industry will celebrate its 100th anniversary on the 1st of November 2024. This was the lorry AMO-F-15 that started this industry. This is a specific feature of Russian automobile production because in other countries the production started with light motor cars, not lorries. Though the factory “Russo-Balt” produced light motor cars in

tsarist Russia in 1912–1919, the mass production of Soviet cars started only in 1932 (Karasev, 2024).

Motor transport (automobile transport) represents the kind of transport engaged in mainly short and medium-distance transportation of cargos and people by cars and lorries from one place (region, country) to another by trackless roads (Gorkin, et al., 2013). In Russia, the motor transport production meant the production of light motor cars, lorries, motorcycles, mopeds, buses and other vehicles on wheels (Lyadova, 2023). That is why this article will examine the automobile industry as a whole variety of vehicles. Moreover, the article refers to the products of all factories of all Soviet republics and the countries of the Council for Mutual Economic Aid as the Soviet automobile industry. The products of modern Russian factories are referred to as Russian automobile industry; the ones of other countries are referred to as the foreign automobile industry.

A museum represents a key object of motor transport heritage preservation. The motor transport museum is understood as the museum of motor vehicles, whose collection demonstrates either the history or/and modern development trends of motor transport production of producing countries. It is important to note that sometimes these museums are more than just museums. They have scientific and technical collections (military vehicles, airplanes and others), tell the history of engineering research, display the collection of culture and everyday life of the time when motor transport was created. This enriches the collection and gives a complex impression about geography, history, economy and people of those days. There are other preservation ways, such as automobile clubs, private collections, but we will discuss the museums.

The automobile industry represents the essence of engineers' daring and successful calculations of business people. It also reflects the economic development of producing countries. Motor transport is a part of the transport complex, which means it is also a part of transport heritage (Zaparii, 2008). But Russian researchers do not consider motor transport as a subtype and hardly ever study it, compared to transport infrastructure (stations, roads and others). At the same time, this is included in the equipment, which is protected as an object of cultural heritage, but motor vehicles are not referred as a separate part of the technical heritage. Pipelines and spaceships are examples of transport, but they are studied as technical heritage. It is largely connected with the fact that the products of the automobile industry are the objects of science and technology; moreover, they move (Lyadova, 2023). The Moscow Museum of Transport is trying to solve this legislation problem.

In geographical sciences, the heritage is studied within the landscape approach (the study of cultural landscapes). The experience of cultural and landscape territorial zoning on different hierarchical levels (macro-, mezzo-, and micro-) allows evaluating the territorial richness in the monuments of natural and cultural heritage integrally. However, these studies do not consider motor transport and automobile heritage (more broadly, it is necessary to research transportation systems, which include transport, highways, stops and bridges). There are several reasons why this heritage is excluded. 1) Urban landscapes and geosystems do not attract attention as sources of heritage. Researchers became interested in Russian industrial heritage only in the 1970s, but they started to study it in the 2000s. These were economic historians who first paid attention to industrial heritage. 2) According to legislation, heritage is seen as immovable and nonmaterial objects. 3) Transport systems have their own specific features, such as the infrastructure (highways, railroad tracks, railway stations, airports, spaceports), is used for a long time, but the means of transport are often changed. Therefore, the rapid change of these means, which is associated with disposable, market consumption, does not allow them to be considered as a heritage.

However, in Russian history, especially in the Soviet period, the development of transport was of epochal significance, in particular as a part of urbanization processes, the development of the country's space, and the work of practically all industries. Moreover, this was important for the development of design and service. The lack of continuity led to the situation when modern automobilization poses serious fundamental problems for geosystems themselves (including the historical and cultural heritage. This gives grounds to the ideas about “car dead end” (Rodoman, 2010) and the growing role of public transport and public places. The problem of “automobile culture” also appeared. It is based not only on management systems at factories and road safety rules

(Chongyang, Du, 2024; Panteleeva, Prokofieva, 2021), but also serves as a foundation of the development culture of Russian space at all space levels. Therefore, the solution to the problems of this heritage opens the opportunities for broadening of semantic and civilizational discoveries in Russia, as well as the optimization of its space development.

2. Materials and methods

There is no consolidated data source about Russian motor transport museums. Therefore, the author previously conducted a historical and geographical research on the development of museums' network of Russian automobile industry from the 1960s to 2025 (Lyadova, 2023).

The network analysis included the following steps:

1) creation of a database with the following data: official name, official status, location, contacts, year of foundation, and composition of the exposition. Data on existing private, corporate and other non-state museums in a simplified version can be collected thanks to data from the Association of Private and Folk Museums of Russia (Associaciya chastnyh, 2025), the National Award Corporate Museum (Nacional'naya premiya, 2025), data from the Register of Non-Profit Organizations of the Ministry of Justice of the Russian Federation (Reestr nekommercheskih, 2025) and author's studies in "Vkontakte" and information from founders and directors of these museums.

2) historical and geographical analysis of the development of a network of museums and museum entities. The key points of the analysis are the features of the periodization of the network and the identification of types of museums based on the composition of their exposition. The main factors for the location and development of museums in different parts of the Russian Federation were identified. At this stage, the comparative method is widely used;

3) analysis of existing ways for museums to participate in the development of their cities and regions: car rallies, preservation of Soviet life and development of urban space. The last point was considered using the example of museums in the cities of Verkhnyaya Pyshma and Perm.

3. Results

3.1. Historical and geographical features of the museum network of motor transport museums in the Russian Federation and factors of its development

In Russia, as of May 1, 2024, there are 72 museums and collections in 46 cities and 7 rural settlements in 35 constituent entities of the Russian Federation (figure 1). It is worth noting that the number of museums exceeds the number of collections, but the information is difficult to find in the Internet. The majority of museums are the museums of light motor cars, though the share of motorcycle and other motor transport museums is also significant (Figure 2).

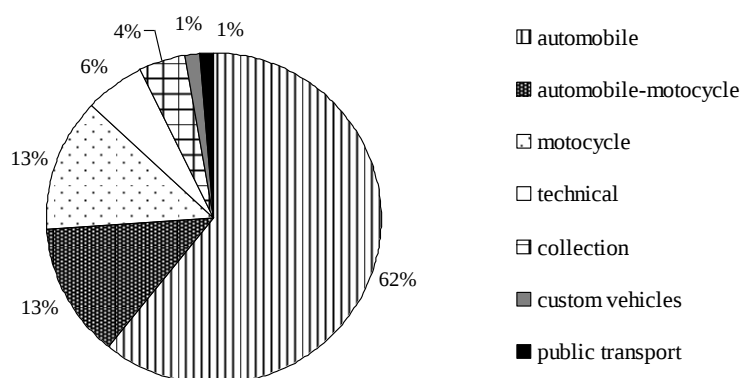


Figure 1. Structure of motor transport museums in Russia (based on data (Lyadova, 2023))

The museums appeared not in an even manner throughout the country. This process had several stages, which differ in the number and structure of the created museums. Several peculiarities can be singled out:

1. If we consider the appearance of museums by stages (before 1991 and after that by decades), it is obvious that the creation of museums was fostered (at least at initial stages) by motor transport or neighbouring production existing in a city or territorial entity. However, a direct correlation is not always seen (e.g. in Vladivostok). Later, population numbers and the level of social and economic development become important factors.

There are motor transport museums practically in all million cities, excluding Rostov-on-Don, Voronezh, Volgograd and Omsk. On the one hand, these cities did not have industries connected to the motor transport complex (except Volgograd). The enterprises of the aerospace industry and corresponding museums are situated in these cities. On the other hand, at present, there are no investors to create museums (social and economic factors).

2. The main regions where motor transport museums are situated include the Central and the Ural economic areas (figure 1). Moreover, they possess the widest variety of museums and their collections. These areas show high social and economic indicators, compared to others (Sharygin, 2016), but the Trans Volga economic Area, which falls behind (Gusev et. al., 2021) and traditionally specializes in motor transport production, does not demonstrate such a variety of museums.

First museums in the Asian part of Russia appeared in 2002. They are represented by Russian, European and American exhibits. Moscow is ahead of all regions, as the museums of all kinds of transport are situated there (except motorcycles). All museums are private.

3. More than half of the museums are private. Moreover, half of them appeared in the period between 2011 and 2020 (Table 1). The collections of about half of the museums consist of foreign exhibits (this phenomenon requires a study). It is worth noting that private museums in Russia have their own peculiarities, that is why a private museum in Russia is not always a licensed and fully-featured museum institution (Yureneva, 2024). It is possible that a rapid growth in the number of museums will be replaced by the closure of a part of them, especially in the case of the owner's death. This creates a problem of collection preservation for local communities and the owner's relatives.

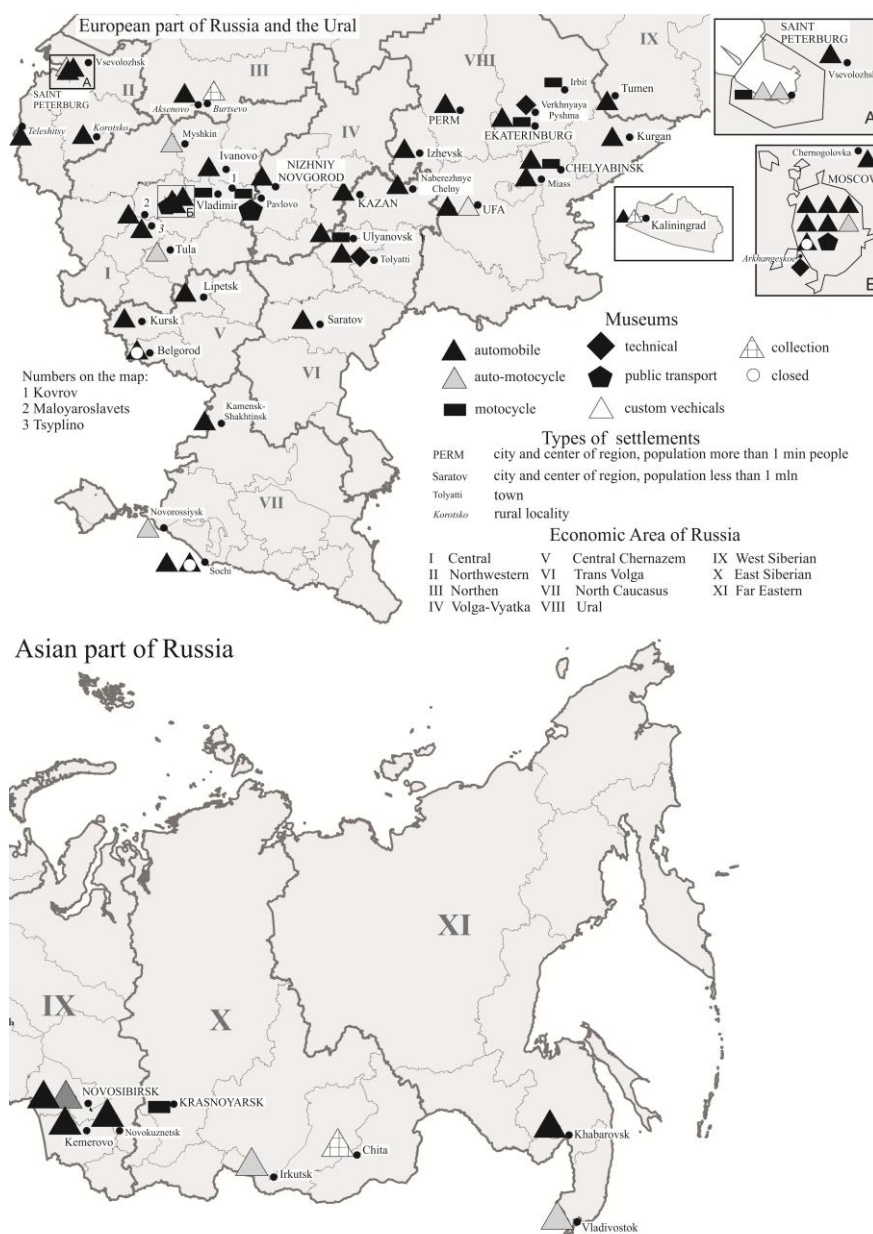


Figure 2. Russian motor transport museums (based on data, Lyadova, 2023)

Table 1. Stages of museums' and collections' creation according to their status (made by the author)

Period	Quantity		Status			
	total	exhibit foreign automobiles	corporate	state	non-governmental organization	private, NPO
1965–1991	12	1	8	1	1	2
1992–2000	4	0	0	1	0	3
2001–2010	12	5	0	2	1	9
2011–2020	39	1	0	2	0	37
2021–2024	6	2	0	0	0	5

4. Having started with automobile collections, the museums in the town of Tolyatti, Arkhangelskoe settlement (a part of the town of Krasnogorsk), and the town of Verkhnyaya Pyshma

actually created technical museums, which include aviation, space, military and other types of equipment. Though the Polytechnical museum in Moscow is a national museum of science and technology, the three museums mentioned above became its alternatives, whose collections and the work scale exceed those of the Moscow Museum.

