

ISSN (Print) 3107-278X

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

**ХАБАРШЫСЫ**  
**BULLETIN** **ВЕСТНИК**

of L.N. Gumilyov  
Eurasian National University

Евразийского национального  
университета имени Л.Н. Гумилева

**ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ сериясы**

**CHEMISTRY. GEOGRAPHY Series**

**Серия ХИМИЯ. ГЕОГРАФИЯ**

**№ 1(154)/2026**

**1995 жылдан бастап шығады**

**Founded in 1995**

**Издается с 1995 года**

**Жылына 4 рет шығады**

**Published 4 times a year**

**Выходит 4 раза в год**

Астана, 2026

Astana, 2026

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

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

Бас редактор (география):	<b>Рамазанова Н.Е.</b> <i>PhD, қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан</i>
Жауапты хатшы (химия):	<b>Уали А.С.</b> <i>х.ғ.к., қауымдас. проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан</i>
Жауапты хатшы (география):	<b>Самарханов К.Б.</b> <i>з.ғ.к., PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан</i>

**Редакция алқасы:  
Химия**

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

**География**

<b>Атасой Е.</b>	PhD, проф., Бурса-Улудаг Университеті, Бурса, Турция
------------------	--

<b>Ахмеденов К.М.</b>	проф., М. Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан мемлекеттік университеті, Орал, Қазақстан
<b>Дунең А.Н.</b>	ғ.ғ.д., проф., Алтай мемлекеттік университеті, Барнаул, Ресей
<b>Добриса М.П.</b>	Jovan Cvijic атындағы география институты, Сербия ғылым және өнер академиясы, Белград, Сербия
<b>Егинбаева А.Е.</b>	PhD, доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
<b>Мукаев Ж.Т.</b>	қаум. проф., Шәкәрім атындағы Семей мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан
<b>Мусабаева М.Н.</b>	ғ.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
<b>Озгелдинова Ж.О.</b>	PhD, проф. м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
<b>Песик А.М.</b>	Jovan Cvijic атындағы география институты, Сербия ғылым және өнер академиясы, Белград, Сербия
<b>Реджеп Э.</b>	проф., Балікесір университеті, Балікесір, Түркия
<b>Шультц Р.С.</b>	проф., Айова штаты университеті, Айова, АҚШ
<b>Саипов А.А.</b>	п.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
<b>Токсанбаева С.Т.</b>	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:** Алағуджаева Манира Амангельдиевна, Белгібаева Дана Сапарғалиқызы

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

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

Мерзімділігі: жылына 4 рет

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігінде 05.12.2025 ж. №

KZ13VPY00135983 тіркеу куәлігімен тіркелген

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

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

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

© Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

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

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

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

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

*Executive Secretary*

*(Chemistry):*

**Uali A.S.**

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

*Executive Secretary*

*(Geography):*

**Samarkhanov K.B.**

*Cand.Geogr.Sci., PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

**Editorial board  
Chemistry**

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

**Geography**

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

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

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

**Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University.**

**Chemistry. Geography Series**

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

Periodicity: 4 times a year

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

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

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

**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 (химия):

**Уали А.С.**

к.х.н., ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Ответственный  
секретарь (география):

**Самарханов К.Б.**

к.г.н., PhD, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

**Редакционная коллегия:**

**Химия**

**Адекенов С.М.**

д.х.н., проф., академик НАН РК, Международный научно-производственный холдинг Фитохимия, Караганда, Казахстан

**Айбульдинов Е.К.**

PhD, НИИ новых химических технологий, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

**Байкенов М.И.**

д.х.н., проф., Карагандинский национальный исследовательский университет им. Е.А.Букетова, Караганда, Казахстан

**Бакибаев А.А.**

д.х.н., проф., Томский политехнический университет, Томск, Россия

**Еркасов Р.Ш.**

д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

**Иргибаева И.С.**

д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

**Искакова Ж.Б.**

к.х.н., ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

**Кирюхин М.В.**

к.х.н., ассоц.проф., Accelerated Materials Pte Ltd, Сингапур

**Корольков И.В.**

PhD, ассоц.проф., Институт ядерной физики, Астана, Казахстан

**Маскевич А.А.**

д.ф.-м.н., профессор, Гродненский государственный университет имени Я. Купалы, Гродна, Беларусь

**Мустафин Р.И.**

PhD, асс. проф., Казанский государственный медицинский Университет, Казань, Россия

**Сафаров Р.З.**

к.х.н., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

**Султанова Н.А.**

д.х.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

**Филиппов С.К.**

PhD, проф., Университет Академия Або, Турку, Финляндия

**Хуторянский В.В.**

PhD, проф., Университет Рединга, Рединг, Объединенное Королевство

**География**

**Атасой Е.**

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

**Ахмеденов К.М.**

проф., Западно-Казахстанский государственный университет им. М. Утемисова, Уральск, Казахстан

**Дунец А.Н.**

д.г.н., проф., Алтайский государственный университет, Барнаул,

	Россия
<b>Добриса М.П.</b>	Институт географии Jovan Cvijić, сербская академия наук и искусств, Белград, Сербия
<b>Егинбаева А.Е.</b>	PhD, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
<b>Мукаев Ж.Т.</b>	ассоц.проф., Семипалатинский государственный университет имени Шакарима, Семей, Казахстан
<b>Мусабаева М.Н.</b>	д.г.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
<b>Озгелдинова Ж.О.</b>	PhD, ассоц.проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
<b>Песик А.М.</b>	Институт географии Jovan Cvijić, сербская академия наук и искусств, Белград, Сербия
<b>Реджеп Э.</b>	проф., Университет Баликесир, Баликесир, Турция
<b>Шультц Р.С.</b>	проф., Университет штата Айовы, Айова, США
<b>Саипов А.А.</b>	д.п.н., проф., Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
<b>Токсанбаева С.Т.</b>	PhD, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

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

**Технические секретари:** Алагуджаева Манира Амангельдиевна, Бельгибаева Дана Сапаргалиевна

**Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева.**

**Серия Химия. География**

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

Периодичность: 4 раза в год

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

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

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

© Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

МАЗМҰНЫ/ CONTENT/ СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ/ CHEMISTRY

- У. Әмзеева, А. Төлепберген, С. Хуанбике, Т. Карунакаран, А. Байсеитова, Ж. Женис**  
*Cichorium intybus L. жер асты бөлігінің салыстырмалы фитохимиялық бейіні*
- У. Амзеева, А. Төлепберген, С. Хуанбике, Т. Карунакаран, А. Байсеитова, Ж. Женис**  
*Сравнительный фитохимический профиль подземных частей Cichorium intybus L.*
- U. Amzeyeva, A. Tolepbergen, S. Huanbieke, Th. Karunakaran, A. Baiseitova, J. Jenis**  
*Comparative phytochemical profiling of the underground parts of Cichorium intybus L.* 10
- Ж. Бахытжанова, М. Егамкулов, А. Бекмаханова, Г. Тажкенова, А. Нурпеисова, Ж. Бакенов, А. Муканова**  
*SnO<sub>2</sub> жұқа пленкалы литий-ионды аккумуляторлардың аноды ретінде электрохимиялық сипаттамаларына шашырау шарттарының әсері*
- Ж. Бахытжанова, М. Егамкулов, А. Бекмаханова, Г. Тажкенова, А. Нурпеисова, Ж. Бакенов, А. Муканова**  
*Влияние условий осаждения на электрохимические характеристики тонких пленок SnO<sub>2</sub> в качестве анодов для литий-ионных аккумуляторов*
- Zh. Bakhytzhanova, M. Yegamkulov, A. Bekmakhanova, G. Tazhkenova, A. Nurpeissova, Zh. Bakenov, A. Mukanova**  
*Effect of deposition conditions on the electrochemical characteristics of SnO<sub>2</sub> thin films as anodes for lithium-ion batteries* 26
- Н. Далабаева, Г. Костакис, Н. Сарова, Г. Сдикова, Ж. Қорғанбаева, Т. Акылбекова**  
*Металл органикалық қаңқаны (ZIF-8) синтездеу және оның ағынды суды тазартуға қолданылуы: шолу*
- Н. Далабаева, Г. Костакис, Н. Сарова, Г. Сдикова, Ж. Қорғанбаева, Т. Акылбекова**  
*Синтез металлоорганического каркаса (ZIF-8) и применение для очистки сточных вод: обзор*
- N. Dalabayeva, G. Kostakis, N. Sarova, G. Sdikova, Zh. Korganbayeva, T. Akylbekova**  
*Synthesis of metal-organic framework (ZIF-8) and application in wastewater treatment: review* 37
- Б. Митупов, Д. Кузнецова, Н. Кожемякин, О. Роор, А. Стукалов, М. Гавриленко**  
*Полиметакрилат сенсорындағы 1-нафтолдың колориметриялық анықтамасы*
- Б. Митупов, Д. Кузнецова, Н. Кожемякин, О. Роор, А. Стукалов, М. Гавриленко**  
*Колориметрическое определение 1-нафтола на полиметакрилатном сенсоре*
- B. Mitupov, D. Kuznetsova, N. Kozhemyakin, O. Roor, A. Stukalov, M. Gavrilenko**  
*Colorimetric determination of 1-naphthol on a polymethacrylate sensor* 60
- Л. Толымбекова, А. Казбекова, А. Бақтыбек, Г. Сейтенова, А. Турсынова**  
*Біріншілік және екіншілік полимерлерді радиациялық тігу әдістері: полимерлерді радиациялық тігудің тиімділігі мен мүмкіндіктері*
- Л. Толымбекова, А. Казбекова, А. Бақтыбек, Г. Сейтенова, А. Турсынова**  
*Радиационнаяшивка первичных и вторичных полимеров: эффективность и возможности*

радиационной сшивки полимеров

**L. Tolymbekova, A. Kazbekova, A. Baktybek, G. Seitenova, A. Tursynova**

*Radiation crosslinking of primary and secondary polymers: efficiency and possibilities of radiation crosslinking of polymers* 75

## ГЕОГРАФИЯ/ GEOGRAPHY

**Р. Асқарұлы, А. Абилова, А. Сыздықов, Х. Молдамурат**

*Кескінді талдау алгоритмдерін салыстыру және синтездеу: ұшқышсыз ұшу аппараттарына негізделген қоршаған ортаны бақылау үшін NDVI және RGB өңдеу*

**Р. Асқарұлы, А. Абилова, А. Сыздықов, Х. Молдамурат**

*Сравнение и синтез алгоритмов анализа изображений; обработка NDVI и RGB для мониторинга окружающей среды на основе беспилотных летательных аппаратов*

**R. Askaruly, A. Abilova, A. Syzdykov, Kh. Modamurat**

*Comparison and synthesis of image analysis algorithms: NDVI and RGB processing for UAV-based environmental monitoring* 100

**С. Ахметов, С. Аманов**

*Еділ дельтасындағы Кизгач арнасының су ағынын Жайық өзенінің су ағынымен салыстырмалы талдауы*

**С. Ахметов, С. Аманов**

*Сравнительный анализ водности протоки Кизгач в дельте Волги с водностью реки Жайык*

**S. Akhmetov, S. Amanov**

*Comparative analysis of the water flow of the Kigach channel in the Volga delta with the water flow of the Zhaiyk River* 118

**Г. Оспанова, А. Мылқайдаров, А. Сансызбаева**

*Астана қаласының азық-түлік белдеуін қалыптастырудағы агроөнеркәсіптік кешеннің экономикалық-географиялық ерекшеліктері*

**Г. Оспанова, А. Мылқайдаров, А. Сансызбаева**

*Экономико-географические особенности агропромышленного комплекса в формировании продовольственного пояса города Астаны*

**G. Ospanova, A. Mylkaydarov, A. Sansyzbayeva**

*Economic and geographical features of the agro-industrial complex in the formation of the food belt of Astana city* 135

**В. Расулзаде**

*Абшерон түбегінің жағалау аймағында желдің жылдамдығы мен қуаты биіктікке байланысты өзгереді*

**В. Расулзаде**

*Изменение скорости и направления ветра с высотой в прибрежной зоне Апшеронского полуострова*

**V. Rasulzadeh**

*Wind speed and wind power changes with height in the Absheron peninsula coastal zone* 154

**И. Седелников, С. Исмагулова, П. Дмитриев**

*Ағаш өсімдіктерінің спектрлік ерекшеліктерін талдау үшін спутниктік мәліметтерді пайдалану мүмкіндіктері*

**И. Седелников, С. Исмагулова, П. Дмитриев**

*Возможности использования спутниковых данных для анализа спектральных особенностей древесной растительности*

**I. Sedelnikov, S. Ismagulova, P. Dmitriev**

*The possibilities of using satellite data to analyze the spectral features of woody vegetation* 171

## Comparative phytochemical profiling of the underground parts of *Cichorium intybus* L.

Ulpan Amzeyeva<sup>1,2</sup>, Aiya Tolepbergen<sup>1,2</sup>, Suhaer Huanbieke<sup>2</sup>, Thiruventhan Karunakaran<sup>3</sup>, Aizhamal Baiseitova<sup>1,2</sup>, Janar Jenis<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Research Institute for Natural Products & Technology, Almaty, Kazakhstan; [ulpan-92.kz@mail.ru](mailto:ulpan-92.kz@mail.ru), [nis.sovetbek@gmail.com](mailto:nis.sovetbek@gmail.com), [aizhabaiseitova@gmail.com](mailto:aizhabaiseitova@gmail.com)

<sup>2</sup>The Research Center for Medicinal Plants, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; [janarjenis@kaznu.kz](mailto:janarjenis@kaznu.kz), [1549372750@qq.com](mailto:1549372750@qq.com)

<sup>3</sup>Centre for Drug Research, Universiti Sains Malaysia, 11800 USM, Pulau Pinang, Malaysia; [thiruventhan@usm.my](mailto:thiruventhan@usm.my)

\*Correspondence: [janarjenis@kaznu.kz](mailto:janarjenis@kaznu.kz)

**Abstract:** The roots of medicinal plants are rich in vital phytochemicals, serving as an important source of bioactive compounds for pharmaceutical and food industries. *Cichorium intybus* L. (chicory), a perennial plant of the *Asteraceae* family, is well known for its nutritional and medicinal properties. This study conducted a comparative investigation on the phytochemical composition of the underground parts (roots) of *C.intybus* L. cultivated in Kazakhstan and imported from China. Quantitative analysis showed that the cultivated roots contained 4.5±0.1% moisture, 2.69±0.11% ash, and 82.25±3.5% extractive substances (90% ethanol), while the imported samples contained 7.0±0.3%, 7.52±0.3%, and 85.78±3.3%, respectively. The cultivated roots also exhibited higher levels of polysaccharides (0.838±0.04%), tannins (2.18±0.1%), coumarins (2.407±0.13%), and saponins (1.326±0.07%) compared to the imported samples (0.444±0.025%, 1.75±0.08%, 0.095±0.01%, and 0.573±0.06%, respectively). GC-MS chemical profiling analysis further revealed the presence of major phytosterols, including stigmasterol and campesterol. The comparative findings indicate compositional variations influenced by geographical and cultivation factors, underscoring the potential of *C.intybus* L. roots as valuable sources of phytochemicals for nutraceutical and pharmaceutical applications.