It can be said that the UGMK museum complex is practically the only operating and actively developing technical museum-park, that accumulates different activities and harmonically develops the culture of Verkhnyaya Pyshma. It is visited by more than 200,000 visitors every year.

5. The museums appeared in rural area alongside with towns and cities of different sizes. They are often created by auto enthusiasts and former racing drivers, but not by professional museum workers. Currently two of them are closed due to the owner's death, collections of soviet and Russian automobiles are not protected and therefore are lost.

3.2. Motor transport museums and the development of their cities and regions

There are different approaches to assessing the contribution of the cultural sector: 1. economic approach (within the framework of cultural economics). Within its framework, the impact is assessed on the basis of statistical data on the activities of cultural objects (income and expenses, costs and benefits, consumer behavior, impact on other sectors of the economy, for example, tourism), standard indicators of cultural consumption (Bychkova, 2016; Tishchuk et. al., 2023). 2. socio-cultural approach. Considers the features of forming the identity of the population, instilling patriotism, and preserving memory. 3. The geographical approach, first of all, considers the placement of museums as elements of the cultural landscape of the region, studies cultural objects in all the diversity of their influence on the life of the community, and assesses the impact on the urban environment and cultural policy (Amelkina, 2021; Lyadova, 2023a; Streletsky, Gorokhov, 2022).

After all, the main task of such museum formations is cultural activity. A similar position is supported by economists themselves (for example, Muzychuk, 2025).

The emergence of children's and public transport museums (in Moscow and Ufa) became an important factor. The development of urban transport systems includes public transport and, possibly, in the future, it will also involve children's transport. Moreover, the development of off-street transport is already on the urban development agenda (Merkushev, 2022).

Private museums often work within a certain business model when a museum becomes a part of a hotel, restaurant and wine business. This feature characterizes the museums of the North Caucasus, the town of Kovrov (Vladimir oblast) and the Vologda oblast. Probably, this model will expand to other private museums. This symbiosis appeared due to several reasons: diversification of business, including the owner's hobby into business, and "saving" the collection by joining it to a more profitable enterprise.

Museums can participate in life of cities, towns, regions, and the country in different ways. Museums and collections play an educational role (Chirkov, 2025). Alongside demonstrating achievements, they create an environment to develop the engineering and creative abilities of children and youth. Chief engineers and veterans of production inspired the creation of museums at factories producing motor transport with the aim of transferring experience (Mazur, 2021). Corporate museums at motor transport producers in Russia still do this job.

As motor transport museums are situated in different regional centers, cities and towns, they allow the space in these settlements to progress. Furthermore, these museums develop local communities, as the majority of them were created by these societies. This is connected with specific features of the heritage itself, its mobility and functional diversity, local communities' active participation in its preservation and establishing connections outside cities, towns and territorial entities. The following kinds of work represent such space relations:

– Automobile rallies. This is the earliest and most direct way to show automobiles. It is also a campaign to participate in the production on purchase of cars. Modern automobile rally includes moving Soviet and Russian cars, military vehicles, more seldom motorcycles, in the city, where the museum is situated, as well as between cities. As before, the rallies are devoted to important dates in

the history of the country and the city: the 1st of May, Victory Day, City Day, the Day of Russia, and different professional holidays. Practically all museums take part in Victory Day parades in the cities of their location, and sometimes in other cities. Moreover, when a museum is situated in the city, it became possible to include this city in the routes of international automobile rallies (e.g., the rally “Paris – Beijing”) (Aktualizatsiia promyshlennogo, 2020).

During automobile rallies, museums use not only their own exhibits, but also invite automobile clubs, re-enactment clubs, private collectors and moto transport companies. These rallies help to demonstrate the main feature of motor transport heritage: it can seamlessly connect different layers of historic and cultural heritage and demonstrate spacial relations between different periods of Russian history.

– The demonstration of the heritage of the USSR and urban heritage of those days. Almost all museums possess collections of Soviet motor transport, exhibit the objects of everyday life, household appliances, interiors, collections of modelmakers, posters, paintings, toys and other characteristic things of the Soviet era. This feature of the museums requires a careful study. It allows not to put the equipment into the opposition to other spheres of society, but vice versa, it helps to find common development routes. As the BMW experience shows (Tafintseva, 2021), such combinations set new trends in urban planning, architecture, management, museum’s work and art (Gelfond, 2016) and develop tourism (Michnicka, Kołodziejczyk, 2022).

– There is no research dedicated to the impact these museums made on the development of communities, culture and economy in cities. However, its important influence can be seen through special and regular events. Some museums demonstrate an active position in attracting attention to themselves and creating different places of attraction. The most ambitious and complex projects include the ones with OAO “RZhD”. The project, which especially stands out, is the locomotive-hauled tourist retro train “Ural Express”, going from Ekaterinburg to the territory of the museum complex in Verkhnyaya Pyshma. This is a unique example of such a form of work with a museum in Russia. But it is not known how many workplaces it created, as well as how many taxes it collected for the Sverdlovsk oblast. During 3 years, the train carried over 65,000 passengers – tourists from different parts of Russia and foreign countries and became the hallmark of the Sverdlovsk region (Retro train “Ural Express”, 2025).

The projects of the Perm motor transport museum “Retro-garage” stand out in a way that they influence local communities. They include the work with OAO “RZhD” and the joint projects with GKBU “State archive of Perm Krai”. The train “Victory Echelon” runs annually between towns of Perm Krai situated along the Sverdlovskaya railway thanks to joint projects with OAO “RZhD”. More than 1000 people gather in each town to see the train. It includes a locomotive, coaches and platforms of the war times. Machines and equipment, motor and military transport are demonstrated on the platforms. The work with the State archive involves urban spaces in Perm and other towns of the region. This work helps to create theme exhibitions in towns and movable exhibitions for automobile rallies, which tell about the industrial heritage of the places and people who were creating it (Lyadova, 2023a; Kozlova, 2022).

It is worth noting that such projects can be implemented only if they are financed through grant foundations (in Perm, this is the Foundation of Presidential grants) or if there is a big investor represented by an enterprise or a company (OAO “UGMK”). These projects show that transport represents a system that easily integrates all its types and can find partners in all spheres. This allows to get various effects for cities and towns and create unique projects.

4. Discussion

The areas of museum participation in the development of territories at various levels and the cultural sphere as a whole need to be carried out on a unified basis, but, unfortunately, this is not yet possible.

Although sociological studies show an increase in attention and attendance at these museums (Chirkov, 2025). The authors see the solution to the problem of actively involving these museums in

the cultural support of their communities and actively participating in the development of the cultural sphere in solving the fundamental problems of museum policy in Russia.

5. Conclusion

Motor transport plays an important role in modern society, though serious changes await it in the future. Russian motor transport heritage is preserved mostly thanks to private museums, private individuals and organizations. Such museums exist throughout Russia, but their number is the biggest in the Central and Ural areas. The number of museums had been growing since 1963 when the first ones appeared at producing enterprises. Almost half of them were created between 2011 and 2020. The development of museums' network led to the emergence of transport and technical museums of different types. The biggest share of these museums is private; therefore, they are not legally protected and incur significant economic costs.

Motor transport museums play a part in the development of their cities and towns, because they preserve and promote motor transport heritage. Because this type of heritage represents a backbone for a large number of activities, the museums are able to attract different partners for the projects aiming at developing their territories.

6. Supplementary Materials. No supplementary materials.

7. Author Contributions. The author performed all stages of the study independently.

8. Author Information

Lyadova, Anisya – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of Physical Geography and Landscape Ecology of Perm State University, Bukireva ul., 15, Perm, Russia, 614990; geografizpermi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4387-2768>

9. Funding:

This study is supported by the Foundation for Presidential Grants under Grant No. 25-1-000676 «Leningrad–Molotov. Victory Route».

10. Acknowledgments. No acknowledgments.

11. Conflicts of Interest: The author declares no conflict of interests.

12. References

1. Updated industrial core Gornozavodskaya civilizations (Aktualizatsiia promyshlennogo iadra Gornozavodskoitsi vilizatsii in Russian) (2020). https://vk.com/doc18506240_650178889?hash=npMN1oQzAB8LPkU9v7FPisqvrrgEvK6DinJQZzSbz0s&dl=pS469ZMUwEBHgTvxxhkFLV1uAbJUHPPCqYM7FK7rK40 (Accessed 06.08.2025)
2. Amelkina, D. V. (2021). Geography of museums and prospects of the museum tourism development in the Samara region (Geografiya muzeev i perspektivy razvitiya muzejnogo turizma v Samarskoj oblasti). *Geographical Bulletin*, 1(56), 133–148.
3. Bychkova, O. (2016). Economic value of cultural institutions: evaluation of effectiveness in public policy (Ekonomicheskaya cennost' institutov kul'tury: ocenka effektivnosti v publichnoj politike in Russian). *J Economic issues (Voprosy ekonomiki)*, 6, 116–130.
4. Chirkov, M. A. (2025). The contribution of motor transport museums to the socio-economic development of the Ural economic region (Vklad avtotransportnykh muzeev v sotsialno-ekonomicheskoe razvitie Uralskogo ekonomicheskogo raiona in Russian). *J Ratio et Natura*, 3, 371–378.