**Citation:** Amzeyeva, U., Tolepbergen, A., Huanbieke, S., Karunakaran, T., Baiseitova, A., Jenis, J. (2026). Comparative phytochemical profiling of the underground parts of *Cichorium intybus* L. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 154(1), 10-25. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-10-25>

Academic Editor:  
E.E. Kopsishev

Received: 21.05.2025  
Revised: 09.02.2026  
Accepted: 28.02.2026  
Published: 31.03.2026



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

**Keywords:** *Cichorium intybus* L.; phytochemistry; macroelements; microelements; GC-MS.

### 1. Introduction

Herbal remedies in both traditional and modern society have a long history as a combination purifier that has been approved by the Food and Drug Administration (Butler, 2004; Marcy et al., 2005; Koehn et al., 2006; Jones et al., 2006). *Cichorium intybus* L. is a known plant with many food costs and various biological activities. In recent years, the consumption of food products with animal origin has sharply increased, that along with

reduction in the consumption of plant foods rich in fiber, vitamins and trace elements has caused a series of health problems (Paniangvait et al., 1995; Lentini et al., 2007). Many researchers conducted over the past decade has identified that fresh leafy vegetables, are very important in the diet because of the vitamins (A, B, C, E, P), minerals (K, Ca, Mg, Fe, Zn) and biologically natural compounds (phenolic compounds, flavonoids, alkaloids) (Kimura et al., 2003; Kmiecik et al., 2001; Su et al., 2002).

Chicory is a medicinally important plant which belongs to the *Asteraceae* family. *C. intybus* L., commonly known as chicory, is a perennial herbal plant most often bearing bright blue flowers that has been grown since ancient times. Traditionally, *C. intybus* L. is used as food and medicinal crop in temperate parts of Europe and Asia and finds its application in food and pharmaceutical industries (Scholz et al., 2006; Blumenthal, 1998). Chicory is found to be effective in the treatment of jaundice, asthma, gout, rheumatic complaints (Poletti et al., 1989) as well as against cardiac ailments (Vilkhu et al., 2008). Besides the medicinal application of this plant, there are several other uses of *C. intybus* L., including the industrial extraction of inulin, as a coffee substitute, or as animal food. Moreover, the leaves of the plant can be consumed raw or cooked (Cadalen et al., 2010; Street et al., 2013). Its leaves and roots are consumed as fresh or cooked vegetables and coffee substitute, respectively. All parts of the plant including roots, stems, leaves, and flowers get dry and are used as powder form in a variety of herbal medicines.

Chicory has rich nutritional composition and is potentially a rich source of bioactive secondary metabolites for human food fortification: inulin, sesquiterpene lactones (lactucin, lactucopicrin, 8-deoxy lactucin, guaianolid glycosides, including chicoroisides B and C, sonchuside C), caffeic acid derivatives (chiroric acid, chlorogenic acid, isochlorogenic acid, dicaffeoyl tartaric acid), fats, proteins, hydroxycoumarins, flavonoids, alkaloids, steroids, unsaturated sterols, terpenoids, oils, volatile compounds, vitamins ( $\alpha$ -tocopherol,  $\gamma$ -tocopherol),  $\beta$ -carotene, zeaxanthin, polyphenols and minerals (Abbas et al., 2015; Ferrazzano et al., 2011; Sampaio et al., 2009; Yoo et al., 2011). Among these chemical constituents, Inulin is the main component of its root that has many food and medicinal uses. Biological activity of inulin - improves bowel function, stimulates the growth of beneficial bacteria such as bifidobacteria, and improves microflora. Inulin also helps regulate blood sugar levels, helps reduce cholesterol levels, and improves metabolism (Visuthranuku et al., 2024; Qin et al., 2023).

In addition to its important nutritive profile, previous studies illustrated chicory has many types of pharmacological activities: hepatoprotective, anti-inflammatory, antioxidant, anthelmintic, anti-malarial, sedative, immunological, antiallergic, cardiovascular, hypolipidemic, antidiabetic, tumor-inhibitory, gastro-protective, antimicrobial, antibacterial and many others (Miller et al., 2011; Schumacher et al., 2011; Ghamarian et al., 2012; Krylova et al., 2015; Shaikh et al., 2012, Keshavarzi et al., 2024; Saeed et al., 2017, Aisa et al., 2020; Nwafor et al., 2017; Saadati et al., 2024).

Chicory is especially attractive as a cash crop since it can reach more than  $62 \text{ t ha}^{-1}$  under favorable conditions. Inulin content can reach on average 15% of root fresh weight and a yield of  $8 \text{ t ha}^{-1}$  of inulin is achievable (Papetti et al., 2013). The USA imports more than 2.3 million kilograms of chicons and 1.9 million kilograms of roasted chicory roots for coffee according to 2002 US Department of Commerce tariff and trade data (Schmidt et al., 2007). Numerous studies have focused on different cultivation aspects of chicory. Chicory is considered one of the most important sources of inulin since it has a high root yield potential and also a high root sugar content (Rani et al., 2004).

Optimizing extraction processes is crucial across industries and requires a combination of experimental techniques and tools. Ultrasonic-assisted extraction optimized by response surface methodology (RSM) has been used to obtain chicory extracts containing aesculetin, caftaric acid, caffeoylmalic acid, scopoletin, and chicoric acid, which demonstrated protective effects in liver cells, highlighting their potential as functional food ingredients (Baiseitova et al., 2025).

Relevance of the research topic. Despite its recognized potential, chicory's pharmacological and chemical properties have not been extensively explored in Kazakhstan. While the plant is widely used in Europe and other regions, its applications and therapeutic potential remain underutilized in

Kazakhstan. There is a lack of comprehensive research regarding the chemical composition of Kazakhstan's native chicory varieties, and there is little understanding of how these varieties might differ from those used in other countries in terms of medicinal properties.

With increasing healthcare challenges in Kazakhstan, including the prevalence of lifestyle-related diseases, finding alternative and natural therapeutic agents from locally available plants is crucial. Chicory's documented health benefits could offer new treatment options.

The theoretical significance of studying chicory lies in its potential for a deeper understanding of plant-derived bioactive compounds and their chemical interactions in the human body. Studying the chemical composition of chicory may contribute to the development of a more precise pharmacological profile of this plant, as well as the discovery of new bioactive molecules with potential medical applications.

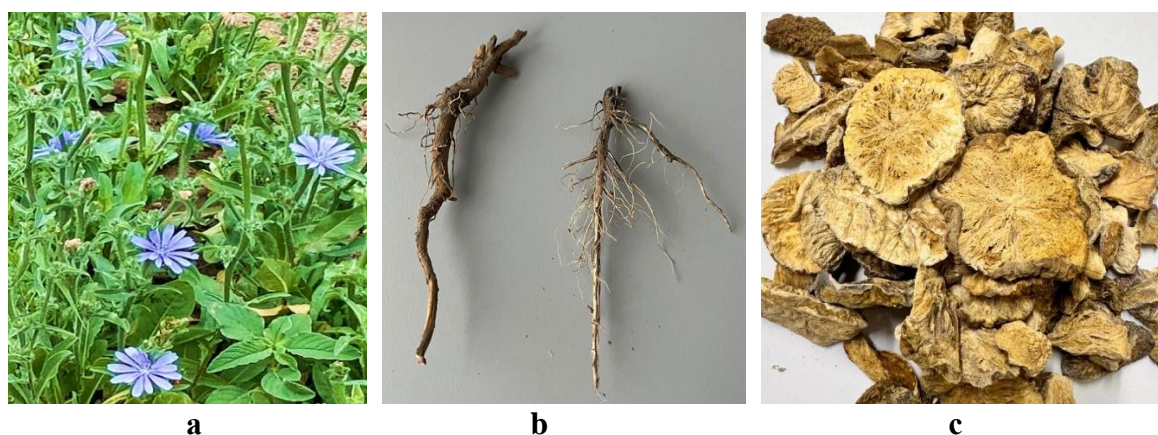
The practical significance of chicory research lies in its potential for use in the pharmaceutical industry, where chicory can be used to develop natural therapeutic products.

The aim of this study is to comparatively evaluate the phytochemical composition of *Cichorium intybus* L. roots cultivated in Kazakhstan and imported from China, in order to assess variations in bioactive compounds and highlight their potential as valuable sources for nutraceutical and pharmaceutical applications.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Plant material

Cultivated *Cichorium intybus* L. roots were identified by qualified scientists from the Research Institute for Natural Products & Technology LLP, Almaty, Kazakhstan and their botanical authenticity was confirmed in accordance with standard pharmacognostic procedures. Chicory roots were purchased from Jiangsu Yabang Chinese Medicine Co., Ltd., Jiangsu, China, as standardized, ready-to-use raw material, verified by the company's specialists. The underground parts were individually chopped into small pieces, air-dried, and kept at room temperature (Figure 1).



**Figure 1.** The aerial part of cultivated *C. intybus* L.(a) root of the cultivated (b) and root of chicory was imported from China (c)

### 2.2. The quantitative and qualitative analysis

The quantitative and qualitative analysis of the main bioactive compounds in the underground parts of *Cichorium intybus* L. was carried out according to the methods described in the monograph (Scholz et al., 2006) and in Chemistry of Natural Compounds for Scientific and Laboratory Works (Jenis Janar, 2021). The extractive content of the roots of *C. intybus* L. was determined using a 90% ethanol solution, following the procedures outlined in the State Pharmacopoeia (State Pharmacopoeia, 2014). All data are expressed as the mean  $\pm$  standard deviation of three replicates.

### 2.3. Mineral composition analysis

The mineral composition of the plant samples was determined using a Shimadzu AA-6200 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) (Shimadzu Corporation, Japan). The instrument operates at a voltage of 220–230 V, a frequency of 50/60 Hz, and a power of 300 VA, allowing precise quantitative analysis of essential metals and trace elements in plant tissues. 3 g of raw material was placed in a pre-calcined and accurately weighed porcelain crucible. Then the crucible was gently heated, first letting the substance burn at the lowest possible temperature, and the flame was gradually increased. Calcination was performed at 500°C to obtain a constant mass. At the end of the calcination, the crucible was cooled in a desiccator and then the resulting ash was burned again at 600°C until a uniform gray color was obtained. The ash of plant was dissolved in 10.0 mL of 40% nitric acid by heating. After that, the resulting solution was heated to obtain wet salts. Subsequently, it was dissolved in 15.0 mL of 1 N nitric acid and transferred to a 25.0 mL volumetric flask for analysis.

#### 2.4. Extraction and partition of the crude extract by polarity

Extraction was conducted with maceration method due to the high mass of the plant materials. This method involves repeatedly extracting the crushed plant material with small portions of solvent at room temperature. Aerial and underground parts of *C. intybus* L. were extracted with 90% ethanol in a 1:8 (wt%) ratio at room temperature for 7 days, with three extractions. The extract was then concentrated under vacuum at 45–50°C using a rotary evaporator. The crude extract was first fractionated with petroleum ether (PE). The remaining extract was subsequently fractionated with dichloromethane (DCM). The DCM-insoluble portion was further fractionated with ethyl acetate (EA), and the EA-insoluble fraction was then extracted with butanol (BuOH). The final aqueous residue was also collected.

Both cultivated and purchased *Cichorium intybus* L. were subjected to extraction and sequential fractionation. A total of 8.0 kg of cultivated plants and 5.0 kg of purchased plants were each extracted three times with 90% ethanol, yielding 1,400 g and 875 g of crude ethanol extract, respectively.

The crude extracts were sequentially fractionated using solvents of increasing polarity. Initially, the extracts were partitioned with petroleum ether (PE). The remaining extracts were subsequently fractionated with dichloromethane (DCM), producing 5.8 g and 3.6 g DCM fractions from cultivated and purchased plants, respectively.

#### 2.5. Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) determination

The crude ethanol extract was mixed with water and dissolved at room temperature. The solution was then transferred to a separation funnel, where petroleum ether was added in a 1:1 ratio three times. After shaking the mixture mechanically and allowing it to settle for a period, the petroleum ether layer was separated from the aqueous phase and dried using an EYELA N-1300 rotary evaporator at 35°C to yield the desired concentrate. The same procedure was repeated with dichloromethane.

Our gas chromatograph 7890A (Agilent, USA) is equipped with two split/splitless inlets, mass spectrometric Agilent 5975C TAD and electron-capture detectors. Such configuration allows flexible solution of many different analytical and research tasks. The sample volume was 0.5 µL, injection temperature was 280°C, with no split. Separation was performed using a DB-WaxEtr capillary chromatographic column, 30 m in length, 0.25 mm internal diameter, and 0.25 µm film thickness, with a constant carrier gas (helium) flow rate of 1 mL/min. The chromatography temperature was programmed from 40°C at a heating rate of 5°C/min to 260°C (hold 5 min). Detection was carried out in SCAN mode with m/z 34–750. Agilent MSD ChemStation software (version 1701EA) was used to control the gas chromatography system, record, and process the obtained results and data. Data processing included determination of retention times, peak areas, and analysis of the spectral information obtained from the mass spectrometric detector. The Wiley 7th edition and NIST'02 libraries (containing over 550,000 spectra) were used to interpret the obtained mass spectra.

### 2.6. Statistical analysis

All experiments were performed in triplicate, and the obtained data are presented as the mean  $\pm$  standard deviation (SD). Statistical analysis was conducted to assess data variability and experimental reproducibility. Descriptive statistics were used to summarize the results. When applicable, differences between groups were evaluated using appropriate statistical methods, and a value of  $p < 0.05$  was considered statistically significant.

### 3. Results

A quantitative and qualitative analysis of bioactive constituents, moisture content, total ash, and extractives was performed on *Cichorium intybus* L. The results are presented in Table 1.

The comparative analysis of root samples from cultivated *C. intybus* L. (CI-C) and those purchased from China (CI-I) reveals significant differences in their chemical composition. These variations could have implications for their nutritional, medicinal, and industrial applications.

**Table 1.** Quantitative and qualitative analysis of the main biologically active components of the root parts of *C. intybus* L. (%)

Plant	Moisture	Ash	Extractive substances (EtOH)	Carboxylic acids	Flavonoids	Polysaccharides	Tannins	Vitamin C	Coumarins	Saponins
The root of the CI-C	4.5 $\pm$ 0.1	2.69 $\pm$ 0.11	82.25 $\pm$ 3.5	0.035 $\pm$ 0.004	0.019 $\pm$ 0.002	0.838 $\pm$ 0.04	2.18 $\pm$ 0.1	0.0062 $\pm$ 0.0007	2.407 $\pm$ 0.13	1.326 $\pm$ 0.07
The root of the CI-I	7.0 $\pm$ 0.3	7.52 $\pm$ 0.3	85.78 $\pm$ 3.3	0.037 $\pm$ 0.004	0.001 $\pm$ 0.0001	0.444 $\pm$ 0.025	1.75 $\pm$ 0.08	0.0089 $\pm$ 0.001	0.095 $\pm$ 0.01	0.573 $\pm$ 0.06

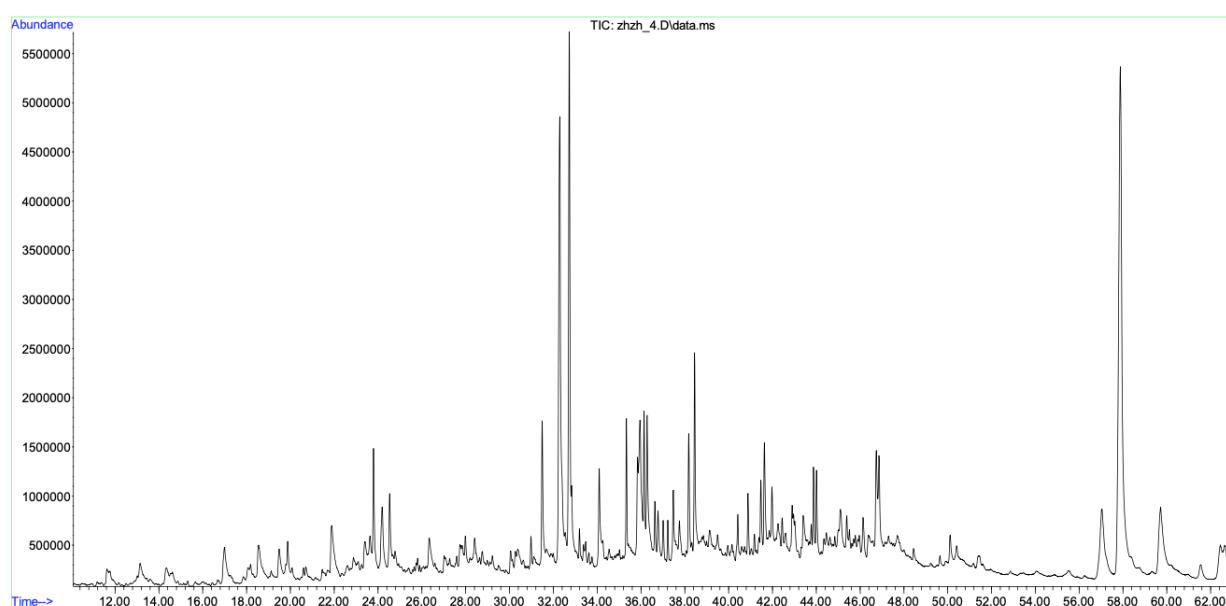
The analysis of trace elements in the roots of both cultivated and purchased *C. intybus* L. revealed notable differences in their concentration levels, indicating distinct environmental influences and physiological processes that affect the mineral uptake in these two forms of the plant. The results are presented in Table 2.

**Table 2.** Composition of macro-micro elements in the plant of the underground parts of *C. intybus* L. (mg/g)

Elements	The root of the CI-C	The root of the CI-I
Zn	0.5967 $\pm$ 0.12	0.0152 $\pm$ 0.0020
Ni	-	0.0035 $\pm$ 0.0005
Mn	0.8902 $\pm$ 0.17	0.0188 $\pm$ 0.0025
Fe	5.1241 $\pm$ 0.75	0.1527 $\pm$ 0.0180
Pb	-	0.0020 $\pm$ 0.0003
Cd	0.0017 $\pm$ 0.05	0.0005 $\pm$ 0.00007
Cu	0.2606 $\pm$ 0.07	0.0051 $\pm$ 0.0006
Ca	22.7368 $\pm$ 1.50	4.5276 $\pm$ 0.15
Mg	36.9904 $\pm$ 2.70	1.2576 $\pm$ 0.07
K	493.4968 $\pm$ 8.20	462.0688 $\pm$ 9.40
Na	91.9865 $\pm$ 3.60	73.3265 $\pm$ 3.80

The constituents of dichloromethane extracts from the underground part of *Cichorium intybus* L. were analyzed by GC-MS, which allows for detailed analysis of their chemical composition. This technique provides accurate identification and quantification of complex organic compounds, including active pharmacological substances, toxins, and metabolites. GC-MS also facilitates the identification of new biologically active components, monitoring the quality of herbal preparations, and assessing their safety, which is essential for the development of effective and safe drugs.


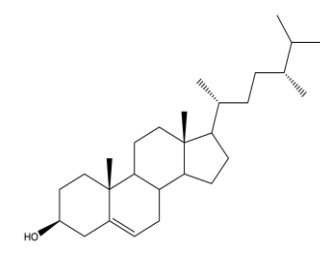
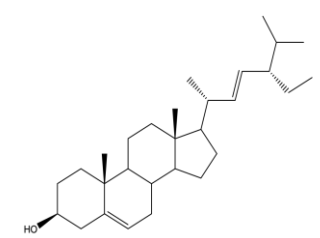
GC-MS chromatogram of dichloromethane extract from the underground part of chicory grown by ourselves (CI-C-DCM). Active substances with retention time, molecular formula, molecular weight and concentration (%) are presented in Table 3 and Figure 2. As a result, 51 compounds were identified and their concentrations were determined. The compounds detected are primarily fatty acids, sterols, and phenolic compounds, many of which are known for their biological activity. Among them, the main components are 9-Hexadecanoic acid, 4-((1E)-3-Hydroxy-1-propenyl)-2-methoxyphenol, oleic acid, benzenemethanol, 2,5-dimethoxy-, acetate, campesterol, stigmasterol.



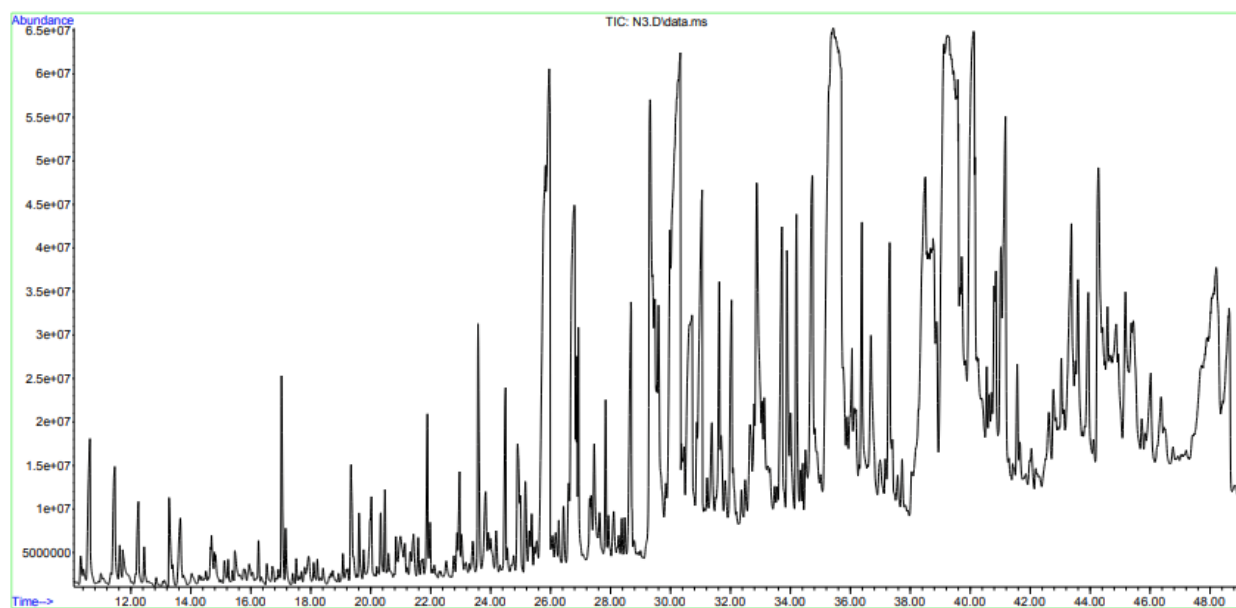
**Figure 2.** Chromatogram of CI-C-DCM underground part

**Table 3.** Major chemical constituents of CICDCM underground part

№	tr (min)	Compounds	Molecular Formula	MW	Structure	Identification probability, %	Relative content, %
1	32.30	Hexadecanoic acid	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	256	<chem>CCCCCCCCCCCCCCCC(=O)O</chem>	85	10.57±0.6
2	32.73	4-((1E)-3-Hydroxy-1-propenyl)-2-methoxyphenol	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	180	<chem>COc1ccc(cc1O)/C=C/O</chem>	90	8.56±0.4


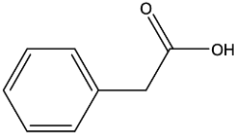
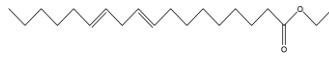

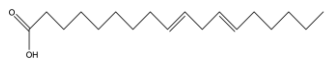
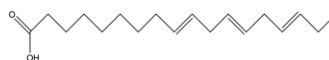
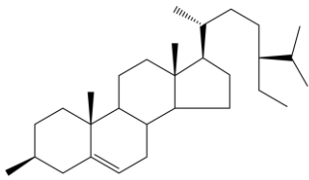
3	35.96	Oleic acid	$C_{18}H_{34}O_2$	282		84	$3.84 \pm 0.02$
4	57.05	Campesterol	$C_{28}H_{48}O$	400		67	$3.61 \pm 0.02$
5	57.88	Stigmasterol	$C_{29}H_{48}O$	412		94	$19.41 \pm 1$

GC-MS chromatogram of the dichloromethane extract from underground part of the purchased chicory (CI-I-DCM). The active substances with their retention time, molecular formula, molecular weight and concentration (%) are presented in Table 4 and Figure 3.



**Figure 3.** Chromatogram of CI-I-DCM underground part

**Table 4.** Major chemical constituents of CI-I-DCM underground part

№	t <sub>R</sub> (min)	Compounds	Molecular Formula	MW	Structure	Identification probability, %	Relative content, %
1	25.93	Hexadecanoic acid, ethyl ester	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	284		87	4.57±0.05
2	29.33	Benzeneacetic acid	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	136		82	3.91±0.02
3	30.27	9,12-Octadecadienoic acid, ethyl ester	C <sub>20</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	308		89	6.47±0.3
4	35.42	Hexadecanoic acid	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	256		90	10.34±0.4
5	39.25	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	280		88	12.01±0.5
6	40.09	9,12,15-Octadecatrienoic acid, (Z,Z,Z)-	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	278		89	5.48±0.2
7	48.20	γ-Sitosterol	C <sub>29</sub> H <sub>50</sub> O	414		83	5.63±0.2

A total of 65 compounds were identified, with their concentrations quantified, revealing a complex mixture of fatty acids, esters, and sterols, all of which contribute to the overall bioactivity of the extract. Among these, several key compounds, such as 9,12-octadecadienoic acid (Z,Z)-, hexadecanoic acid, 9,12-octadecadienoic acid ethyl ester,  $\gamma$ -sitosterol, and hexadecanoic acid ethyl ester, were found in significant concentrations, indicating their potential role in the therapeutic effects of the extract.

#### 4. Discussion

The moisture content of the CI-C was found to be 4.5±0.1%, whereas the CI-I had a higher moisture content of 7.0 ± 0.3%. This higher moisture content in the roots from China may indicate differences in the environmental or growth conditions, which may affect the plant's bioactive compound concentration. The higher moisture in wild-grown roots might also influence the storage and processing of these plants for use in various applications.