5. Chongyang, Du (2024). Car culture of China and Russia (Avtomobil'naya kul'tura Kitaya i Rossii in Russian). *J Neophilology (Neofilologiya)*, 1: 251–260. <https://doi.org/10.20310/2587-6953-2024-10-1-251-260>
6. Gelfond, A. L. (2016). Features of architectural formation of automobile museums (by the example of Germany) (Osobennosti arhitekturnogo formirovaniya muzeev avtomobilej (na primere Germanii) in Russian). *J Privolzhsky scientific journal (Privolzhskij nauchnyj zhurnal)*, 3, 108–113.
7. Gorkin, A. P. (eds) (2013). *Socio-economic geography: concepts and terms*. Dictionary-reference book. Ecumene, Smolensk.
8. Gusev, V. A., Makartseva, L. V., Molochko, A. V., Preobrazhensky, V., Ustavshchikova, S. V., & Tsoberg, O. A. (2021). *Trans Volga economic areas: population and economy* (Povolzhskij ekonomicheskij rajon: naselenie i ekonomika: uchebnoe posobie in Russian). IP Kirsanova M. V., Saratov.
9. Karasev, A. V. (2024). The first automotive museum (Pervyi muzei avtomobilnogo dela in Russian). *J Museum (Muzei)*, 3, 21–34.
10. Kozlova, V. Yu. (2022). Features of visualization of key meanings in the space of the city of Perm (Vizualizatsiia kliuchevykh smyslov v prostranstve goroda Permi in Russian). *J Modern city: power, management, economy (Sovremennyi gorod: vlast, upravlenie, ekonomika)*, 1, 379–386.
11. Lyadova, A. A. (2023). Historical and geographical features of the network of motor vehicle museums in Russia in the 1960s–2020s (Istoriko-geograficheskie osobennosti seti avtotransportnyh muzeev Rossii v 1960-2020-e gg in Russian). *J Cultural heritage of Russia (Kul'turnoe nasledie rossii)*, 4, 106–119. <https://doi.org/0.34685/HI.2023.43.4.015>
12. Lyadova, A. A. (2023a, 07-11 November). The legacy of the Ural mining civilization: experience of popularization using the example of the work of the perm automobile museum “Retro garage”, Spatial Organization of Society: theory, methodology, practice (Uralskaia Gornozavodskaia Tsivilizatsiia: populiariizatsiia na primere raboty permskogo avtomobilnogo muzeia “Retro-garazh”, Prostranstvennaia organizatsiia obshchestva: teoriia, metodologiya, praktika in Russian), Perm, 339–343.
13. Mazur, L. N. (2021). Evolution of the Russian museum network in the 20th – early 21st centuries: historical and statistical analysis (Evoluciya muzejnoj seti Rossii v XX – nachale XXI v.: istoriko-statisticheskij analiz in Russian). In: Culture and interaction of peoples in museum, scientific and educational processes are the most important factors in the stable development of Eurasian countries (Kul'tura i vzaimodejstvie narodov v muzejnyh, nauchnyh i obrazovatel'nyh processah – vazhnejshie faktory stabil'nogo razvitiya stran Evrazii in Russian), Omsk.
14. Merkushev, S. A. (2022). Trends and prospects for the development of off-street transport in the outer zones of Russian millionaire cities (Tendencii i perspektivy razvitiya vneulichnogo transporta vo vneshnih zonah rossijskih gorodov-millionerov in Russian). *J Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences (Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle)*, 3, 374–389. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2022-32-3-374-389>
15. Michnicka, K., & Koiodziejczyk, K. (2022). Evaluation of automobile museums in Poland and Czechia. *Turystyka Kulturowa*, 4, 125, 129–159.
16. Muzychuk V. Yu. (2023). Creative Industries: Challenges for the NonCommercial Segment of the Cultural Sector (Tvorcheskije (kreativnye) industrii: vyzovy dlya nekommercheskogo segmenta kul'tury in Russian). *J The Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences (Vestnik Instituta ekonomiki Rossijskoj akademii nauk)*, 5, 7–39. https://doi.org/10.52180/2073-6487_2023_5_7_39
17. Panteleeva, A. A., & Prokofieva, A. V. (2021). An urban mobility in a modern city (Mobil'nost' v prostranstve sovremennogo goroda in Russian). *J Social sciences and humanities: theory and practice (Sotsialnye i gumanitarnye nauki: teoriia i praktika)*, 1, 235–243.

18. Retro train “Ural Express”. Russian railways. Available at: <https://www.rzd.ru/ru/10420/page/103290?id=19647> (Accessed 25.08.2025).
19. Rodoman, B. B. (2010). Car in a dead end (Avtomobil' v tupike in Russian). *J Geography (Geografia)*, 23, 1–15.
20. Sharygin, M. D. (2016). Ural region: borders and frames of spatial development (Ural'skij region: granicy i karkas prostranstvennogo razvitiya in Russian). *J Geographical bulletin (Vestnik geograficheskogo zhurnala)*, 4, 21–28. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2016-4-21-28>
21. Streletsky, V. N., Gorokhov, S. A. (2022). Cultural Geography in Russia at the Beginning of the 21st Century: National Specifics and Development Trends (Specifika i tendencii razvitiya kul'turnoj geografii v Rossii v nachale XXI veka in Russian). *J Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya (Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya)*, (3), 374–392. <https://doi.org/10.31857/S2587556622030141>
22. Tafintseva, T. (2021). *Half a century with art (Polveka s iskusstvom in Russian)*. In: The Art Newspaper. Available at: <https://www.theartnewspaper.ru/posts/8883/> (Accessed 15 May 2024).
23. Tishchuk, M. O., Schcepko, I. V., Ermakova, E. I., & Sadova, A. A. (2023). The research of the private museum market development in the Kaliningrad region (Issledovanie razvitiya rynka chastnyh muzeev Kaliningradskoj oblasti in Russian). *J Services in Russia and Abroad (Servis v Rossii i za rubezhom)*, 17(4), 50–61. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10336557>
24. Yureneva, T. Yu. (2024). Private museum in the space of culture: issues of definition and statistics (Chastnyj muzej v prostranstve kul'tury: problemy opredeleniya i statistiki in Russian). *J Bulletin of Slavic Cultures (Vestnik slavyanskikh kul'tur)*, 71, 22–33. <https://doi.org/10.37816/2073-9567-2024-71-22-33>
25. Zaparii, V. V. (2008). On the issue of understanding the concept of “industrial heritage” in Russia and abroad (K voprosu o ponimanii koncepcii «industrial'noe nasledie» v Rossii i za rubezhom in Russian). *J Russian scientific journal (Rossijskij nauchnyj zhurnal in Russian)*. Izdatel'stvo Ryazanskij institut ekonomicheskikh, pravovyh, politicheskikh i sociologicheskikh issledovanij i ekspertiz, 2, 77–83.

Ресейдің автокөлік мұрасын сақтау ерекшеліктері және оның қалаларды дамытудағы үлесі

Анисья Лядова

Андатпа. Мақалада мұражайлар жұмысының мысалында Ресейдің автокөлік мұрасын сақтаудың ерекшеліктері қарастырылады, ол да қалалардың кеңістігін дамытуға мүмкіндік береді. Орыс өркениеті үшін кеңістікті игеру оның негізгі аспектілерінің бірі. Мұраның осы түріне жүгінудің маңыздылығы Ресейде мұражайлар мен жиналыстар белсенді түрде құрылып, қалалар кеңістігі мен олардың мәдени саласын өзгерте бастағанымен, оның заңмен қорғалмағанына байланысты. Осы зерттеудің мақсаты – Ресейдегі автокөлік музейлері дамуының кеңістіктік ерекшеліктерін және олардың орналасқан қалаларына әсерінің ерекшеліктерін анықтау. Мұражайлар құруға, әсіресе құрылудың алғашқы кезеңдерінде орналасқан жерде автокөлік өндірісінің немесе аралас өндірістердің болуы қолайлы, бұдан әрі Ресей Федерациясының қалалары мен субъектілерінің халық саны мен әлеуметтік-экономикалық даму деңгейі маңызды болып отыр. Осы музейлерді орналастырудың негізгі аудандары – Орталық және Орал. Саны әртүрлі қалалардан басқа, музейлер ауылдық жерлерде бар. Барлық мұражайлардың жартысына жуығы өз коллекцияларында шетелдік автокөліктердің экспонаттарын сақтайды. Балалар және қоғамдық көлік мұражайларының пайда болуы маңызды оқиға болып табылады. Мұражайлар жергілікті қоғамдастықты

дамытатын негізгі бағыттарды, жұмыс орындарын, сондай-ақ көптеген мәдени оқиғаларды - автошерулерді, кеңес дәуіріне арналған коллекциялармен жұмыс істеуді және көлік компанияларымен («РТЖ» ААҚ), мемлекеттік мұрағатпен және гранттық қорлармен бірлескен жобаларды құрайды. Верхняя Пышма қаласындағы УГМК мұражай кешенінің және Пермь қаласындағы «Ретро-гараж» Пермь автомобиль мұражайының мысалында ірі компаниялармен, мемлекеттік мекемелермен және қорлармен жұмысы көрсетілген.

Түйін сөздер: автокөлік мұрасы; автокөлік мұражайлары; Ресейдің автомобиль мұражайлары; техникалық мұражайлар; Ресейдің ғылыми-техникалық мұрасы; автомобиль мәдениеті; қалалық мұражайлар; Ресей қалалары.

Особенности сохранения автотранспортного наследия России и его участие в развитии городов

Анисья Лядова

Аннотация: В статье на примере работы музеев рассматриваются особенности сохранения автотранспортного наследия России, которое также позволяет развивать пространство самих городов. Для русской цивилизации освоение пространства один из ключевых её аспектов. Важность обращения к данному виду наследия также обусловлено тем, что в России оно не защищено законодательно, хотя активно создаются музеи, растут собрания и начинают менять пространство городов и их культурную сферу. Цель данного исследования – выявление пространственных особенностей развития автотранспортных музеев в России и особенностей их влияния на города их размещения. Созданию музеев благоприятствует наличие автотранспортного производства или смежных производств в месте размещения особенно на первых этапах создания, в дальнейшем важным становится численность населения и уровень социально-экономического развития городов и субъектов РФ. Основные районы размещения данных музеев – Центральный и Уральский. Кроме городов различной численности, музеи существуют в сельской местности. Около половины всех музеев содержат в своих коллекциях экспонаты зарубежного автотранспорта. Важным событием становится возникновение музеев детского и общественного транспорта. Основные направления, в которых музеи развивают местное сообщество, создают рабочие места, а также множество культурных событий – автопробеги, работа с коллекциями, посвященными советской эпохе, и совместные проекты с транспортными компаниями (ОАО «РЖД»), Государственным архивом и грантовыми фондами. На примере Музейного комплекса УГМК в г. Верхняя Пышма и Пермского автомобильного музея «Ретро-гараж» в г. Перми показана работа с крупными компаниями, государственными учреждениями и фондами.

Ключевые слова: автотранспортное наследие; музеи автотранспорта; автомобильные музеи России; технические музеи; научно-техническое наследие России; автомобильная культура; городские музеи; города России.

Солтүстік Қазақстан облысының орманды дала ландшафттарындағы *Betula* тұқымдасының бейімделуі мен антропогендік әсеріне интегративті талдау

Нұртілеу Оспан*, Жасхайыр Қарағойшин

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана,
Қазақстан; nurtileuospanov@gmail.com, k.zhashaiyr@mail.ru
*Корреспонденция: nurtileuospanov@gmail.com

Аңдатпа. Бұл мақала далалық барлаулар мен ландшафттық деректерге сүйене отырып, Солтүстік Қазақстан облысының қатал континенталды климат жағдайына бейімделген қайың ағашының физиологиялық және экологиялық атрибуттарын ашады. Солтүстік Қазақстан облысының ландшафттары негізінен орманды дала мен дала аймақтарынан тұрады. Аймақтың солтүстігі шалғынды-орманды, орталығы қайыңды орманды дала, ал оңтүстігі нағыз далалық сипатта айқын бөлінеді. Ең жоғары ормандылық деңгейі (шамамен 20% дейін) облыстың солтүстігіндегі сортаңды жазықтарда байқалады. Бұл көрсеткіш өңірдің экологиялық тепе-теңдігін сақтауда өте маңызды рөл атқарады.