Root purchased exhibits a significantly higher ash content (7.52±0.3%) compared to the cultivated root (2.69±0.11%). Extractive substances (90% ethanol) were present at 82.25% in the

cultivated roots and 85.78% in the purchased roots. These extractives typically contain soluble bioactive compounds, suggesting that both root samples have a high potential for the extraction of biologically active substances.

Flavonoids are recognized for their antioxidant properties, and there are notable differences in their concentrations between the two varieties of *C. intybus*. The CI-C contains a much higher flavonoid level  $0.019 \pm 0.002\%$  compared to the second root  $0.001 \pm 0.0001\%$ . This difference could be attributed to the controlled growing conditions of the cultivated plants, which may enhance the production of these bioactive compounds, potentially through improved farming practices. Flavonoids play a crucial role in human health due to their ability to scavenge free radicals, reduce oxidative stress, and modulate inflammatory pathways. They have been linked to protective effects against cardiovascular diseases, metabolic disorders, and certain types of cancer, while also supporting immune function and overall cellular health (Shahparan et al., 2024; Keshavarzi et al., 2024).

Polysaccharides, essential for immune support and metabolic health, are found in both root varieties, with the CI-C showing a higher concentration ( $0.838 \pm 0.04\%$ ) compared to the wild variety ( $0.444 \pm 0.025\%$ ). Higher polysaccharide levels in cultivated roots suggest potential advantages for therapeutic applications where immunomodulatory or anti-inflammatory properties are desired.

Tannin content was found to be  $2.18 \pm 0.1\%$  in CI-C and  $1.75 \pm 0.08\%$  in the CI-I, demonstrating a slight difference between the two samples. Tannins are known for their astringent properties and potential health benefits, such as antimicrobial activity.

The content of vitamin C, carboxylic acids, coumarins and saponins in both types of roots is insignificant, with a preference towards cultivated plants for coumarins and saponins.

The elemental composition of *C. intybus* L. roots showed significant differences between cultivated and purchased roots. The zinc content in the cultivated roots was significantly higher ( $0.5967$  mg/g) compared to the roots purchased ( $0.01524 \pm 0.0020$  mg/g). Zinc is an essential micronutrient involved in many physiological processes, including enzyme function and protein synthesis. The lower concentration in the Chinese roots may indicate differences in the soil's availability of zinc or the specific agricultural practices employed.

A notable difference was observed in the iron content, with the CI-C containing  $5.1241 \pm 0.75$  mg/g, while the CI-I contained only  $0.15273 \pm 0.0025$  mg/g. Iron is vital for chlorophyll synthesis and overall plant health. This discrepancy could be influenced by soil iron availability or the specific cultivation practices in the respective regions.

The CI-C had a much higher calcium content ( $22.7368 \pm 1.5$  mg/g) compared to the CI-I ( $4.52765 \pm 0.15$  mg/g). Calcium plays a crucial role in cell wall structure and plant rigidity. The higher calcium content in the cultivated roots could indicate a more calcium-rich soil or different agronomic practices that favor calcium uptake. Calcium is not only essential for plant growth but is also a vital nutrient for human health. More than 99 % of calcium in the human body is stored in bones and teeth, where it contributes to bone strength and mineralization. Adequate dietary calcium intake is crucial for achieving peak bone mass in early adulthood, maintaining bone density throughout life, and reducing the risk of osteoporosis and fractures in older age (Zhu et al., 2012).

The CI-C had higher concentrations of, manganese ( $0.8902 \pm 0.17$  mg/g), magnesium ( $36.9904 \pm 2.7$  mg/g), copper ( $0.2606 \pm 0.07$  mg/g), potassium ( $493.4968 \pm 8.2$  mg/g), and sodium ( $91.9865$  mg/g), suggesting soil differences and varying agricultural practices. In contrast, the CI-I contained lower levels of these elements, with notably lower zinc ( $0.01524 \pm 0.0020$  mg/g), manganese ( $0.01882 \pm 0.0025$  mg/g), and iron ( $0.15273 \pm 0.0180$  mg/g). The presence of nickel ( $0.00352 \pm 0.0005$  mg/g), lead ( $0.00203 \pm 0.0003$  mg/g), and cadmium ( $0.00048 \pm 0.00007$  mg/g) in the Chinese roots, along with their absence or lower concentrations in the cultivated roots, may indicate environmental contamination or differences in soil quality. Minerals interact together to maintain physiological cellular and tissue activities, and their dysregulation can impair organ function. Manganese is essential for enzymatic reactions and antioxidant defense, supporting plant growth, metabolism, and human bone and connective tissue health. Copper is essential for key enzymatic activities, including

energy production, iron metabolism, and the formation of connective tissue through cuproenzymes such as cytochrome c oxidase and lysyl oxidase (Obeng et al., 2024). Magnesium acts as a cofactor in over 300 enzymatic processes, supporting energy metabolism, muscle function, and nerve signaling (Al Alawi et al., 2018). Potassium, as the primary intracellular cation, maintains membrane potential and supports nerve impulse transmission, muscle contraction, and cardiovascular function (Zacchia et al., 2016).

The GC-MS data provides compelling evidence for the presence of several bioactive compounds in *Cichorium intybus*'s dichloromethane extract, including fatty acids, phenolic derivatives, and sterols, which contribute to its antioxidant, anti-inflammatory, and cholesterol-lowering properties. The high concentration of stigmasterol suggests that this plant could serve as a valuable source of bioactive sterols with potential therapeutic benefits.

The major components identified such as 9,12-octadecadienoic acid (Z,Z)-, hexadecanoic acid, and  $\gamma$ -sitosterol are known for their anti-inflammatory, antioxidant, and cholesterol-lowering effects, which are crucial for managing various chronic diseases. The synergistic effects of these compounds suggest that *C. intybus* could be a promising candidate for therapeutic applications, particularly in the prevention and management of cardiovascular diseases, metabolic disorders, and inflammatory conditions.

Identified compounds have been found to possess a wide range of biological activities. Their various activities are also mentioned in Table 5.

**Table 5.** Reported activities of the identified bioactive compounds from dichloromethane part *C. intybus* L.

№	Compound	Activity	References
1	Hexadecanoic acid	Anticancer activity and antioxidant activity	Kumar et al., 2025
2	4-((1E)-3-Hydroxy-1-propenyl)-2-methoxyphenol	Antioxidant, anti microbial and anti inflammatory	Hasanain et al., 2016
3	Oleic Acid	Pro- and anti-tumorigenic activities, antifungal and antitumoral activities	Alabi et al., 2018; Boer et al., 2023
4	Campesterol	Antibacterial, antimalarial, antifertility, anti-inflammatory, blood coagulation, wound healing, and anticancer properties	Uttu et al., 2022
5	Stigmasterol	Anticancer, anti-inflammatory, anti-arthritis, and anti-allergy	Goswami et al., 2023
6	Hexadecanoic acid, ethyl ester	Antioxidant, antifungal, aypocholesterolemic nematicide, aesticide, antiandrogenic flavour, hemolytic, 5-Alpha reductase inhibitor, antiseptic, antimicrobial, hair conditioning agent, solvent	Ajayi et al., 2011
7	Benzeneacetic acid	Antimicrobial, anti-inflammatory and analgesic, antioxidant, endocrine	Salaheldin et al., 2016
8	9,12-Octadecadienoic acid, ethyl ester	Hypocholesterolemic, Nematicide Antiarthritic, Hepatoprotective Anti androgenic, Hypocholesterolemic Nematicide, 5-Alpha reductase inhibitor, Antihistaminic, Anticoronary Insectifuge, Antieczemic and Antiacne	Jananie et al., 2011

9	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	Hypocholesterolemic, Nematicide, Antiarthritic, Hepatoprotective, Anti androgenic, Hypocholesterolemic, Nematicide, 5-Alpha reductase inhibitor Antihistaminic, Anticoronary, Insectifuge, Antieczemic , Antiacne	Nishanthini et al., 2014
10	9,12,15-Octadecatrienoic acid, (Z,Z,Z)-	Hypocholesterolemic, Nematicide, Antiarthritic, Hepatoprotective, Antiandrogenic, Hypocholesterolemic, Nematicide, 5-Alpha reductase inhibitor Antihistaminic, Anticoronary, Insectifuge, Antieczemic, Antiacne	Nishanthini et al., 2014
11	$\gamma$ -Sitosterol	Antidiabetic activity, anti-inflammatory, antioxidant	Balamurugan et al., 2011

The GC-MS analysis of *Cichorium intybus* dichloromethane extract reveals a diverse array of bioactive compounds with significant therapeutic potential. Key components such as hexadecanoic acid exhibit anticancer and antioxidant properties, contributing to the combat of oxidative stress and cancer cell proliferation. The methoxyphenol derivative 4-((1E)-3-Hydroxy-1-propenyl)-2-methoxyphenol shows strong antioxidant, antimicrobial, and anti-inflammatory effects, suggesting its role in supporting immune function and managing inflammation. Oleic acid, with both pro- and anti-tumorigenic properties, further supports the extract's potential in cancer therapy.

Sterols like campesterol and stigmasterol offer a broad range of activities, including anti-inflammatory, anticancer, and antibacterial effects, making them vital for managing chronic diseases. Additionally, hexadecanoic acid ethyl ester presents versatile biological effects, including antioxidant, antifungal, and antiandrogenic properties. The extract's high content of fatty acids and esters, such as 9,12-octadecadienoic acid (Z,Z)-, also indicates potential benefits for lipid metabolism, cholesterol reduction, and anti-inflammatory effects. Finally,  $\gamma$ -sitosterol enhances the extract's potential in managing metabolic disorders, with notable antidiabetic and antioxidant activities.

In future by isolating and identifying, these compounds can be considered to treat the human disorders.

## 5. Conclusion

This study represents the first scientific investigation of *Cichorium intybus* L. cultivated in Kazakhstan. While *C. intybus* has been studied elsewhere, its cultivation and chemical characterization in the local environmental and agricultural conditions of Kazakhstan have not been previously reported. The comparative analysis of cultivated and purchased roots highlights significant differences in chemical composition, bioactive compound content, and mineral profiles, reflecting the influence of controlled cultivation versus environmental variability. Comparative analysis of cultivated and imported *Cichorium intybus* L. roots revealed clear differences in chemical composition. Cultivated roots contained higher levels of bioactive compounds, such as flavonoids, polysaccharides, tannins, fatty acids, sterols, and phenolic compounds, while imported roots had higher moisture and ash content. GC-MS analysis confirmed the presence of key bioactive substances with antioxidant, anti-inflammatory, and cholesterol-lowering properties, with cultivated roots generally showing higher concentrations. These results highlight the impact of controlled cultivation on enhancing the production of beneficial compounds. The diverse bioactive profile of *C. intybus* underscores its potential as a valuable resource for therapeutic applications and functional foods, supporting its significance in both the pharmaceutical and food industries.

## 6. Supplementary Materials: no supplementary material.

## 7. Author Contributions

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

## 8. Author Information

Amzeyeva, Ulpan – senior researcher, Research institute for natural products & technology, Research center for medical plants, Al Farabi Kazakh National University, Al-Farabi ave., 71/17, Almaty, Kazakhstan, 050040; [ulpan-92.kz@mail.ru](mailto:ulpan-92.kz@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0001-7193-4404>

Tolepbergen, Aiya – master, Research institute for natural products & technology, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi ave., 71/17, Almaty, Kazakhstan, 050040; [nis.sovetbek@gmail.com](mailto:nis.sovetbek@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-6052-299X>

Huanbieke, Suhaer – master student, Research institute for natural products & technology, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi ave., 71/17, Almaty, Kazakhstan, 050040; [1549372750@qq.com](mailto:1549372750@qq.com), <https://orcid.org/0009-0007-5388-8946>

Karunakaran, Thiruventhan – Dr. centre for drug research, Universiti Sains Malaysia, 11800 USM, Penang, Malaysia; [thiruventhan@usm.my](mailto:thiruventhan@usm.my), <https://orcid.org/0000-0003-4470-2656>

Baiseitova, Aizhamal – PhD, Research institute for natural products & technology, Al Farabi Kazakh National University, Al-Farabi ave., 71/17, Almaty, Kazakhstan, 050040; [aizhabaiseitova@gmail.com](mailto:aizhabaiseitova@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1549-8978>

Jenis, Janar - PhD, Professor, Research center for medicinal plants, Al Farabi Kazakh National University, Al-Farabi ave., 71/17, Almaty, Kazakhstan, 050040; [janarjenis@kaznu.kz](mailto:janarjenis@kaznu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7148-7253>

**9. Funding:** this research is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP32727157).

**10. Acknowledgements:** the authors would like to express their sincere gratitude to the Research Institute for Natural Products & Technology, Almaty, Kazakhstan for the conduction of research and expert support, which became the basis for the creation of this article.

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

## 12. References

1. Abbas, Z. K., Saggu, S., Sakeran, M. I., Zidan, N., Rehman, H., & Ansari, A. (2015). Phytochemical, antioxidant and mineral composition of hydroalcoholic extract of chicory (*Cichorium intybus* L.) leaves. *Saudi. J. Biol. Sci.*, 22(3), 322–6. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.11.015>
2. Aisa, H. A., Xin, X., & Tang, D. (2020). Chemical Constituents and Their Pharmacological Activities of Plants From *Cichorium* Genus. *Chinese Herbal Medicines*, 12, 3, 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.chmed.2020.05.001>
3. Uttu, A. J., Sallau, M. S., Ibrahim, H., & Iyun, O. R. A. (2022). Isolation, characterization, and docking studies of campesterol and  $\beta$ -sitosterol from *Strychnos innocua* (Delile) root bark. *J Taibah Univ Med Sci.*, 18(3), 566–578. <https://doi.org/10.1016/j.jtumed.2022.12.003>
4. Ajayi, G. O., Olagunju, J. A., Ademuyiwa, O., & Martins, O. C. (2011). GC-MS analysis and phytochemical screening of ethanolic root of *Plumbago zeylanica* (Linn.). *J. Med. Plants Res.*, 5(9), 1756-1761

5. Alabi, K. A., Lajide, L., & Owolabi, B. J. (2018). Biological activities of oleic acid and its primary amide: experimental and computational studies. *J. Chem Soc. Nigeria*, 43, 2, 9-18.
6. Al Alawi, A. M., Majoni, S. W., & Falhammar, H. (2018). Magnesium and Human Health: Perspectives and Research Directions. *International Journal of Endocrinology*, 9041694. <https://doi.org/10.1155/2018/9041694>
7. Baiseitova, A., Amzeyeva, U., Tolepbergen, A., Ulfanova, Y., Shybyray, Ye., Dai, L., Shang, X., Bari Shah, A., Kim, J. Y. & Jenis, J. (2025). Response surface methodology optimization on ultrasonic-assisted extraction of chicory (*Cichorium intybus* L) and their UPLC-ESI-QTOF-MS analysis, antioxidant and hepatoprotective activity. *Journal eFood* , 6(4). <https://doi.org/10.1002/efd2.70081>
8. Balamurugan, R., Durairandiyar, V., & Ignacimuthu, S. (2011). Antidiabetic activity of  $\gamma$ -sitosterol isolated from *Lippia nodiflora* L. in streptozotocin induced diabetic rats. *European Journal of Pharmacology*, 667, 1–3, 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2011.05.025>
9. Blumenthal, M. (1998). The complete German Commission E monographs. American Botanical Council, Austin. TX, 109.
10. Deng, B., Kong, W., Suo, H., Shen, X., Newton, M. A., Burkett, W. C., Zhao, Z., John, C., Sun, W., Zhang, X., Fan, Y., Hao, T., Zhou, Ch., & Bae-Jump, V. L. (2023). Oleic Acid Exhibits Anti-Proliferative and Anti-Invasive Activities via the PTEN/AKT/mTOR Pathway in Endometrial Cancer. *Cancers*, 15(22), 5407. <https://doi.org/10.3390/cancers15225407>
11. Butler, M. S. (2004). The role of natural product chemistry in drug discovery. *J. Nat. Prod.*, 67, 2141–2153. <https://doi.org/10.1021/np040106y>
12. Cadalen, T., Morchen, M., Blassiau, C., Clabaut, A., Scheer, I., Hilbert, J., Hendriks, T., & Quillet, M. C. (2010). Development of SSR markers and construction of a consensus genetic map for chicory (*Cichorium intybus* L.). *Mol. Breed.*, 25, 699–722. <https://doi.org/10.1007/s11032-009-9369-5>
13. Ferrazzano, G. F., Amato, I., Ingenito, A., Zarrelli, A., Pinto, G., & Pollio, A. (2011). Plant polyphenols and their anti-cariogenic properties: A review. *Molecules*, 16, 1486–1507. <https://doi.org/10.3390/molecules16021486>
14. Ghamarian, A., Abdollahi, M., Su, X., Amiri, A., Ahadi, A., & Nowrouzi, A. (2012). Effect of chicory seed extract on glucose tolerance test (GTT) and metabolic profile in early and late stage diabetic rats. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*, 20, 56–65. <https://doi.org/10.1186/2008-2231-20-56>
15. Ghosh, S. K., Pandey, K., Ghosh, M., & Sur, P. K. (2025). Mycochemistry, antioxidant, anticancer activity, and molecular docking of compounds of F12 of ethyl acetate extract of *Astraeus asiaticus* with Bcl2 and Caspase 3. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87775-1>
16. Shareef, H. Kh., Muhammed, H. J., Hussein, H. M., & Hameed, I. H. (2016). Antibacterial effect of ginger (*Zingiber officinale*) roscoe and bioactive chemical analysis using gas chromatography mass spectrum. *Oriental Journal of Chemistry*, 32, 2, 817–837. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/320207>
17. Jananie, R., Prys, V., & Vijayalakshmi, K. (2011). Determination of bioactive components of *Cynodon dactylon* by GC-MS analysis. *New York Sci J.*, 4, 16–20.
18. Jenis, Janar (2021). Chemistry of Natural Compounds for Scientific and Laboratory Works. Almaty, Kazakh University.
19. Jones, W. P., Chin, Y. W., & Kinghorn, A. D. (2006). The role of pharmacognosy in modern medicine and pharmacy. *Curr. Drug. Targets*, 7, 247–264. <https://doi.org/10.2174/138945006776054915>
20. Keshavarzi, A., Akrami, R., & Zarshenas, M. (2024). Evaluation of the effect of *Cichorium intybus* L. on the liver enzymes in burn patients: a randomized double-blind clinical trial. *International Journal of Clinical Practice*, 2024, 1016247. <https://doi.org/10.1155/2024/1016247>

21. Kimura, M., & Rodriguez-Amaya, D. B. (2003). Carotenoid composition of hydroponic leafy vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 2603–2607. <https://doi.org/10.1021/jf020539b>
22. Kmiecik, W., Lisiewska, Z., & Jaworska, G. (2001). Effect of storage conditions on the technological value of dill (*Anethum graveolens* L.). *Folia Horticulturae*, 13, 33–43.
23. Knight, T. L., Moss, R. A., Fraser, T. J., Rowarth, J. S., & Burton, R. N. (1996). Effect of pasture species on internal parasites of lambs. *Proc. N. Z. Grassl. Assoc.*, 58, 59–62. <https://doi.org/10.33584/jnzg.1996.58.2217>
24. Koehn, F. E., & Carter, G. T. (2005). The evolving role of natural products in drug discovery. *Nat. Rev. Drug Discov.*, 4, 206–220. <https://doi.org/10.1038/nrd1657>
25. Krylova, S. G., Vymyatnina, Z. K., Zueva, E. P., Amosova, E. N., Razina, T. G., & Litvinenko, I. (2015). Effects of *Cichorium Intybus* L. root extract on secretory activity of the stomach in health and ulcer disease. 159(5), 638–41. <https://doi.org/10.1007/s10517-015-3035-1>
26. Lentini, F., & Venza, F. (2007). Valorizzazione delle piante selvatiche di uso alimentare in Sicilia. Corissia. Agrigento (Italy). <https://doi.org/10.1186/1746-4269-3-15>
27. Balunas, M. J., & Kinghorn, A. D. (2005). Drug discovery from medicinal plants. *Life Sciences*, 78(5), 431–41. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2005.09.012>
28. Goswami, M., Priya, Jaswal, Sh., Gupta, Gh. D., & Verma, S. K. (2023). A comprehensive update on phytochemistry, analytical aspects, medicinal attributes, specifications and stability of stigmasterol. *Steroids*. 196, 109244. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2023.109244>
29. Miller, M. C., Duckett, S. K., & Andrae, J. G. (2011). The effect of forage species on performance and gastrointestinal nematode infection in lambs. *Small Ruminant Research*, 95, 2–3, 188–192. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2010.09.006>
30. Abdelkader, M. S. A., Rateb, M. E., Mohamed, G. A., & Jaspars, M. (2016). Harpulliasides A and B: Two new benzenoacetic acid derivatives from *Harpullia pendula*. *Phytochemistry Letters*, 15, 131–135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phytol.2015.12.006>
31. Nishanthini, A., Mohan, V. R., & Jeeva, S. (2014). Phytochemical, FT-IR, and GC-MS analysis of stem and leaf of *Tiliacora acuminata*. *IJPSR*, 5(9), 3977–3986. [http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.5\(9\).3977-86](http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.5(9).3977-86)
32. Nwafor, I. C., Shale, K., & Achilonu, M. C. (2017). Chemical Composition and Nutritive Benefits of Chicory (*Cichorium intybus*) as an Ideal Complementary and/or Alternative Livestock Feed Supplement. *Scientific World Journal*, 2017, 7343928. <https://doi.org/10.1155/2017/7343928>
33. Obeng, S. K., Kulhanek, M., Balik, J., Cerny, J., & Sedlar, O. (2024). Manganese: from soil to human health—a comprehensive overview of its biological and environmental significance. *Nutrients*, 16(20), 3455. <https://doi.org/10.3390/nu16203455>
34. Paniangvait, P., King, A. J., Jones, A. D., & German, B. G. (1995). Cholesterol oxides in foods of animal origin. *J. Food. Sci.* 60, 1159–74. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb04548.x>
35. Papetti A., Mascherpaa D., Carazzonea C. (2013). Identification of organic acids in *Cichorium intybus* inhibiting virulence-related properties of oral pathogenic bacteria. *Food Chemistry*, 138, 2–3, 1706–1712. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.10.148>
36. Qin, Y., Wang, L., Yang, X., Xu, Y., Fan, G., Fan, Y., Ren, J., An, Q., & Li, X. (2023). Inulin: properties and health benefits. *Food Funct.*, 14, 2948–2968. <https://doi.org/10.1039/D2FO01096H>
37. Rani, P., & Khullar, N. (2004). Antimicrobial evaluation of some medicinal plants for their anti-enteric potential against multi-drug resistant *Salmonella typhi*. *Phytotherapy Research*, 18, 670–673. <https://doi.org/10.1002/ptr.1522>
38. Saadati, F., Chahardehi A. M., Jamshidi, N., & Ghasemi, D. (2024). Coumarin: a natural solution for alleviating inflammatory disorders. *Current Research in Pharmacology and Drug Discovery*, 7, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.crphar.2024.100202>

39. Saeed, M., Babazadeh, D., Arif, M., & Asif, M. (2017). Silymarin: a potent hepatoprotective agent in poultry industry. *World's Poultry Science Journal*, 73, 483–492. <https://doi.org/10.1017/S0043933917000538>
40. Sampaio, F. C., Pereira, M. do S., Dias, C. S., Costa, V. C., Conde, N. C., & Buzalaf, M. A. (2009). *In vitro* antimicrobial activity of *Caesalpinia ferrea* Martius fruits against oral pathogens. *Journal of Ethnopharmacology*, 124, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2009.04.034>
41. Schmidt, B., Пил, N., Poulev, A., & Raskin, I. (2007). Toxicological evaluation of a chicory root extract. *Food Chem. Toxicol.*, 45, 1131–1139. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2006.12.019>
42. Scholz, E. (2006). Monographien: *Cichorium*, *Cichorium intybus* L., *Cichorii folia* et radix, *Cichorii radix*. In Hagers handbuch der drogen und arzneistoffe. Springer Medizin Verlag, Heidelberg.
43. Schumacher, E., Vigh, E., Molnar, V., Kenyeres, P., Feher, G., Kesmarky, G., Toth, K., & Garai, J. (2011). Thrombosis preventive potential of chicory coffee consumption: a clinical study. *Phytother Res.*, 25(5), 744–8. <https://doi.org/10.1002/ptr.3481>
44. Shaikh, T., Rub, R. A., & Sasikumar, S. (2012). Antimicrobial screening of *Cichorium intybus* seed extracts. *Arabian Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.04.012>
45. Shahparan, I., Rashmia, N., & Nazmul, Q. (2024). Medicinal herbs and their metabolites with biological potential to protect and combat liver toxicity and its disorders: A review. *Heliyon*, 10(3), e25340. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25340>
46. State Pharmacopoeia of the Republic of Kazakhstan. Third edition. MZ RK. (2014). Astana. ISBN 978-601-294-214-9.
47. Street, R. A., Sidana, J., & Prinsoloo, G. (2013). *Cichorium intybus*: Traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and toxicology. *J. Evid. Based Complement. Altern. Med.*, 579319. <https://doi.org/10.1155/2013/579319>
48. Su, Q., Rowley, K. G., Itsiopoulos, C., & O’Dea, K. (2002). Identification and quantitation of major carotenoids in select components of the Mediterranean diet. *European Journal of Clinical Nutrition*, 56, 1149–1154. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601472>
49. Vilku, K., Mawson, R., Simons, L., & Bates, D. (2008). Applications and opportunities for ultrasound assisted extraction in the food industry: A review. *Innovative Food Science and Emerging Technology*, 9, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.04.014>
50. Visuthranukul, C., Sriswasdi, S., Терааморндеч, S., Chamni, S., Leelahavanichkul, A., Joyjinda, Y., Aksornkitti, V., & Chomtho, S. (2024). Enhancing gut microbiota and microbial function with inulin supplementation in children with obesity. *International Journal of Obesity*, 48, 1696–1704. <https://doi.org/10.1038/s41366-024-01590-8>
51. Yoo, S., Murata, R. M., & Duarte, S. (2011). Antimicrobial traits of tea- and cranberry derived polyphenols against *Streptococcus mutans*. *Caries Research*, 45, 327–335. <https://doi.org/10.1159/000329181>
52. Zacchia, M., Abategiovanni, M., Stratigis, S., & Capasso, G. (2016). Potassium: from physiology to clinical implications. *Kidney Diseases*, 2(2), 72–79. <https://doi.org/10.1159/000446268>
53. Zhu, K., & Prince, R. L. (2012). Calcium and bone. *Clinical Biochemistry*, 45(12), 936–942. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2012.05.006>

## ***Cichorium intybus* L. жер асты бөлігінің салыстырмалы фитохимиялық бейіні**

**Ұлпан Әмзеева, Аяя Төлепберген, Сұңқар Хуанбике, Тирувентан Карунакаран, Айжамал Байсеитова, Жанар Жеңіс**

**Аңдатпа.** Дәрілік өсімдіктердің тамырлары фитохимиялық қосылыстарға бай болып, фармацевтикалық және тамақ өнеркәсібі үшін биологиялық белсенді заттардың маңызды көзі болып табылады. *Cichorium intybus* L. (цикорий), Asteraceae тұқымдасына жататын көпжылдық өсімдік, өзінің тағамдық және дәрілік қасиеттерімен жақсы танымал. Бұл зерттеуде Қазақстанда өсірілген және Қытайдан импортталған *C.intybus* L. тамырларының фитохимиялық құрамын салыстырмалы түрде зерттеу жүргізілді. Сандық талдау көрсеткендей, өсірілген тамырларда  $4.5 \pm 0.1\%$  ылғал,  $2.69 \pm 0.11\%$  күл және  $82.25 \pm 3.5\%$  экстрактивтік заттар (90% этанол) анықталды, ал импортталған үлгілерде тиісінше  $7.0 \pm 0.3\%$ ,  $7.52 \pm 0.3\%$  және  $85.78 \pm 3.3\%$  болды. Өсірілген тамырларда полисахаридтер ( $0.838 \pm 0.04\%$ ), таниндер ( $2.18 \pm 0.1\%$ ), кумариндер ( $2.407 \pm 0.13\%$ ) және сапониндер ( $1.326 \pm 0.07\%$ ) деңгейі импортталған үлгілерге қарағанда жоғары болды ( $0.444 \pm 0.025\%$ ,  $1.75 \pm 0.08\%$ ,  $0.095 \pm 0.01\%$  және  $0.573 \pm 0.06\%$ , сәйкесінше). ГХ-МС химиялық талдау негізгі фитостеролдардың, соның ішінде стигмастерол мен кампестеролдың бар екенін көрсетті. Салыстырмалы нәтижелер құрамдағы айырмашылықтардың географиялық және егу жағдайларына байланысты екенін көрсетіп, *C.intybus* L. тамырларының нутрицевтикалық және фармацевтикалық қолдану үшін құнды фитохимиялық қосылыстар көзі болып табылатын әлеуетін айқындайды.