Облыс аумағында ландшафттың 20 түрі анықталды, оның 13-і орманды далаға, ал 7-сі дала ландшафтысына жатады. Аккумуляциялық жазықтарда құнарлы қара топырақтар және қайың шоқтары кең таралған. Денудациялық сәл толқынды жазықтарда оңтүстік қара топырақтар мен сорлар көбірек кездеседі, мұнда бетегелі-қызғылт өсімдіктер тобы басым болып келеді.

Қайыңның *Betula pendula* (қотыр қайың) және *Betula pubescens* (үлпек қайың) түрлері осы аймақ фитоценоздарының орталық өзегі болып келеді және фрагменттелген «орман шоқтары» түрінде кездеседі. Оның физиологиялық-экологиялық бейімделу ерекшеліктері күрделі континенталдық климатта тұрақты тіршілік етуге мүмкіндік береді. Қайың популяцияларын топырақ-су теңгерімін реттеу, биоалуантүрлілікті сақтау және әлеуметтік-экономикалық маңыздылығын арттыру үшін жан-жақты зерттеу және сақтау өте маңызды. Олардың экологиялық тұрақтылығын қамтамасыз ету заманауи геоақпараттық технологияларды қолдануды қамтитын арнайы қорғау шараларын талап етеді. Бұл зерттеу аймақтың табиғи ресурстарын тиімді басқаруға және деградация процестерін азайтуға тікелей бағытталған маңызды қадам болып саналады.

Түйін сөздер: ландшафт; антропогендік қысым; климаттық ауыспалық; *Betula pendula* (қотыр қайың); *Betula pubescens* (үлпек қайың); экожүйе тұрақтылығы; геоақпараттық технологиялар.

Дәйексөз: Оспан, Н., Қарағойшин, Ж. Солтүстік Қазақстан облысының орманды дала ландшафттарындағы *Betula* тұқымдасының бейімделуі мен антропогендік әсеріне интегративті талдау (2025). Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 153(4), 133-147.
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-153-4-133-147>

Академиялық редактор:
Н.Е. Рамазанова

Редакцияға түсті: 17.10.2025
Түзетілді: 16.12.2025
Қабылданды: 18.12.2025
Басылымға шықты: 24.12.2025



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

1. Кіріспе

Солтүстік Қазақстан облысы физикалық-географиялық тұрғыдан - Батыс Сібір жазығының оңтүстік шетінде және ішінара Қазақ ұсақ шоқысы (Сарыарқа) аумағында жатыр. Облыстың ең солтүстік нүктесінің координаттары: 55°26' с.е. (Мәскеу ендігімен шамалас) және 68°59' ш.б.; ең оңтүстік нүктесі - 52°13' с.е. және 67°19' ш.б.; ең батыс нүктесі - 54°00' с.е. және 65°57' ш.б.; ал ең шығыс нүктесі - 52°50' с.е. және 74°02' ш.б. Ендік бағытындағы шеткі нүктелер арасындағы айырмашылық 3°13', ал бойлық бойынша - 8°05'. Солтүстіктен оңтүстікке қарай ең алыс нүктелер арасындағы түзу қашықтық 375 км, батыстан шығысқа қарай - 602 км. Облыс Калуга, Тула, Тамбов облыстарымен бір ендікте орналасқан.

Облыс территориясы солтүстігінде Ресей Федерациясының Қорған, Түмен және Омбы облыстарымен, оңтүстігінде - Қазақстан Республикасының Ақмола облысымен, батысында - Қостанай, шығысында - Павлодар облыстарымен шектеседі. Облыс аумағында 13 әкімшілік аудандар бар. Облыс аумағы 97 993 км²-ге тең және Қазақстан аумағының 3,6% - құрайды.

Солтүстік Қазақстан облысы еуразиялық орманды дала мен даланың шекарасында орналасқан, айқын континенталдық климатпен сипатталады: қыста температура -45°C-тан жазда +35°C-қа дейін, жылдық жауын-шашын мөлшері 280-420 мм, негізінен вегетациялық кезеңде (Abaturov et al., 1982).

Аймақтың ландшафттық ерекшелігі оның екі негізгі морфологиялық бірлігі - аккумуляциялық жазықтар мен денудациялық сәл толқынды үстірттер арасындағы күрделі өзара әрекеттесуден туындайды. Белгіленген 20 ландшафт түрлерінде орман жамылғысы солтүстіктен оңтүстік шығысқа қарай азайып кішкене шоғырланған шоқылар түрінде кездеседі. Бұл жағдай орманды даланың фрагменттелген сипатын — қайың шоқтарының далалық жерде орналасуын анықтайды, сонымен қатар топырақ-өсімдік жамылғысының жоғары деңгейдегі мозаикалығын түсіндіреді.

Қайың, пионерлік сукцессиялық элемент ретінде, осы аумақтарда басым болып, бетеге (*Populus tremula*), кәдімгі қарағай (*Pinus sylvestris*) және бұта түрлерімен (*Salix* spp), кәдімгі мойыл (*Prunus padus*) бірге монодоминантты немесе аралас ассоциациялар құрайды (Galitskii, 2001; Grigor'ev, 2012; Kozlovskii, 1985).

Петропавл, Мамлютка және Тайынша аудандарында *Betula* spp. Криотермиялық стресс және мерзімді құрғақшылықты қоса алғанда, экстремалды факторларға жоғары резистенттілік танытатыны анықталды, бұл бұзылған экожүйелерді регенерациялаудағы олардың рөлін айқындайды (Amosova & Feklistov, 2009; Oksanen et al., 2019).

Мақала онтогенетикалық ерекшеліктерден антропогендік әсерге дейін жан-жақты қамту үшін құрылымдалған, аналитикалық тереңдікті арттыру үшін кестелік және графикалық иллюстрациялар енгізілген.

2. Материалдар мен әдістер

Зерттеу нысаны ретінде Солтүстік Қазақстан облысының орманды дала аймағында таралған қайыңды ормандар (*Betula pendula*, *B. pubescens*) алынды. Географиялық ауқымы облыстың негізгі орманды аудандарын (Қызылжар, Айыртау, Булаев, Мамлютка, Тайынша, Есіл, Тимирязев) қамтиды.

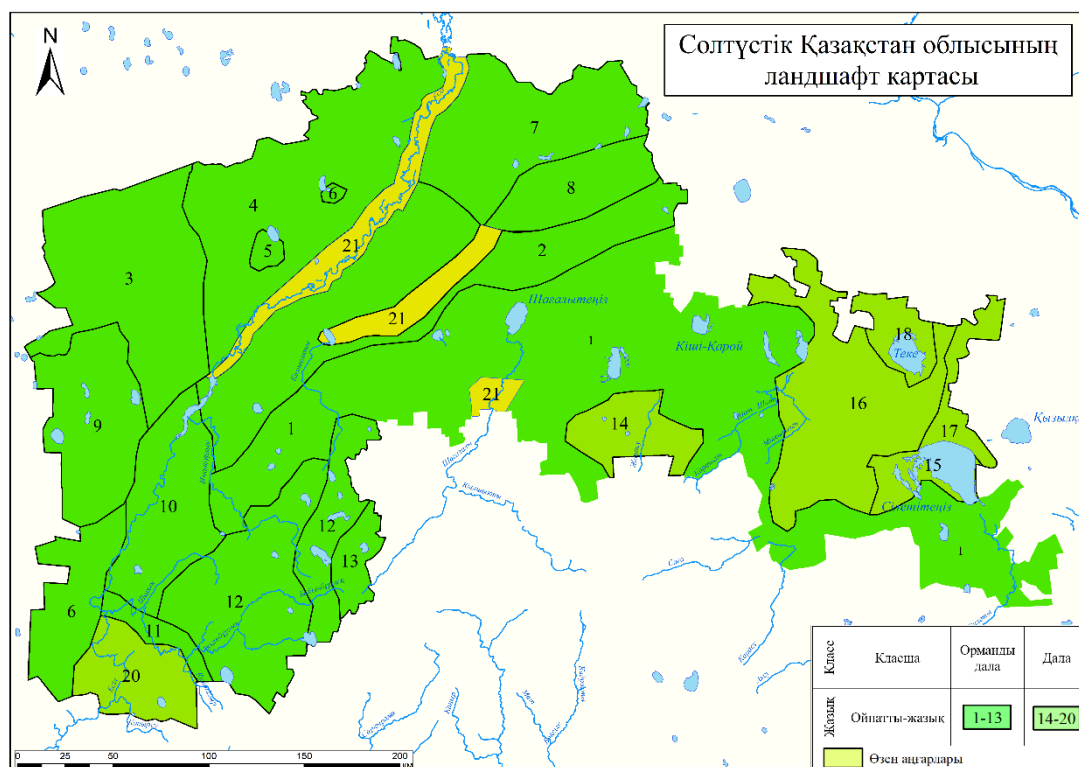
- Ғарыштық қашықтықтан зондтау деректері (Sentinel-2 S2A, Landsat-8, 9 OLI) және Google Earth Engine (GEE) платформасы негізінде алынған NDVI индексі (Gorelick et al., 2017);
- Жаһандық жер жамылғысының карталары (ESA WorldCover, GlobeLand30) (Zanaga et al., 2021);
- Топографиялық негіздер мен OpenStreetMap (OSM) қабаттары;
- Ландшафттық және геоморфологиялық карталар деректері
- USGS сайты арқылы SRTM 1 Arc-Second Global ғарыштық суреттер;
- Қазақстан орман шаруашылығының статистикалық мәліметтері (Tileuberdi, 2022);

- Далалық бақылаулары мен жеке шолу бағалары (жеке маршруттар бойынша) (Grigor'ev, 2012).

3. Нәтижелер

3.1. Ландшафт сипаттамасы

Солтүстік Қазақстан облысының ландшафттық ерекшелігі оның негізінен екі негізгі кластан – орманды дала және дала жазықтарынан тұратындығын көрсетеді (Сурет 1). Бұл кең аймақ аккумулятивті және денудациялық үрдістердің нәтижесінде пайда болған аллювийлі-көлдік ойпаттар, делювийлі-пролювийлі жазықтар және пенепленді сәл толқынды жазықтар сияқты әртүрлі жер бедерімен сипатталады. Топырақ жамылғысы негізінен қара және оңтүстік қара топырақтардың әртүрлі түрлерінен (кәдімгі, карбонатты, сортаңды, сортаңданған) тұрады. Өсімдік жамылғысының мозаикалық сипаты аймақтың ерекше белгісі болып келеді, мұнда әртүрлі шөпті-қызғылт қаулы, бетегелі және жусанды далалық ассоциациялар көктерек-қайыңды ормандармен, шоқтармен және талды тоғайлармен бір-біріне сіңісіп жатыр. Ландшафттардың аралас сипаты, әсіресе көптеген көлдер мен ойпаңдардың болуы, өсімдіктер мен топырақтардың кешенді үйлесімін қалыптастырады, бірақ кең аумақтардың жыртылуы антропогендік әсердің өсу тенденциясын көрсетеді.