**Түйін сөздер:** *Cichorium intybus* L.; фитохимия; макроэлементтер; микроэлементтер; биологиялық белсенділік; ГХ-МС.

## Сравнительный фитохимический профиль подземных частей *Cichorium intybus* L.

Улпан Амзеева, Айя Төлепберген, Сункар Хуанбике, Тирувентан Карунакаран, Айжамал Байсеитова, Жанар Женис

**Аннотация.** Корни лекарственных растений богаты важными фитохимическими соединениями и служат значимым источником биологически активных веществ для фармацевтической и пищевой промышленности. *Cichorium intybus* L. (цикорий) – многолетнее растение семейства *Asteraceae*, хорошо известно своими питательными и лекарственными свойствами. В данном исследовании проведено сравнительное изучение фитохимического состава подземных частей (корней) *C. intybus* L., выращенного в Казахстане и импортированного из Китая. Количественный анализ показал, что корни казахстанского происхождения содержали  $4,5 \pm 0,1\%$  влаги,  $2,69 \pm 0,11\%$  золы и  $82,25 \pm 3,5\%$  экстрактивных веществ (90% этанол), тогда как импортные образцы содержали, соответственно  $7,0 \pm 0,3\%$ ,  $7,52 \pm 0,3\%$  и  $85,78 \pm 3,3\%$ . Корни, выращенные в Казахстане, также имели более высокое содержание полисахаридов ( $0,838 \pm 0,04\%$ ), танинов ( $2,18 \pm 0,1\%$ ), кумаринов ( $2,407 \pm 0,13\%$ ) и сапонинов ( $1,326 \pm 0,07\%$ ) по сравнению с импортными образцами ( $0,444 \pm 0,025\%$ ,  $1,75 \pm 0,08\%$ ,  $0,095 \pm 0,01\%$  и  $0,573 \pm 0,06\%$ , соответственно). Химический анализ методом ГХ-МС дополнительно выявил присутствие основных фитостеролов, включая стигмастерол и кампестерол. Сравнительные результаты указывают на вариации в составе, обусловленные географическими и агротехническими факторами, что подчеркивает потенциал корней *C. intybus* L. как ценного источника фитохимических соединений для нутрицевтического и фармацевтического применения.

**Ключевые слова:** *Cichorium intybus* L.; фитохимия; макроэлементы; микроэлементы; биологическая активность; ГХ-МС.

## Effect of deposition conditions on the electrochemical characteristics of SnO<sub>2</sub> thin films as anodes for lithium-ion batteries

Zhansaya Bakhytzhanova<sup>1,2,3</sup>, Mukagali Yegamkulov<sup>1,3</sup>, Ayazhan Bekmakhanova<sup>1,2,3</sup>, Gaukhar Tazhkenova<sup>2</sup>, Arailym Nurpeissova<sup>1,3</sup>, Zhumabay Bakenov<sup>1,3</sup>, Aliya Mukanova<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of New Materials and Energy Technologies PI, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan; [zhansayab.1977@gmail.com](mailto:zhansayab.1977@gmail.com), [mukagali.yegamkulov@nu.edu.kz](mailto:mukagali.yegamkulov@nu.edu.kz), [bekmahanovaaazan877@gmail.com](mailto:bekmahanovaaazan877@gmail.com), [arailym.nurpeissova@nu.edu.kz](mailto:arailym.nurpeissova@nu.edu.kz), [Zbakenov@nu.edu.kz](mailto:Zbakenov@nu.edu.kz), [aliya.mukanova@nu.edu.kz](mailto:aliya.mukanova@nu.edu.kz)

<sup>2</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; [zhansayab.1977@gmail.com](mailto:zhansayab.1977@gmail.com), [bekmahanovaaazan877@gmail.com](mailto:bekmahanovaaazan877@gmail.com), [gaukhar-1970@mail.ru](mailto:gaukhar-1970@mail.ru)

<sup>3</sup>Institute of Batteries LLC, Astana, Kazakhstan; [zhansayab.1977@gmail.com](mailto:zhansayab.1977@gmail.com), [mukagali.yegamkulov@nu.edu.kz](mailto:mukagali.yegamkulov@nu.edu.kz), [bekmahanovaaazan877@gmail.com](mailto:bekmahanovaaazan877@gmail.com), [arailym.nurpeissova@nu.edu.kz](mailto:arailym.nurpeissova@nu.edu.kz), [Zbakenov@nu.edu.kz](mailto:Zbakenov@nu.edu.kz), [aliya.mukanova@nu.edu.kz](mailto:aliya.mukanova@nu.edu.kz)

\*Correspondence: [aliya.mukanova@nu.edu.kz](mailto:aliya.mukanova@nu.edu.kz)

**Citation:** Bakhytzhanova, Zh., Yegamkulov, M., Bekmakhanova, A., Tazhkenova, G., Nurpeissova, A., Bakenov, Zh., Mukanova, A. (2026). Effect of deposition conditions on the electrochemical characteristics of SnO<sub>2</sub> thin films as anodes for lithium-ion batteries. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 153(4), 26-36. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-26-36>

Academic Editor:  
E.E. Kopsishev

Received: 02.03.2026  
Revised: 20.03.2026  
Accepted: 25.03.2026  
Published: 31.03.2026



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

**Abstract:** SnO<sub>2</sub> thin-film anodes were fabricated by RF magnetron sputtering of a metallic Sn target onto Ti–Pt coated stainless-steel substrates. The films were deposited at room temperature (RT) and 300°C in an Ar/O<sub>2</sub> atmosphere and subsequently annealed in air at 620°C. The structural evolution, morphology, and electrochemical performance of the films were systematically investigated. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed the formation of phase-pure tetragonal rutile SnO<sub>2</sub> without detectable secondary phases. SEM observations revealed significant changes in grain size and surface uniformity depending on deposition temperature and thermal treatment. Electrochemical testing in CR2032 coin cells demonstrated a typical multistep lithiation mechanism of SnO<sub>2</sub> involving conversion and alloying reactions. Although annealing improved crystallinity and reduced polarization, the films deposited at RT exhibited superior long-term cycling stability compared to those deposited at elevated temperature. The results highlight the crucial role of deposition temperature and sublayer configuration in controlling structural integrity and electrochemical durability of SnO<sub>2</sub> thin-film anodes for lithium-ion batteries.

**Keywords:** Lithium-ion batteries, SnO<sub>2</sub>, Ti/Pt interlayer, RF magnetron sputtering, annealing, electrochemical performance.

### 1. Introduction

Lithium-ion batteries (LIBs) have become the cornerstone of modern

electrochemical energy storage systems due to their high energy density, long cycle life, and relatively low self-discharge rate (Manthiram, 2020). Their widespread implementation in portable electronics, electric vehicles, and grid-scale energy storage has accelerated the demand for electrode materials capable of delivering higher capacity, improved rate capability, and long-term cycling stability (Nanda et al., 2015). Although graphite remains the dominant commercial anode material, its theoretical capacity of 372 mAh g<sup>-1</sup> limits further enhancement of overall battery energy density (Cameán et al., 2010).

To overcome this limitation, significant research efforts have been directed toward alternative anode materials with higher theoretical capacities, including silicon, transition metal oxides, and conversion-type compounds (Poizot et al., 2000; Cabana et al., 2010). Among these, tin-based materials have attracted particular attention due to their favorable electrochemical properties and relatively high theoretical capacity (Kamali et al., 2011). Tin oxide (SnO<sub>2</sub>) is a promising anode material for LIBs due to its high theoretical capacity (1494 mAh g<sup>-1</sup>), which is significantly higher than that of metallic tin, oxidation resistance, and environmental safety. The promising characteristics of SnO<sub>2</sub> in LIBs are explained not so much by its high theoretical capacity as by the peculiarities of the two-stage mechanism of lithium accumulation (Yegamkulov et al., 2025). At the first stage, a transformation reaction occurs:



and at the second stage, Sn alloying takes place



At relatively moderate potentials (1.2 V and 0.5 V, respectively, relative to Li/Li<sup>+</sup>). These potentials reduce the likelihood of lithium plating on the anode surface and help to suppress polarization. Thus, the high electrical conductivity of the lithiated phases, the short diffusion length of Li<sup>+</sup>, and the ability of SnO<sub>2</sub> to form stable nanostructures determine its effectiveness as an anode material in LIBs (Serikkazyeva et al., 2023). The combination of conversion and alloying reactions enables high capacity but is accompanied by severe volume expansion (up to 300%) during cycling (Asenbauer et al., 2020). Such large volume fluctuations generate internal stress, leading to particle pulverization, loss of electrical contact, unstable solid electrolyte interphase (SEI) formation, and rapid capacity fading (Yu et al., 2007).

Various strategies have been proposed to address these limitations. Nanostructuring of SnO<sub>2</sub> reduces diffusion lengths for lithium ions and improves strain accommodation during cycling (Kebede, 2020). Additionally, composite formation with conductive matrices such as carbon or metallic scaffolds enhances electronic conductivity and structural stability (Huang et al., 2016). Another promising approach involves the design of thin-film electrodes, which provide better mechanical integrity and strong adhesion to the current collector (Teng et al., 2020).

Thin-film anodes are particularly attractive for fundamental studies and microbattery applications (Omampuliyur, 2015). Compared to bulk powder electrodes, thin films eliminate the need for binders and conductive additives, allowing direct evaluation of intrinsic electrochemical properties. Furthermore, thin films exhibit shorter lithium diffusion pathways and improved interfacial contact, which can enhance rate performance and structural stability (Xia et al., 2023).

Among various thin-film fabrication techniques, RF magnetron sputtering offers precise control over thickness, composition, and microstructure (Nur-E-Alam et al., 2019). Deposition parameters such as substrate temperature, working pressure, and gas composition strongly influence crystallinity, grain size, defect concentration, and surface morphology. These microstructural factors directly affect lithium diffusion kinetics, charge-transfer resistance, and mechanical stability during cycling (Ren et al., 2025).

Deposition temperature is a particularly critical parameter. Films deposited at room temperature often exhibit amorphous or nanocrystalline structures, which can better accommodate volume changes

due to their structural flexibility (Kumar et al., 2013). In contrast, films deposited at elevated temperatures generally display higher crystallinity and larger grain size, which may enhance electronic transport but reduce tolerance to mechanical stress during repeated lithiation/delithiation cycles (Ghantasala et al., 2023). Post-deposition annealing is commonly applied to improve crystallinity and structural ordering; however, excessive grain growth may negatively affect electrochemical durability (Morankar et al., 2024).

In addition to the active material itself, the interface between the thin film and the current collector plays a crucial role in electrode stability. The use of adhesion-promoting and conductive interlayers, such as Ti and Pt, can improve mechanical bonding, reduce interfacial resistance, and suppress delamination during cycling (Shao et al., 2017). Engineering such sublayer configurations is therefore essential for optimizing thin-film electrode performance.

This work is devoted to the systematic study of the electrochemical characteristics of SnO<sub>2</sub> thin-film anodes obtained by radio frequency (RF) magnetron sputtering at room temperature (RT) and at 300 °C. The as-deposited films were subsequently subjected to post-annealing treatments in air, in order to investigate the influence of deposition conditions and heat-treatment environments on their structural evolution and electrochemical performance.

## **2. Methodology**

### *2.1. Material preparation*

SnO<sub>2</sub> anode thin films were deposited by RF magnetron sputtering (Angstrom Engineering Inc., Canada) of a high-purity Sn metallic target (2.00” diameter × 0.250” thick, 99.994-99.999% pure, Kurt J. Lesker Company) in an Ar/O<sub>2</sub> (high purity, 15:15 sccm) atmosphere. Stainless steel (SS) discs served as substrates, which were precoated with a thin Ti-Pt bilayer to improve adhesion and provide a stable interface. The depositions of anode thin films were carried out at a working pressure of 5 mTorr and a power of 60 W, both at RT and at 300 °C, with substrate rotation to ensure uniformity. The resulting film thickness was about 500 nm. Prior to deposition, the Sn target surface was cleaned by pre-sputtering in pure Ar and subsequently in an Ar/O<sub>2</sub> mixture for 20 minutes under the same plasma conditions, while the substrate was shielded. This step ensured the removal of surface oxides and contaminants from the target.

After sputtering, the films were annealed at 620 °C in air to promote crystallization and modify the surface morphology. Film thickness and mass were monitored using an INFICON Quartz Crystal Monitor (QCM) and an ultra-microbalance (Mettler Toledo XP2U Ultra Microbalance).

### *2.2 Material characterization*

To study the structure and morphology of the samples, their comprehensive physicochemical characterization was carried out using various analytical methods. Morphological analysis was carried out using scanning electron microscopy (SEM, JEOL JSM- IT800, Japan). The crystal structure was studied by X-ray diffraction (XRD) on a SmartLab (Rigaku) setup using Cu K $\alpha$  radiation ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1.54056 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_{\text{CuK}\alpha 2} = 1.54439 \text{ \AA}$ ) in the Bragg-Brentano reflection geometry. The XRD data were obtained over a  $2\theta$  range from 5 to 70 °C at a scan rate of 5 °C/min using 40 kV, 30 mA X-ray.

### *2.3 Electrochemical investigation*

CR2032 coin cells were assembled with the obtained thin film SnO<sub>2</sub> anodes and tested. A Celgard 2400 polypropylene membrane was used as a separator and lithium foil as an opposite and reference electrode. The assembly was carried out in an Ar-filled glove box (MBRAUN LABMaster Pro, Germany) in a high-purity argon atmosphere with <0.1 ppm O<sub>2</sub> and <0.1 ppm H<sub>2</sub>O to avoid moisture and oxygen contamination. A 1M LiPF<sub>6</sub> solution in an EC/DEC/EMC mixture (1:1:1 by volume) was used

as the electrolyte.

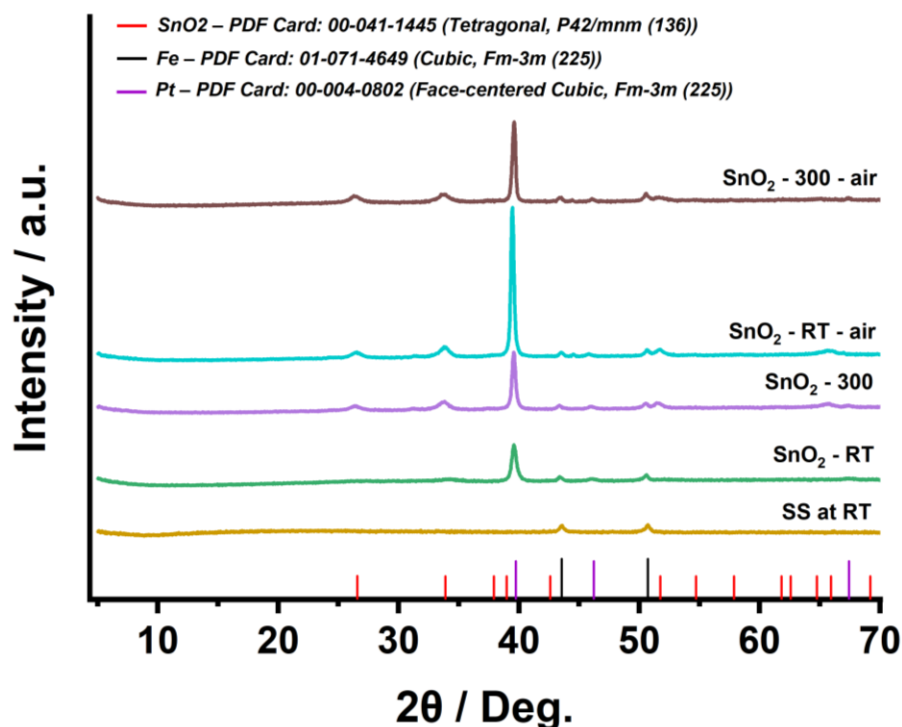
Electrochemical testing was performed using cyclic voltammetry (CV, VMP3, BioLogic, France) and galvanostatic charge-discharge cycling with a multichannel battery testing system (Neware Co., Shenzhen, China). The system's long-term cycling performance was evaluated at a 0.1 °C rate within a potential range of 0.01 to 3 V vs. Li/Li<sup>+</sup>.

### 3. Results

In this study, SnO<sub>2</sub> thin films were produced by RF magnetron sputtering of a metallic Sn target onto Ti and Pt-coated stainless steel (SS) substrates. The process was carried out in an Ar/O<sub>2</sub> gas mixture (15:15 sccm) at a constant pressure of 5 mTorr. Both amorphous and crystalline SnO<sub>2</sub> were examined, since amorphous films are usually considered more flexible and better able to handle the volume changes that occur during lithiation and delithiation. The deposition was carried out either at RT and at 300 °C to see how deposition temperature affects their structure, morphology, and electrochemical behavior. Post-deposition annealing was carried out in air at 620 °C to enhance structural ordering and improve surface morphology.

#### 3.1. XRD analysis

The X-ray diffraction (XRD) patterns of the SnO<sub>2</sub> thin films (Figure 1) confirm the significant influence of both deposition temperature and post-annealing atmosphere on the structural evolution of the films.



**Figure 1.** XRD patterns of SnO<sub>2</sub>

All coated samples exhibit diffraction peaks corresponding to tetragonal rutile SnO<sub>2</sub>, confirming the formation of a crystalline oxide phase. In addition to the oxide reflections, two peaks from the stainless-steel substrate (α-Fe, cubic) are observed at approximately 44.7° and 65.0°, corresponding to

the (110) and (200) planes, respectively. Two peaks attributed to Pt from the Ti-Pt sublayer are detected at about  $39.8^\circ$  and  $46.2^\circ$ , corresponding to the (111) and (200) planes of face-centered cubic Pt. These metallic reflections arise from the underlying layers and do not indicate the formation of secondary phases within the  $\text{SnO}_2$  coating (Courtney et al., 1997).

No distinct diffraction peaks corresponding to Ti are detected. This can be explained by the structural configuration of the sublayer: Ti was deposited first, and its thickness is approximately two times smaller than that of the Pt layer. As a result, the thinner Ti layer is effectively shielded by the thicker Pt overlayer and the  $\text{SnO}_2$  film, significantly reducing its diffraction intensity.

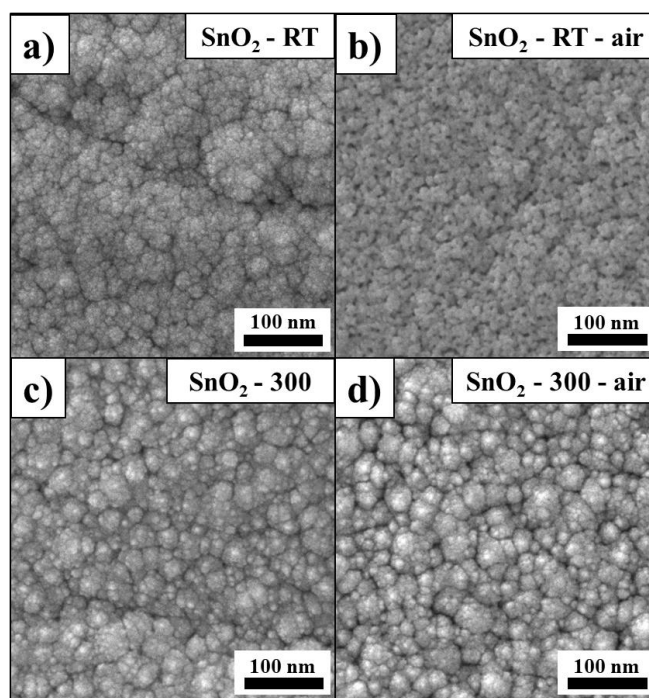
The dominant  $\text{SnO}_2$  reflections appear at  $26.6^\circ$  (110),  $33.9^\circ$  (101),  $51.8\text{--}54.8^\circ$  (211), and  $61.9\text{--}65.9^\circ$  (301)/(310), confirming the stability of the rutile structure after air annealing. The most intense peak near  $39\text{--}40^\circ$  is mainly associated with the  $\text{SnO}_2$  (200) plane, partially overlapping with the Pt (111) reflection (Habte et al., 2020).

No additional peaks corresponding to secondary phases such as SnO or metallic  $\beta\text{-Sn}$  are detected.

The XRD patterns confirm high phase purity of the films, with variations in peak intensity primarily related to differences in crystallinity and preferred orientation, as well as limited overlapping from the Pt interlayer and Fe substrate.

### 3.2 Scanning electron microscopy

SEM images (Figure 2) show the morphology of  $\text{SnO}_2$  films under different deposition and annealing conditions.



**Figure 2.** SEM surface images of  $\text{SnO}_2$  (a) as-deposited at RT, (b) post-annealed in air, (c) as-deposited at  $300^\circ\text{C}$  (d) post-annealed in air

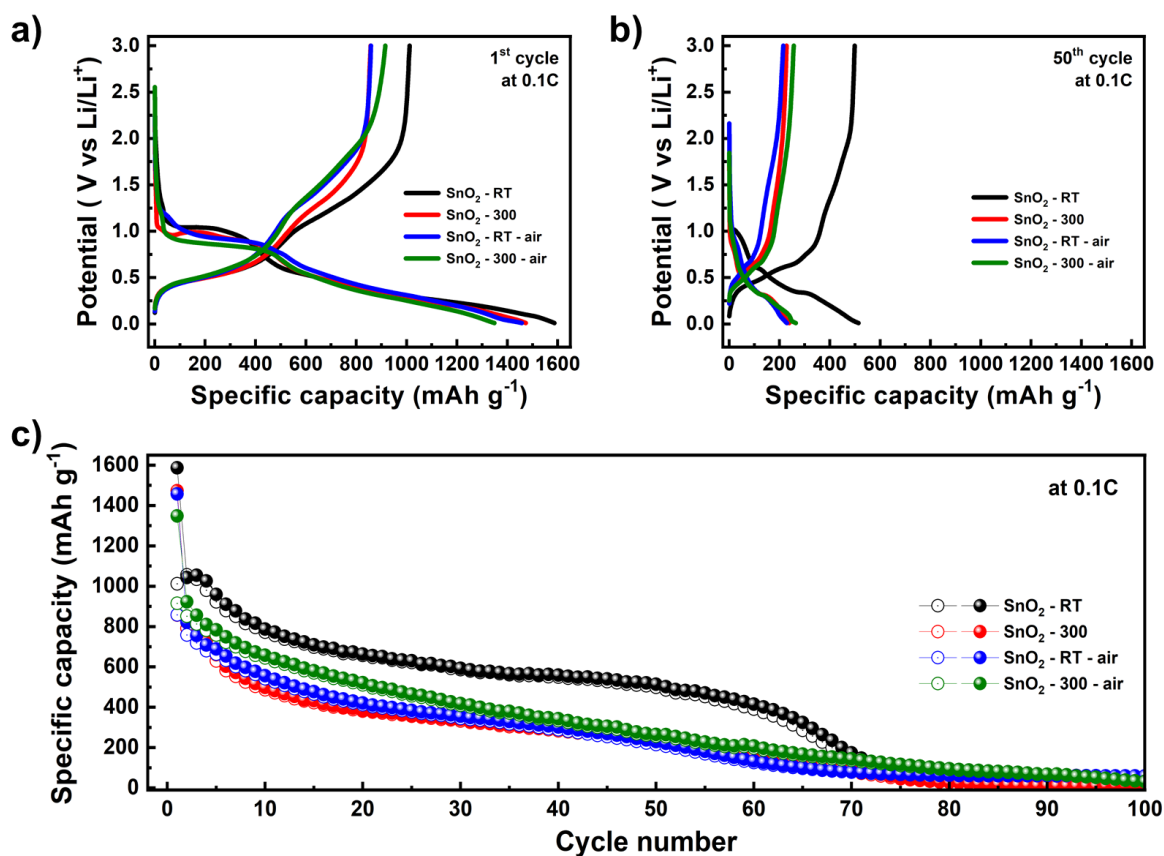
The morphology and crystallinity of the as-deposited  $\text{SnO}_2$  films are strongly influenced by the deposition temperature. The  $\text{SnO}_2\text{-RT}$  film (Figure 2a) exhibits a dense, nanogranular structure composed of very fine, uniformly distributed particles, which is consistent with XRD analysis showing

broad and weak diffraction peaks indicative of low crystallinity and small grain size. In contrast, the SnO<sub>2</sub>-300 film (Figure 2c) displays a more defined granular texture and improved structural uniformity, reflected by sharper and more intense XRD peaks, suggesting enhanced crystallinity and significant grain growth at the elevated substrate temperature.

Air annealing further improves structural ordering. SnO<sub>2</sub>-RT-air (Figure 2b) becomes smoother and more homogeneous due to pronounced crystallization and grain coarsening, as confirmed by stronger and narrower XRD peaks. SnO<sub>2</sub>-300-air (Figure 2d) exhibits more subtle morphological changes; however, additional grain growth and improved uniformity are still observed, consistent with slight peak sharpening in the diffraction patterns. Overall, air annealing promotes crystallization and structural refinement while preserving the rutile SnO<sub>2</sub> phase composition.

#### 4. Discussion

The prepared thin-film electrodes were tested in lithium cells using galvanostatic cycling. The charge/discharge voltage curves of SnO<sub>2</sub>-based anodes (Figure 3a and b) represent a comprehensive assessment of the electrochemical characteristics of these electrodes. This figure shows profiles for electrodes treated under various conditions, including after deposition at RT and after subsequent annealing in air, as well as for electrodes deposited at an elevated temperature of 300°C under similar conditions after annealing treatment conditions.