Сурет 1. Солтүстік Қазақстан облысының ландшафт картасы

Облыстың ландшафт картасында орман алқаптарының таралуы ландшафт негіздемесіне анық бекітілген, яғни, орманды дала ландшафттарындағы 13 ландшафты топырақтардың кәдімгі қара топырақ және карбонатты сортаңдалған қара топырақтарда қайыңның кең таралуы байқалады, және олар 1-13-ші ландшафт аралығында таралған. Далалы, кең жазық аймақтарда орман жолақтары біртіндеп сиректенеді, яғни олар негізінен шоқылы шоғырланған немесе жалғыз өскен екпелер түрінде кездеседі. Мұндай орман жолақтары 14-шіден 20-ші ландшафт аралығында анық көрініс табады және олардың таралу аймағы әртүрлі

жер бедері элементтері мен топырақ сипаттарына тікелей байланысты. Әр ландшафт түрлерінің сипаттамасы:

Жазықтық:

Орманды дала

Аккумуляциялық

1-ші ландшафт – Кәдімгі карбонатталған қара, сортаңданған кәдімгі қара сорлы топырақтар. Әртүрлі-өсімдіктер өскен көлді аллювилі қазаншұңқырлы жазық.

2-ші ландшафт – Кәдімгі карбонатталған қара, сортаңданған кәдімгі қара сорлы топырақта әртүрлі-өсімдікті ойпаңдар мен көл маңайындағы қазаншұңқырларда кездесетін көктеректі-қайыңды орманшалар мен шоқ ормандар және әртүрлі-өсімдікті астық тұқымдастар өскен көлді аллювилі қазаншұңқырлы жазық.

3-ші ландшафт – Кәдімгі карбонатталған, сортаңданған қара топырақта әртүрлі-өсімдікті астық тұқымдас псаммофитті элементтері бар далалар, көктеректі-қайыңды шоғыр ормандар мен тал тоғайлар және шалғындармен аралас өсімдіктер өскен көлді аллювилі қазаншұңқырлы жазық.

4-ші ландшафт – Кәдімгі карбонатталған, сортаңданған қара топырақта шалғындық дақылдық әртүрлі-өсімдікті және астық тұқымдасты өсімдіктер, кейбір жерлерде кешенді далалар көктеректі қайыңды шоқтармен және ормандармен аралас өсімдіктері өскен көлді аллювилі қазаншұңқырлы жазық.

5-ші ландшафт – Сортаңданған кәдімгі қара сорлы топырақта әртүрлі шөптесін-бетегелі астық тұқымдасты өсімдіктері өскен көлді аллювилі қазаншұңқырлы жазық.

6-ші ландшафт – Карбонатты сортаңдаған қара топырақта бетеге боз, астық тұқымдасты өсімдіктер өскен көлді аллювилі қазаншұңқырлы жазық.

7-ші ландшафт – Кәдімгі сортаңданған қара сорлы топырақта шалғындық дақылдық әртүрлі-өсімдікті және әртүрлі-дақылды кейбір жерлерде кешенді далалар, көктеректі қайыңды шоқтар және ормандармен аралас, әртүрлі-өсімдікті астық тұқымдастар, көктеректі-қайыңды орманшалар мен шоқ ормандарда әртүрлі өсімдіктер өскен көлді аллювилі қазаншұңқырлы жазық.

8-ші ландшафт – Кәдімгі қара топырақта астық тұқымдасты ойпаңдар мен көл маңайындағы қазаншұңқырларда кездесетін көктеректі-қайыңды орманшалар өскен көлді аллювилі қазаншұңқырлы жазық.

9-ші ландшафт – Кәдімгі қара карбонатталған, сортаңданған қара топырақта кешенді әртүрлі астық тұқымдастар өскен бетегелі, төскейлі-бетегелі және жусанды-бетегелі жыртылған жерлерде өскен көлді аллювилі қазаншұңқырлы жазық.

10-ші ландшафт – Кәдімгі карбонатталған, сортаңданған қара сорлы топырақта шалғындықтар орнындағы жыртылған жерлер және бай әртүрлі-өсімдікті –дақылды далалар, көктеректі-қайыңды және қарағайлы ормандармен аралас өскен делювийлі-пролювилі жазық.

11-ші ландшафт – Карбонатталған, сортаңданған кәдімгі қара топырақта бетеге боз, және астық тұқымдасты бетеге боз далалардың орнындағы жыртылған жерлерде өскен делювийлі-пролювилі жазық.

12-ші ландшафт - Кәдімгі карбонатталған қара топырақта шалғындық орнындағы жыртылған жерлер және бай әртүрлі-өсімдікті, астық тұқымдастылар өскен далалар, көктеректі-қайыңды және қарағайлы ормандармен аралас делювийлі-пролювилі жазық.

13-ші ландшафт – Сортаңданған кәдімгі қара топырақта шалғындық орнындағы жыртылған жерлер және бай әртүрлі-өсімдікті астық тұқымдасты далалар, көктеректі-қайыңды және қарағайлы ормандармен аралас өскен делювийлі-пролювилі жазық.

Дала

Денудациялық

14-ші ландшафт – Сортандаған оңтүстік қара топырақта әртүрлі-өсімдікті астық тұқымдасты және төскейлі-бетегелі, бетегелі-кебір жусанды өсімдіктер өскен сәл толқынды жазық.

15-ші ландшафт – Сорларда кешенді бетегелі-қылқанбозды, жусанды-бетегелі шалғындармен аралас, кейбір жерлерде тал-тоғайлы және талды-қайыңды ормандар өскен сәл толқынды жазық.

16-ші ландшафт – Карбонатты және сортандаған оңтүстік қара топырақта әртүрлі-өсімдікті астық тұқымдасты, бетеге боз өскен далалардың орнындағы жыртылған жерлердегі сәл толқынды жазық.

17-ші ландшафт – Сортанданған кәдімгі және оңтүстік қара сорлы топырақта әртүрлі-өсімдікті астық тұқымдастар өскен далалардың орнындағы жыртылған жерлердегі сәл толқынды жазық.

18-ші ландшафт – Кәдімгі қара және сортанданған топырақта біржылдық соранды кейде сарсазанды бірлестіктер және төскейшөпті-бетегелі кешендер, кейбір жусанды-астық тұқымдасты-бетегелі бірлестіктер, шалғындармен аралас көлдер жағалауында өскен терассалық кешендер мен көлдердің беткейлері.

19-ші ландшафт – Сорларда біржылдық соранды кейде сарсазанды бірлестіктер және төскейшөпті-бетегелі кешендер, кейбір жусанды, астық тұқымдасты-бетегелі бірлестіктер, шалғындармен аралас көлдер жағалауында өскен терассалық кешендер мен көлдердің беткейлері.

Аккумулятивті

20-ші ландшафт – Карбонатты оңтүстік қара топырақта бетеге боз, астық тұқымдасты далалардың орнындағы жыртылған жерлерде өскен делювийлі-пролювийлі жазық.

Солтүстік Қазақстан облысы аумағы Батыс Сібір ойпатының құрамына кіреді. Аймақтың жер бедері ұзаққа созылған мүсіндік-аккумулятивті және эрозиялық процестердің нәтижесі (Zavalishin, 1995). Эпейрогендік қозғалыстар өзен аңғарлары мен жалдар сияқты сызықтық жер бедері элементтерінің солтүстік-шығыс бағытын анықтауда шешуші рөл атқарған. Облыстың көп бөлігін абсолюттік биіктігі оңтүстікте 180–185 м-ден солтүстік және солтүстік-шығыста 115–120 м-ге дейін төмендейтін жазықтар алып жатыр. Қиыр оңтүстікте, Ақжар және Шал ақын аудандарының шегінде биіктігі 221 м-ге дейін жететін шағын гранитті төбелер кездеседі. Жер бедеріне тән ерекшелігі – көбінесе көлдер алып жатқан табақша тәрізді кішігірім батпақтар сияқты микроформалардың көптігі. Физикалық картада жер бедерінің үш морфологиялық түрі ажыратылады: Есіл өзенінің сол жағалауындағы қырқалы-ойпатты жазық; оң жағалауындағы Есіл-Ертіс суайрығының жазығы; және олардың арасындағы Есіл өзенінің аңғары. Солтүстік-батыс бөлігі бассейндердің ауысуымен және параллель созылған жалдармен сипатталатын қырқалы-бассейндік жазықпен ұсынылған.

3.2. Морфогенетикалық және физиологиялық сипаттамалары

Жер бедерінің, топырақ түзуші жыныстардың және ылғал режимінің әртүрлілігіне байланысты қарастырылып отырған орман өсіретін аймақтардың топырақ жамылғысы да алуан түрлі.

Орташа қарашіріктері бар қарапайым қара топырақтар. Морфологиялық тұрғыдан қара топырақтардың профилі келесі көрсеткіштермен сипатталады: қарашірік беткейінің қалыңдығы 60-80 см, жіңішкелері үшін 35-40 см, көпіршікті 30-50 см тереңдікте байқалады, карбонаттардың бөлінуі 70-100 см тереңдікте екінші гипс кездеседі.

Қарашірік беткейі ұсақ түйірлі құрылымға ие және қара сұр немесе қара дерлік түсті. Қарашірік мөлшері 7-10% аралығында. 80-90 см тереңдікте оның пайызы 1,2-ге дейін төмендейді. Өсімдіктерге жететін азот пен фосфордың мөлшері салыстырмалы түрде аз, бұл топырақтағы мәдени өсімдіктер белгілі бір дәрежеде азотқа және ішінара фосфор тыңайтқыштарына жауап береді. Қара топырақтың жоғарғы бөлігі орман дақылдарының тұқымдарының өсуіне және көшеттерін өсіруге қолайлы бейтарап реакцияға ие. Механикалық

құрамы бойынша бұл топырақтар ауыр сазды және жеңіл сазды сорттарға жатады (Baisholanov, 2017).

Қара топырақтардың жоғары агрегациясын атап өту қажет. Қарашірік беткейіндегі суға төзімді микроагрегаттар саны 40-50%-ға жетеді, бұл топырақтың эрозияға төзімділігінің жоғарылығын көрсетеді. Орташа қарашірікті қара топырақтар аймақтағы ең жақсы құнарлы және егістік топырақ болып табылады. Тың күйінде олар тек шекараларда және орман жолақтарының бойындағы тар таспаларда кездеседі. Далада және жапырақты ормандардың астында сортаң немесе шайылған қара топырақтар түзіледі, олар негізгі түрдің морфологиялық сипаттамаларын қайталайды, бірақ құрылымы азырақ және дефляцияға бейімділігімен ерекшеленеді. Бұл топырақтардың су режимі шайылмайды. Орман түзілуде және топырақ түзілуде жер асты сулары маңызды рөл атқармайды.

Шайылған қара топырақты жерлерде орман дақылдарын өсіруге болады. Қолқаның буферлік аймағында (30-50 м жолақ) сілтілі қара топырақтар басым, олардың қарашірік беткейі қалыңдығы шамамен 40 см, 30-50 см-ден бастап тұз қышқылынан бөлінген карбонаттар 70-100 см тереңдікте жатыр. Орман дақылдарын құрудың қиындығы қара топырақтардың тұздануы болып табылады. Әлсіз және орташа сортаң қара топырақтарда таза қайың дақылдарын жасауға болады деп саналады. Сілтілік қара топырақтар көң мен гипсті бір мезгілде енгізу арқылы егістік көкжиегін тереңдетуді талап етеді.

Сұр орман топырағының қалыңдығы 40-50 см, 50-80 см-ден бөлінген бос карбонаттар 80 см-ден астам тереңдікте кездеседі, әсіресе жоғарғы 10-15 см-ге жетеді 8-13%. Бұл топырақтар тұзданбаған. Сұр орман топырағы әлсіз құрылымды, сондықтан жыртқанда оңай шашылады, жел және су эрозиясына ұшырайды, қоректену режимінің нашарлығымен сипатталады. Ауыл шаруашылығы тұрғысынан сұр орман топырақтары қызығушылық тудырмайды. Алайда, орман шаруашылығы жағынан олар айтарлықтай өнімді. Сұр орман топырақтарының алуан түрі қара сұр және ашық сұр топырақтары. Қайыңның регенерациясы қанағаттанарлық.

Шалғынды-қара топырақтар белдеулік автоморфты қара топырақтар мен шалғынды топырақтар арасында өтпелі болып табылады. Қарашірік беткейінің қалыңдығы 70-80 см, қара сұр реңкте біркелкі боялған. Көпіршікті 50 см-ден, карбонаттардың бөлінуі 54 см-ден, гипстің бөлінуі 110 см-ден топырақтың механикалық құрамы бойынша орташа сазды және жеңіл сазды сорттар кең таралған (Baisholanov, 2017).

Шалғынды қара топырақтарда қоректік заттардың қоры жоғары, қарашірік мөлшері 12 пайызға жетеді, азот мөлшері де жоғары. Бұл топырақтар егістікке жарамды. Осы типтегі алуан, шалғынды-қара топырақты сортаңданған топырақтар үстіңгі қабаттағы қарашірікпен ерекшеленеді.

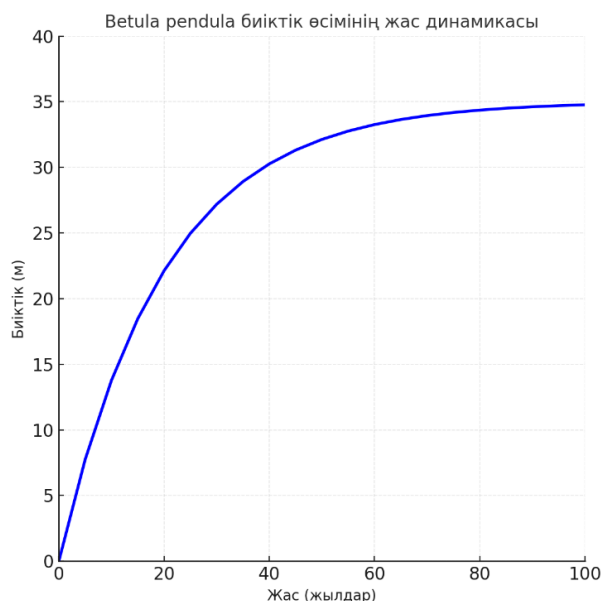
Шалғынды топырақтар гидроморфтық қатардың дербес топырақ түрін білдіреді. Олар дренаждық жағдай жақсарған кезде шалғынды-батпақты топырақтардан, сондай-ақ ойпаңдар 1,5 м және одан да көп тереңдегенде шалғынды-қара топырақтардан түзіледі.

Шалғынды топырақтар, шалғынды-қара топырақтан қарқынды күңгірт түсімен, профильдің жоғарғы 10 см қабатында кремнийлі ұнтақтың едәуір жинақталуымен, иллювиальды беткейдегі құрылымымен ерекшеленеді. Қарашірік горизонтының қалыңдығы 30-дан 60 см-ге дейін, жоғарғы горизонттарда қарашірік мөлшері 6-11% құрайды және 1-3% дейін күрт төмендейді. Дегенмен, шалғынды топырақтардың көпшілігінің тұздылығы жоғары екенін ескере отырып, оларды шабындық пен жайылымға қолайлы деп санау керек.

Аллювиалды-шалғынды топырақтар тек Есілдің жайылмасында және Иманбұрлықтың өзен арнасының жекелеген учаскелерінде қалыптасқан. Олардың қарашірік горизонты 90 см шамасында (Baisholanov, 2017).

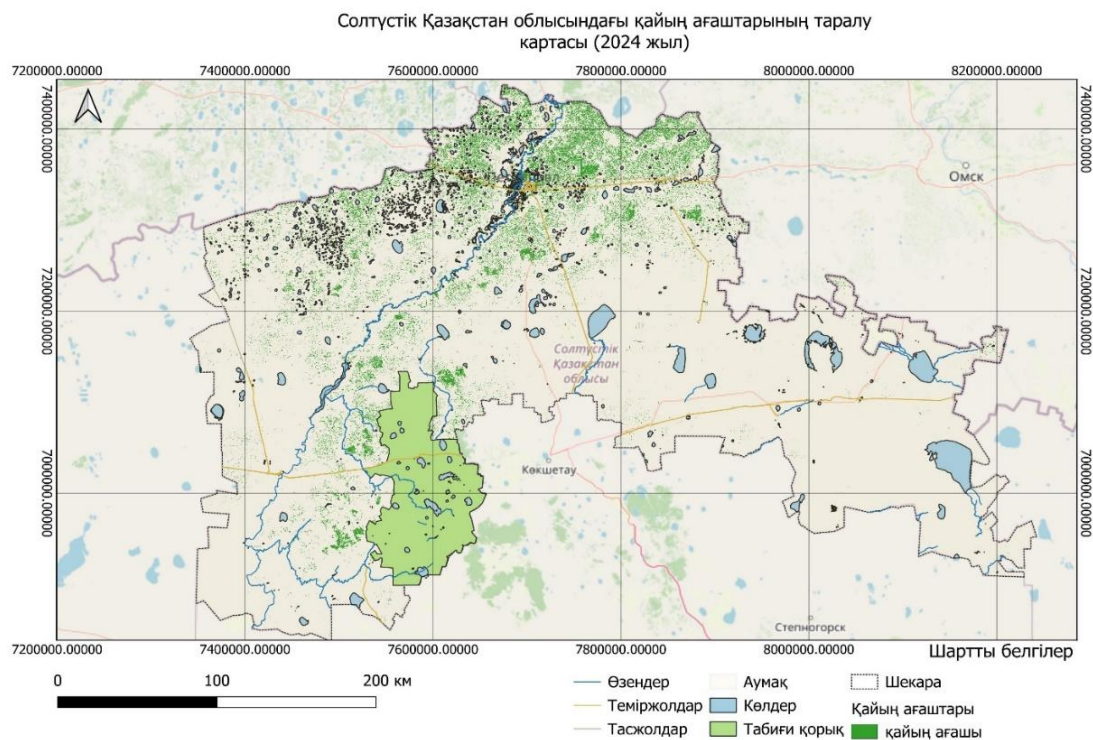
Қотыр қайың (*Betula pendula*) мен үлпек қайың (*Betula pubescens*) түрлерінің морфологиялық бейімділігі Солтүстік Қазақстанның орманды дала аймақтарындағы әртүрлі экологиялық жағдайларға жақсы икемделген. *B. Pendula* биіктігі 25–35 метрге, ал діңінің диаметрі 90 см-ге дейін жететін, сымбатты әрі салбыраған тәжі бар ағаш (Сурет 2). Оның қабығы бетулин деп аталатын майда еритін табиғи затқа бай, бұл зат өсімдікті күн сәулесінің

зиянды әсерінен қорғап, патогендерге қарсы тосқауыл қызметін атқарады (Borovikov & Ugolev, 1989; Vavilov, 1975).



Сурет 2. Қайыңның биіктік өсуінің жас динамикасы – 20 жасқа дейін экспоненциалды, кейін 40–50 жылдан кейін бәсеңдеп, 80–100 жаста асимптотаға жетеді

Жапырақтары ромб тәрізді сопақша, жиегі тісті, ұзындығы 4–8 см. және олар маусымдық өзгерістерге бейім: көктемде (сәуір-мамыр) бүршік жарып, күзде (қыркүйек-қазан) жапырағын түсіріп, топыраққа органикалық заттардың жиналуына ықпал етеді (Zimin, 1980) (Сурет 3).



Сурет 3. Солтүстік Қазақстан облысындағы қайың ағаштарының таралу картасы

Оған қарағанда, *Betula pubescens* түрі 18–25 метрге дейінгі биіктікте өсіп, бұтақтарының құрылымы тығыздау, ал жас өркендері түкті келеді. Бұл оны ылғалды ортаға жақсы бейімделген етеді (Abaturov et al., 1982) (Кесте 1).

Екі түрдің де тамыр жүйесі негізінен таяз, радиусы 12–18 метрге дейін таралады. Мұндай құрылым оларды Солтүстік Қазақстанда басым кездесетін қара және сұр топырақтардың жоғарғы қабаттарындағы ылғалды тиімді пайдалануға бейімдейді (Zavalishin, 1995).

Кесте 1. *Betula pendula* мен *Betula pubescens* сипаттамалары

Көрсеткіш	<i>Betula pendula</i>	<i>Betula pubescens</i>
Ересек ағаш биіктігі	25–35 м	18–25 м
Тәжі архитектурасы	Салбыраған, ажарлы	Тік, тығыз
Қабық	Ақ, тегіс, қабыршақтанғыш	Ақ, аз қабыршақтанатын
Жапырақ	Ромб тәріздес, 4–8 см	Дөңгелек-овальді, 3–6 см
Өркендер	Түксіз	Жас өркендері түкті
Тамыр жүйесі	Үстірт, радиус 12–18 м	Үстірт, гидротропты

Физиологиялық тұрғыдан алғанда, қайың - С3 фотосинтез жолы бойынша жұмыс істейтін өсімдік, яғни ол күнделікті 250–350 литрге дейін суды буландыру арқылы қоршаған ортаның микроклиматын жұмсартады (Kozlovskii, 1985). Көмірқышқыл газын (CO_2) сіңіру деңгейі маусым–шілде айларында ең жоғары шегіне жетеді - 12–18 мг/дм²/сағ, бұл күн ұзақтығымен тығыз байланысты (Zimin, 1980; Hetherington & Woodward, 2003).

Қайыңның аязға төзімділігі оның жасушаларында криопротектор (қанттар мен ақуыздар) жинақталуы арқылы қамтамасыз етіледі. Бұл ағашқа – 48°C дейінгі температурада құрылымдық зақымсыз өмір сүруге мүмкіндік береді (Beck et al., 2004; Oksanen et al., 2019).

Деректер ағаш жолақтары мен қаумал аумағындағы ағаштардың негізінде Айыртау және Қызылжар аудандарында жиналған.

3.3. Экологиялық орны және сукцессиондық рөлі

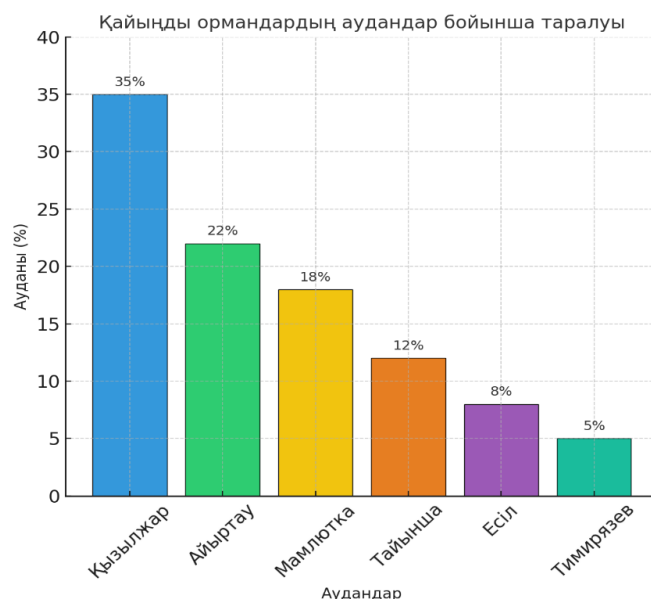
Солтүстік Қазақстанның орманды дала экожүйелерінде қайың эвритопты пионер ретінде постдистурбациялық аумақтарды (өрттен кейін, кесуден кейін) игереді (Alekseev, 1997; Vasilevich, 1983; Angelstam, 1998).

- *B. pendula* – эвтрофты, дренажды топырақтарда.

- *B. pubescens* – гидроморфты, мезотрофты субстраттарда, маусымдық су басуларға төзімді (Abaturov et al., 1982; Galitskii, 2001; Zavalishin, 1995; Goncharov, 2010).

Фитоценотикалық бірігуі симбиотикалық өзара әрекеттесулерді қамтиды: саңырауқұлақтармен окжаңбырық (*Boletus*) обабка (*Leccinum*) микориза азотфиксацияны күшейтіп, өнімділікті 15–25%-ға арттырады (Smith & Read, 2008).

Топырақтағы қарашірік мөлшері он жылда 1.5–2.5%-ға артады, ал тамыр жүйесі жылына 50 т/га топырақты эрозиядан сақтайды (Zavalishin, 1995) (Сурет 4).



Сурет 4. Гистограмма – Солтүстік Қазақстан облысы аудандары бойынша қайың ормандарының таралуы

3.4. Шаруашылық-экономикалық маңызы

Солтүстік Қазақстан облысында қайыңның шаруашылық қолданылуы көпқырлы:

Ағаш өнеркәсібі: тығыздығы 620–680 кг/м³, композит, жиһаз, биоэнергетика өндірісі. Жылдық дайындау көлемі – 80 – 120 мың м³ (Borovikov & Ugolev, 1989).

Шипалы маңызы: қабығынан алынатын бетулин, тритерпендер – иммуномодуляторлар (Borovikov & Ugolev, 1989).

Шырын: 1.5–2.5 л бір ағаштан, деструктивті әдістерге тыйым салынған (Borovikov & Ugolev, 1989; Kataev, 1978).

Агроорман мелорациясы: жылына 4–8 млн көшет отырғызылады, көміртекті секвестрация – 1.2–1.8 т CO₂/га/жыл (Nilsson et al., 2011).

Орман секторы өңірдің табиғатты пайдалану бойынша ЖӨӨ-нің 25–35%-ын береді, экотуризм де маңызды үлес қосады (Tileuberdi, 2022).

Антропогендік қауіптер мен консервациялық стратегиялар (Кесте 2):

Заңсыз пайдалану: шырын алу, кесу, 20–30% құрып кетуі қауіпін төндіреді (Alekseev, 1997;).

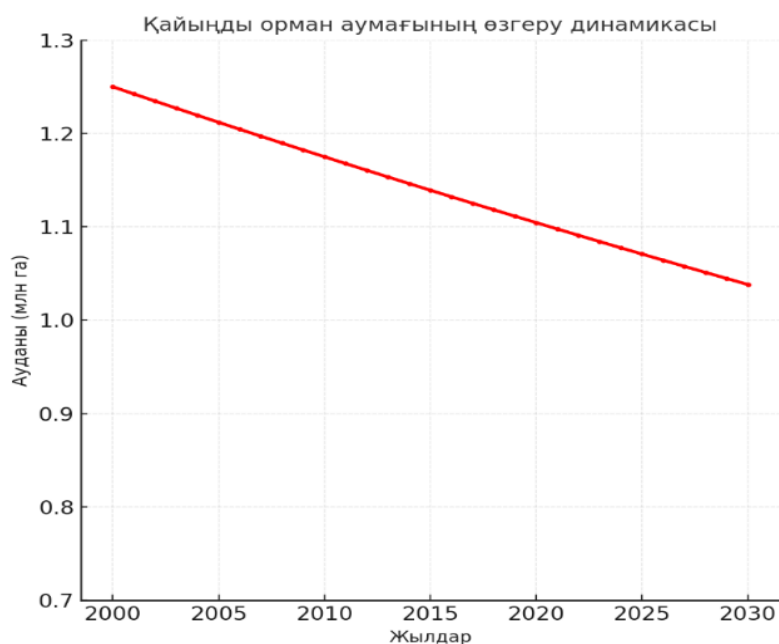
Өрт: жылына 200–300 га. (Galitskii, 2001).

Климаттық өзгерістер: құрғақшылық, өсу қарқыны 30–40%-ға азаяды (Oksanen et al., 2019; Lindner et al., 2010), (Сурет 5).

Зиянкестер: Scolytus ratzeburgi (рус. заболонник берёзовый) (Wermelinger, 2004).

Кесте 2. Betula spp. үшін антропогендік қауіптер мен консервациялық шаралар

Қауіп	Сипаттама	Консервация шаралары
Заңсыз пайдалану	Шырын алу, кесу	Реттеу, айыппұлдар
Өрттер	200–300 га/жыл	Мониторинг, ГАЖ, профилактика
Климаттық өзгерістер	Құрғақшылық, өсудің төмендеуі	Аффорестация, селекция
Зиянкестер	Энтомопатогендер, дефолиация	Биоконтроль, пестицидтер



Сурет 5. Солтүстік Қазақстан облысындағы қайың ормандары ауданының динамикасы, 2000–2024 жж. – онжылдықта 5–7%-ға азаю, 2030 жылғы болжамы да төмендеуде

3.5. Шетелдік қайың зерттеулерінің Солтүстік Қазақстанның орманды далаларының жағдайына қолданылуы

Шетелдік зерттеулерге сәйкес, қотыр қайың (*Betula pendula*) солтүстік ормандардың өзгермелі климаттық жағдайларға бейімделу үдерістерін зерттеуде индикаторлық түр ретінде қарастырылады (Oksanen et al., 2019). Еуропаның бореалды геожүйелерінде климаттың жылынуы мен CO_2 концентрациясының өсуі қайыңның биомассасы мен фотосинтетикалық белсенділігін арттыратыны, алайда зиянкестерге осалдықты күшейтіп, басқа ағаш түрлерімен бәсекелестікті ұлғайтып және орман жамылғысының құрылымын өзгертетіні анықталған (Silfver et al., 2020). Швецияда климаттық факторлар мен орман шаруашылығын жүргізу әсерінен қайың екпелерінің таралуы мен құрамындағы өзгерістер анықталған (Dubois et al., 2020).

Ұқсас үдерістер Солтүстік Қазақстанның орманды дала аймағында да байқалады, мұнда қайың геожүйелердің орнықтылығының негізгі элементі болып табылады. Фенноскандиямен салыстырғанда, Қазақстандағы екпелер климаттың айқын континенталдығына, температураның жоғары амплитудасына және мерзімдік құрғақшылықтарға ұшырайды. Соған қарамастан, қотыр қайың популяцияларының жоғары бейімделгіштігі мен генетикалық әртүрлілігі оның сәтті бейімделуіне мүмкіндік береді (Bolte et al., 2009). Қазақстандағы қайың ормандарын басқарудың қарқынды бағыттары түрлік әртүрлілікті сақтау, генетикалық ресурстарды қорғау және климаттық өзгерістердің әсерін жұмсарту шараларын енгізу болып табылады (Messier et al., 2013).

Бұл зерттеулердің салыстырмалы нәтижелері Солтүстік Қазақстан облысы жағдайында қайың популяцияларының геожүйелік тұрақтылығын тереңірек бағалауға мүмкіндік беріп, адаптациялық ерекшеліктерді орнықты орман басқару тәжірибесіне енгізу қажеттілігін нақты көрсетеді.

4. Талдау

Зерттеу нәтижелері Солтүстік Қазақстан облысының геожүйелеріндегі орманды дала *Betula pendula* мен *B. pubescens* түрлерінің морфологиялық (биіктігі 25–35 м, таяз тамыр

жүйесі), физиологиялық (С3 фотосинтез, тәулігіне 250–350 л су буландыру, – 48 °С аязға төзімділік) және экологиялық (пионерлік сукцессия, микориза арқылы өнімділікті 15–25%-ға арттыру) бейімділіктерін растайды. Бұл түрлердің таралуы және адаптациялық стратегиялары тікелей аймақтың ландшафттық құрылымына байланысты. Есіл өзенінің асимметриялық аңғары мен көптеген ойпаң-көлдік қазаншұңқырлардың болуы ылғалды жинақтап, микроклиматтық тұрғыдан қолайлы шоқыларды құрайды, бұл қайың популяцияларының тіршілік етуі үшін қажетті экологиялық орнын қалыптастырады. Аккумуляциялық жазықтардың шалғынды-орманды алқаптарынан денудациялық үстірттердің құрғақ далаларына дейінгі ландшафттық түрлердің фенотиптік икемділігі мен популяциялық дифференциациясының негізгі драйвері болып табылады. Негізінен орманды дала ландшафттарындағы (1-13) топырақ жамылғылары өте қолайлы келеді. Айтылған түрлердің таралуы облыстың жер бедері ерекшеліктерімен тығыз байланысты. Есіл өзенінің кең (10–15 км) асимметриялық аңғары мен оның террасалары (жоғарғы терраса жайылмадан 40–50 м биік) қайың ормандарының шоғырлануына қолайлы ылғалды жағдай қалыптастырады. Дәл осы шағын жер бедері элементтері – ойпаттар, батпақшалар мен өзен жағалаулары қайыңның топырақ-гидрологиялық тепе-теңдікті тұрақтандырудағы рөлін күшейтеді. Бұл түрлер биоалуантүрлілікті сақтауда, ағаш өнеркәсібі мен агроорманмелиорациясында маңызды. Алайда 2000–2024 жылдардың мәліметтері бойынша антропогендік қауіптер қайыңның таралу ауданын 5–7%-ға қысқартты. Шетелдік зерттеулермен салыстырғанда, Солтүстік Қазақстан облысы қайыңдарының континенталды климаттағы жоғары резистенттілігі генетикалық әртүрлілікке байланысты екені расталады. Болашақта ГАЖ-мониторингі, селекция және жасанды орман отырғызуды күшейту ұсынылады.

5. Қорытынды

Солтүстік Қазақстан облысының аймақтық ландшафттарының негізгі ерекшелігі оның орманды дала мен дала ландшафттарының күрделі өзара әрекеттесуінде көрінді. Зерттеу барысында анықталғандай облыстың көп бөлігін орманды дала ландшафттары алып жатыр (1-13 ландшафттар), карта негізінде олардың орналасуы облыстың солтүстік, орталық, батыс, оңтүстігінің басым бөлігін алып жатыр. Ал далалық ландшафт түрлері көбіне оңтүстік шығыс бөлігін қамтиды (14-20 ландшафттар). Бұл өз кезегінде аккумуляциялық жазықтардың шалғынды-орманды алқаптары мен денудациялық сәл толқынды үстірттердің құрғақ далалары арасында топырақ-ылғалдық градиенттер мен микроклиматтық шоқыларды қалыптастырады. Бұл ландшафттық мозаиканың табиғи салдары ретінде облыс аумағында орман жамылғысы фрагменттелген күйде – негізінен қайың шоқылары түрінде таралған. Бұл континенталды климаттың қатты амплитудалы температурасы мен шектеулі жауын-шашын мөлшерімен бірге орманды дала геожүйелерінің өзіндік тұрақтылығын анықтайды. Мұндай климаттық-ландшафттық жағдайға *Betula pendula* (қотыр қайың) және *Betula pubescens* (үлпек қайың) түрлері морфо-физиологиялық (таяз тамыр жүйесі, С3 фотосинтезі, криотолеранттылық) және экологиялық (пионерлік сипат, микоризалық симбиоз) жоғары бейімделу дәрежесі арқасында сәтті бейімделіп, аймақтың фитоценоздарында басым орын алады, топырақтың құнарлылығын сақтауға, эрозияға қарсы тұруға және биоалуантүрлілікті қолдауға белсенді үлес қосады. Алайда, антропогендік қысымның өсуі және климаттың өзгеруінің әсері орман алқабын тарылтуда, бұл жергілікті экожүйелердің тұрақтылығын қамтамасыз ету мәселесін өзекті етеді. Осыған байланысты, облыстағы қайың ормандарын ұтымды пайдалану және қалпына келтіру үшін келесі іс-шараларды жүзеге асыру қажет: 1) ГАЖ негізінде орман жамылғысының күйін, деградация процестерін және өрт қаупін жүйелі мониторингілеу; 2) ландшафттық жағдайларға бейімделген жергілікті *Betula* тұқымдасының экотиптерін іріктеп, олардың генетикалық әртүрлілігін сақтай отырып, аумақтық аффорестация бағдарламаларын әзірлеу; 3) деградацияланған жерлерде, әсіресе эрозияға ұшыраған беткейлер мен шағын өзен аңғарларында, қайыңды мелиоративтік отырғызуларды кеңейту; 4) орман шаруашылығын геожүйелік тәсілге негіздеп, орман қорын заңсыз кесуге

жол бермеу, сонымен қатар орманды пайдалануды агроорманшылық жүйелермен үйлестіру. Осы шаралардың кешенді іске асырылуы Солтүстік Қазақстан облысының орманды дала ландшафттарының экологиялық тұрақтылығын сақтауға, сондай-ақ өңірдің әлеуметтік-экономикалық дамуына үлес қосуға мүмкіндік береді.

6. Қосымша материалдар: жоқ.

7. Авторлардың үлестер

Жұмыстың тұжырымдамасын жазу және оны сыни тұрғыдан қарау, жұмыс нәтижелерін жинау, талдау және түсіндіру, мақала мәтінін өңдеу, картографиялық мәліметтерді жинақтау және өңдеу - О.Н.; мақала мазмұнын сыни тұрғыдан тексеру, мақаланың соңғы нұсқасын жариялауға бекіту – Қ.Ж.

8. Авторлар туралы ақпарат

Оспан, Нұртілеу – зерттеуші, магистр студенті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; nurtileuospanov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-4481-2286>

Қарагойшин, Жасқайыр - биология ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; k.zhashaiyr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7166-4483>

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеу сыртқы қаржыландыруды алған жоқ.

10. Алғыстар: жоқ.

11. Мүдделер қақтығыстары: Мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейміз.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Abaturon, Y. D., Zvorykina, K. V., & Ilyushchenko, A. F. (1982). Types of birch forests in the central part of the southern taiga (Tipy berezovykh lesov tsentralnoi chasti yuzhnoi taigi in Russian). <https://ju.fi/Record/vaari.2113588?lng=en-gb>
2. Alekseev, P. V. (1997). Reshaping felling and management basics in pyrogenic birch forests of the Middle Volga region (Rubki pereformirovaniya i osnovy khozyaistva v pirogennykh bereznyakakh Srednego Povolzhya in Russian). *Forest Bulletin (Lesnoe khozyaistvo)*, 6, 19–22.
3. Amosova, I. B., & Feklistov, P. A. (2009). Analysis of the anatomical structure of birch wood (Analiz anatomicheskogo stroeniya drevesiny berezy in Russian). *Forest bulletin (Lesnoi vestnik)*, 2(65), 16–19.
4. Angelstam, P. K. (1998). Maintaining and restoring biodiversity in European boreal forests by developing natural disturbance regimes. *Journal of Vegetation Science*, 9(4), 593–602. <https://doi.org/10.2307/3237276>
5. Baisholanov, S. S. (2017). Agro-climatic resources of the North Kazakhstan region: Scientific and applied handbook (Agroklimaticheskie resursy Severo-Kazakhstanskoi oblasti: Nauchno-prikladnoi spravochnik in Russian). <https://ingeo.kz/wp-content/uploads/2017/11.pdf>
6. Beck, E. H., Heim, R., & Hansen, J. (2004). Plant resistance to cold stress: Mechanisms and environmental signals triggering frost hardening and dehardening. *Journal of Biosciences*, 29(4), 449–459. <https://doi.org/10.1007/BF02712118>
7. Bolte, A., Ammer, C., Löf, M., Madsen, P., Nabuurs, G. J., Schall, P., Seidel, D., & Rock, J. (2009). Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24(6), 473–482. <https://doi.org/10.1080/02827580903418224>

8. Borovikov, A. M., & Ugolev, B. N. (1989). Wood handbook (Spravochnik po drevesine in Russian). Forest industry (Lesnaya promyshlennost). <https://www.booksite.ru/rusles/29.html>
9. Dubois, M., Lindbladh, M., & Felton, A. (2020). Birch distribution and changes in stand structure in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 478, 118517. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118517>
10. Galitskii, V. V. (2001). *Types of final felling in the forests of the North-West of the European part of Russia* (Tipy rubok glavnogo polzovaniya v lesakh Severo-Zapada Evropeiskoi chasti Rossii in Russian) (pp. 115–128), Nauka.
11. Goncharov, V. F. (2010). *Pine forests of the North-West of Russia: Structure, productivity, dynamics* (Sosnovye lesa Severo-Zapada Rossii: Struktura, produktivnost, dinamika in Russian) (pp. 142–155), Arkhangelsk.
12. 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>
13. Grigorev, I. V. (2012). Features of growth and development of silver birch seedlings in pine plantations (Osobennosti rosta i razvitiya podrostka berezy ponikloy v kulturakh sosny in Russian). *Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management* (Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie), 1, 5–11.
14. Hetherington, A. M., & Woodward, F. I. (2003). The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature*, 424(6951), 901–908. <https://doi.org/10.1038/nature01843>
15. Kozlovskii, B. I. (1985). *Physiology of woody plants* (Fiziologiya drevesnykh rastenii in Russian). (pp. 88–102), Lesnaya promyshlennost.
16. Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., & Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
17. Messier, C., Puettmann, K. J., & Coates, K. D. (Eds.). (2013). *A guide to the ecosystem management of complex forests* (pp. 156–170), Routledge.
18. Nilsson, U., Fahlvik, N., Johansson, U., Lundström, A., & Rosvall, O. (2011). Simulation of the effect of intensive forest management on forest production in Sweden. *Forests*, 2(1), 373–393. <https://doi.org/10.3390/f2010373>
19. Oksanen, E., Kontunen-Soppela, S., Riikonen, J., & Rousi, M. (2019). Birch as a model species for the acclimation and adaptation of northern forest ecosystems to changing environment. *Forest Ecology and Management*, 437, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.045>
20. Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed., pp. 189–205), Academic Press.
21. Tileuberdi, B. (2022). Modern technologies of forestry (Orman sharuashylygynyn zamanai tekhnologiyalary in Kazakh). Ministry of Agriculture of Kazakhstan.
22. Vasilevich, V. I. (1983). *Essays on theoretical phytocenology* (Ocherki teoreticheskoi fitotsenologii) (pp. 62–75), Nauka.
23. Wermelinger, B. (2004). Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus*: A review of recent research. *Forest Ecology and Management*, 202(1–3), 67–82. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.018>
24. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., & Arino, O. (2021). *ESA WorldCover 10 m 2020 v100* [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>
25. Zavalishin, A. V. (1995). *Ecological bases of forest restoration* (Ekologicheskie osnovy vobnovleniya lesov in Russian) (pp. 104–118), Nauka.
26. Zimin, I. V. (1980). *Biological bases of birch cultivation* (Biologicheskie osnovy vyrashchivaniya berezy in Russian) (pp. 54–67), Lesnaya promyshlennost.

Integrative analysis of the adaptation of the genus *Betula* and anthropogenic impact in the forest-steppe landscapes of the North Kazakhstan region

Nurtileu Ospan, Zhaskhaiyr Karagoishin

Abstract. This article reveals the physiological and ecological attributes of birch trees adapted to the harsh continental climate of the North Kazakhstan region. The region's landscapes primarily consist of forest-steppe and steppe zones. The northern part is characterized by meadow-forest landscapes, the central part by typical birch forest-steppes, and the southern part by a distinct steppe character. The highest level of forest cover (up to 20%) is observed in the saline plains of the north. This indicator plays a crucial role in maintaining the ecological balance of the region.

Twenty types of landscapes have been identified in the region, 13 of which belong to the forest-steppe and 7 to the steppe landscape. Fertile chernozems and birch groves (kolks) are widespread in the accumulative plains. In the denudational, slightly undulating plains, southern chernozems and salt marshes are more common, dominated by fescue-feather grass plant communities.

The birch species *Betula pendula* (silver birch) and *Betula pubescens* (downy birch) form the central core of the region's phytocenoses and appear in the form of fragmented "forest groves." Their physiological and ecological adaptation features allow them to exist sustainably within the complex continental climate. Comprehensive study and conservation of birch populations are essential for regulating soil-water balance, preserving biodiversity, and increasing socio-economic importance. Ensuring their ecological stability requires special protection measures, including the use of modern geoinformation technologies. This research is considered a vital step toward effective natural resource management and the minimization of degradation processes.

Keywords: landscape; anthropogenic pressure; climate variability; *Betula pendula* (silver birch); *Betula pubescens* (downy birch); ecosystem resilience; geoinformation technologies.

Интегративный анализ адаптации рода *Betula* и антропогенного воздействия в лесостепных ландшафтах Северо-Казахстанской области

Нуртилеу Оспан, Жасхайыр Карагойшин

Аннотация. В данной статье на основании полевых исследований и ландшафтных данных раскрываются физиологические и экологические атрибуты березы, адаптированной к суровым условиям континентального климата Северо-Казахстанской области. Ландшафты региона в основном состоят из лесостепных и степных зон. Северная часть области характеризуется лугово-лесным ландшафтом, центральная - типичной березовой лесостепью, а южная - выраженным степным характером. Самый высокий уровень лесистости (до 20%) наблюдается на солончаковых равнинах севера области. Этот показатель играет критически важную роль в поддержании экологического баланса региона.

На территории области выявлено 20 типов ландшафтов, 13 из которых относятся к лесостепным, а 7 - к степным. На аккумулятивных равнинах широко распространены плодородные черноземы и березовые колки. На денудационных слабовсхолмленных равнинах чаще встречаются южные черноземы и солончаки, где преобладают типчаково-ковыльные растительные сообщества.

Виды березы *Betula pendula* (береза повислая) и *Betula pubescens* (береза пушистая) являются центральным ядром фитоценозов региона и встречаются в виде фрагментированных «лесных

колков». Их физиолого-экологические адаптационные особенности позволяют им стабильно существовать в условиях сложного континентального климата. Всестороннее изучение и сохранение популяций березы крайне важно для регулирования почвенно-водного баланса, сохранения биоразнообразия и повышения социально-экономической значимости. Обеспечение их экологической устойчивости требует специальных мер защиты, включая использование современных геоинформационных технологий. Данное исследование считается важным шагом, направленным на эффективное управление природными ресурсами региона и минимизацию процессов деградации.

Ключевые слова: ландшафт; антропогенная нагрузка; изменчивость климата; *Betula pendula* (береза повислая); *Betula pubescens* (береза пушистая); устойчивость экосистем; геоинформационные технологии.

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.

– 4 (153)/2025 – Астана: ЕҰУ. 148 б.

Шартты б.т. – 20.43. Таралымы – сұраныс бойынша.

Басуға қол қойылды: 24.12.2025

Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://bulchmed.enu.kz>

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2.
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті Тел.: +7(71-72) 70-95-00(ішкі 33-207)
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің баспасында басылды