**Figure 3.** Potential profiles of all samples at 0.1C in (a) 1<sup>st</sup> and (b) 50<sup>th</sup> cycles and (c) cycle performance of SnO<sub>2</sub> anodes at 0.1C

The first-cycle discharge/charge curves (Figure 3a) exhibit the typical multistep lithiation mechanism of SnO<sub>2</sub>. During the initial discharge, all samples show a broad sloping region above 1.0-1.2 V, which corresponds to the irreversible conversion of SnO<sub>2</sub> to metallic Sn, accompanied by the formation of Li<sub>2</sub>O (Dong et al., 2017). This step is associated with large polarization, especially in the SnO<sub>2</sub>-RT sample, as indicated by the more pronounced potential drop and broader reaction region. In contrast, the annealed samples, particularly those treated at 300 °C, demonstrate reduced polarization and more well-defined conversion plateaus, reflecting improved charge-transfer kinetics. The second characteristic region in the first discharge cycle appears at 0.5-0.8 V, corresponding to the alloying of Sn with Li to form Li<sub>x</sub>Sn phases (Serikkazyeva et al., 2023). The alloying plateau is clearer and occurs at lower overpotential for the annealed samples, again indicating lower polarization. Below 0.2 V, all samples show additional capacity associated with deep lithiation and SEI formation, contributing to the large initial irreversible capacity loss (Zhang et al., 2019).

By the 50th cycle (Figure 3b), the potential curves become more stable and reproducible. The hysteresis between discharge and charge curves decreases for all samples, particularly those thermally treated. The main reversible plateau around 0.4-0.8 V, corresponding to Li<sub>x</sub>Sn alloying/dealloying, becomes the dominant feature (Jiang et al., 2017). SnO<sub>2</sub>-RT maintains the highest polarization even after cycling, displaying larger potential gaps and a less distinct plateau, indicating slower kinetics and structural degradation. Meanwhile, the SnO<sub>2</sub>-300 sample preserves clearer plateaus and lower overpotentials, demonstrating improved structural and electrochemical stability during repeated cycling.

The comparison is based on deposited and post-annealed samples of SnO<sub>2</sub> (Figure 3c). The sample SnO<sub>2</sub>-RT shows the best cycling stability compared to all other conditions, including annealed samples. In contrast, the sample SnO<sub>2</sub>-300 shows a sharp decrease in capacitance and poor capacitance retention, similar to the behavior observed for the Ti-only sublayer sample (Yegamkulov et al., 2025). This emphasizes the negative effect of elevated deposition temperature on the lifetime of the coatings. The sample SnO<sub>2</sub>-RT-air shows good initial behavior but exhibits a gradual decrease in capacitance, not surpassing the stability of the untreated sample at RT. In all cases, deposition at 300 °C results in worse capacity retention, indicating thermal instability or enhanced side reactions at elevated temperatures. Thus, the sample deposited at RT stands out as the most stable among all tested conditions for SnO<sub>2</sub> with a Ti-Pt sublayer. Probably, the presence of Pt in the sublayer contributes to the stabilization of the structure even without high-temperature annealing, in contrast to the Ti-only sublayer described in the work (Yegamkulov et al., 2025).

## **5. Conclusion**

SnO<sub>2</sub> thin films deposited by RF magnetron sputtering with a Ti-Pt interlayer exhibit electrochemical properties strongly dependent on deposition and annealing conditions. XRD and SEM analyses confirm that annealing in air promotes crystallization and formation of a porous nanostructure that enhances Li<sup>+</sup> transport and mechanical integrity during cycling. In particular, it is found that amorphous films deposited at room temperature exhibit higher cycling stability due to their structural flexibility and ability to buffer volume expansion during lithiation/delithiation. In contrast, crystalline films after annealing show a higher degree of crystallinity and reduced polarization; however, they demonstrate poorer long-term cycling stability as a result of grain growth and decreased mechanical stability. Films deposited at room temperature demonstrate the most stable performance over first few cycles, compared to other samples. A gradual capacity decay is observed for all samples up to the 100<sup>th</sup> cycle. These results indicate that the optimal configuration for stable and high-performance SnO<sub>2</sub> anodes includes deposition at room temperature and the use of a Ti-Pt interlayer to improve interface stability and conductivity and demonstrate how the electrochemical performance of SnO<sub>2</sub> thin film anode evolves when a Ti-Pt interlayer is used, in comparison with a single Ti interlayer. This study contributes to the

optimization of SnO<sub>2</sub>-based thin film anodes for advanced lithium-ion microbattery technologies.

**6. Supplementary Materials:** No Supplementary Materials.

## 7. Author Contributions

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

## 8. Author Information

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

Yegamkulov, Mukagali – researcher, Institute of New Materials and Energy Technologies PI, Nazarbayev University, Institute of Batteries LLC, 53 Kabanbay Batyr Avenue, Astana, Kazakhstan, 010000; [mukagali.yegamkulov@nu.edu.kz](mailto:mukagali.yegamkulov@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-1133-3201>

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

Tazhkenova, Gaukhar – candidate of chemical sciences, associate professor, Department of Chemistry, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev str., Astana, Kazakhstan, 010008; [gaukhar-1970@mail.ru](mailto:gaukhar-1970@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0491-593X>

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

Bakenov, Zhumabay – professor, School of Engineering and Digital Sciences, General Director, Institute of New Materials and Energy Technologies PI, Nazarbayev University, Institute of Batteries LLC, 53 Kabanbay Batyr Avenue, Astana, Kazakhstan, 010000; [zbakenov@nu.edu.kz](mailto:zbakenov@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0003-2781-4955>

Mukanova, Aliya – PhD, associate professor, Deputy Director, Institute of New Materials and Energy Technologies PI, Nazarbayev University, Institute of Batteries LLC, 53 Kabanbay Batyr Avenue, Astana, Kazakhstan, 010000; [aliya.mukanova@nu.edu.kz](mailto:aliya.mukanova@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-1171-176X>

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

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

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

## 12. References

1. Manthiram, A. (2020). A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. *Nature communications*, 11(1), 1550. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15355-0>

2. Nanda, J., Martha, S. K., & Kalyanaraman, R. (2015). High-capacity electrode materials for electrochemical energy storage: Role of nanoscale effects. *Pramana*, 84(6), 1073-1086. <https://doi.org/10.1007/s12043-015-1006-8>
3. Cameán, I., Lavela, P., Tirado, J. L., & García, A. B. (2010). On the electrochemical performance of anthracite-based graphite materials as anodes in lithium-ion batteries. *Fuel*, 89(5), 986-991. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.06.034>
4. Poizot, P. L. S. G., Laruelle, S., Grugeon, S., Dupont, L., & Tarascon, J. M. (2000). Nano-sized transition-metal oxides as negative-electrode materials for lithium-ion batteries. *Nature*, 407(6803), 496-499. <https://doi.org/10.1038/35035045>
5. Cabana, J., Monconduit, L., Larcher, D., & Palacin, M. R. (2010). Beyond intercalation-based Li-ion batteries: the state of the art and challenges of electrode materials reacting through conversion reactions. *Advanced materials*, 22(35), E170-E192. <https://doi.org/10.1002/adma.201000717>
6. Kamali, A. R., & Fray, D. J. (2011). Tin-based materials as advanced anode materials for lithium ion batteries: a review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 27(1), 14-24.
7. Yegamkulov, M., Bakhytzhanova, Z., Bekmakhanova, A., Issatayev, N., Nurpeissova, A., Bakenov, Z., & Mukanova, A. (2025). Morphology and interfacial design of SnO<sub>2</sub> thin-film anodes for high-performance lithium-ion batteries. *RSC advances*, 15(39), 32810-32820. <https://doi.org/10.1039/D5RA05444C>
8. Serikkazyeva, A., Mashekova, A., Uzakbaily, B., Bakenov, Z., & Mukanova, A. (2023). Novel Li/LixSny thin film designed as an anode for lithium-ion microbatteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 965, 171381. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171381>
9. Asenbauer, J., Kuenzel, M., Eisenmann, T., Birrozzi, A., Chang, J. K., Passerini, S., & Bresser, D. (2020). Determination of the volume changes occurring for conversion/alloying-type Li-ion anodes upon lithiation/delithiation. *The journal of physical chemistry letters*, 11(19), 8238-8245. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.0c02198>
10. Yu, Y., Chen, C. H., & Shi, Y. (2007). A tin-based amorphous oxide composite with a porous, spherical, multideck-cage morphology as a highly reversible anode material for lithium-ion batteries. *Advanced materials*, 19(7), 993-997. <https://doi.org/10.1002/adma.200601667>
11. Kebede, M. A. (2020). Tin oxide-based anodes for both lithium-ion and sodium-ion batteries. *Current Opinion in Electrochemistry*, 21, 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.02.003>
12. Huang, B., Li, X., Pei, Y., Li, S., Cao, X., Massé, R. C., & Cao, G. (2016). Novel carbon-encapsulated porous SnO<sub>2</sub> anode for lithium-ion batteries with much improved cyclic stability. *Small*, 12(14), 1945-1955. <https://doi.org/10.1002/sml.201503419>
13. Teng, X., Zhang, F., Li, Q., Wang, X., Ye, W., Li, H., & Hu, H. (2020). Interfacial engineering of self-supported SnO<sub>2</sub> nanorod arrays as anode for flexible lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(12). <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abac86>
14. Omampuliyur, R. S., Bhuiyan, M., Han, Z., Jing, Z., Li, L., Fitzgerald, E. A., & Choi, W. K. (2015). Nanostructured thin film silicon anodes for Li-ion microbatteries. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 15(7), 4926-4933. <https://doi.org/10.1166/jnn.2015.9831>
15. Xia, Q., Zan, F., Zhang, Q., Liu, W., Li, Q., He, Y., & Xia, H. (2023). All-solid-state thin film lithium/lithium-ion microbatteries for powering the Internet of things. *Advanced Materials*, 35(2), 2200538. <https://doi.org/10.1002/adma.202200538>
16. Nur-E-Alam, M., Lonsdale, W., Vasiliev, M., & Alameh, K. (2019). Application-specific oxide-based and metal-dielectric thin-film materials prepared by radio frequency magnetron sputtering. *Materials*, 12(20), 3448. <https://doi.org/10.3390/ma12203448>
17. Ren, J., Xu, G., Li, K., Yang, A., Chu, J., Yuan, H., & Wang, X. (2025). Research on the fabrication process of DMC sensors based on RF magnetron sputtered SnO<sub>2</sub> thin films. *Sensors and Actuators*

- A: *Physical*, 117088. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.117088>
18. Kumar, S. S., Rubio, E. J., Noor-A-Alam, M., Martinez, G., Manandhar, S., Shutthanandan, V., & Ramana, C. V. (2013). Structure, morphology, and optical properties of amorphous and nanocrystalline gallium oxide thin films. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(8), 4194-4200. <https://doi.org/10.1021/jp311300e>
  19. Ghantasala, S. B. & Sharma, S. (2023). Magnetron sputtered thin films based on transition metal nitride: structure and properties, *Phys. Status Solidi A*, 220, 2200229. <https://doi.org/10.1002/pssa.202200229>
  20. Morankar, P. J., Amate, R. U., Yewale, M. A., & Jeon, C. W. (2024). Effect of annealing temperature on morphology and electrochromic performance of electrodeposited WO<sub>3</sub> thin films. *Crystals*, 14(12), 1038. <https://doi.org/10.3390/cryst14121038>
  21. Shao, C., Yu, J., Li, X., Wang, X., & Zhu, K. (2017). Influence of the Pt nanoscale interlayer on stability and electrical property of Ti/Pt/Sb-SnO<sub>2</sub> electrode: a synergetic experimental and computational study. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 804, 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.09.057>
  22. Courtney, I. A., & Dahn, J. R. (1997). Electrochemical and in situ X-ray diffraction studies of the reaction of lithium with tin oxide composites. *Journal of the Electrochemical Society*, 144(6), 2045-2052. <https://doi.org/10.1149/1.1837740>
  23. Habte, A. G., Hone, F. G., & Dejene, F. B. (2020). Influence of annealing temperature on the structural, morphological and optical properties of SnO<sub>2</sub> nanoparticles. *Physica B: condensed Matter*, 580, 411760. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.411760>
  24. Dong, W., Xu, J., Wang, C., Lu, Y., Liu, X., Wang, X. & Huang, F. (2017). A robust and conductive black tin oxide nanostructure makes efficient lithium-ion batteries possible. *Advanced materials*, 29(24), 1700136. <https://doi.org/10.1002/adma.201700136>
  25. Zhang, W., Cai, T. H., & Sheldon, B. W. (2019). The impact of initial SEI formation conditions on strain-induced capacity losses in silicon electrodes. *Advanced Energy Materials*, 9(5), 1803066. <https://doi.org/10.1002/aenm.201803066>
  26. Jiang, Y., Li, Y., Zhou, P., Lan, Z., Lu, Y., Wu, C., & Yan, M. (2017). Ultrafast, highly reversible, and cycle-stable lithium storage boosted by pseudocapacitance in Sn-based alloying anodes. *Advanced Materials*, 29(48), 1606499. <https://doi.org/10.1002/adma.201606499>

## SnO<sub>2</sub> жұқа пленкалы литий-ионды аккумуляторлардың аноды ретінде электрохимиялық сипаттамаларына шашырау шарттарының әсері

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

**Аңдатпа.** SnO<sub>2</sub> жұқа пленкалы анодтары Ti–Pt аралық қабатымен қапталған тот баспайтын болат (SS) субстраттарына метал Sn нысанасын радиожиілікті (РЖ) магнетронды шашырату әдісі арқылы алынды. Пленкалар Ar/O<sub>2</sub> атмосферасында бөлме температурасында (RT) және 300°C-та тұндырылып, кейіннен 620°C-та ауада күйдірілді. Пленкалардың құрылымы, морфологиясы және электрохимиялық қасиеттері жүйелі түрде зерттелді. Рентгендік дифракциялық талдау (XRD) нәтижелері бөгде фазаларсыз тетрагональды рутил құрылымды таза SnO<sub>2</sub> фазасының түзілгенін растады. СЭМ (SEM) зерттеулері тұндыру температурасы мен термиялық өңдеуге байланысты түйіршік өлшемі мен беттік біртектіліктің айтарлықтай өзгеретінін көрсетті. CR2032 типті тиын элементтерінде жүргізілген электрохимиялық сынақтар SnO<sub>2</sub> үшін конверсиялық және легірлеу

реакцияларын қамтитын көпсатылы литийлену механизмін анықтады. Күйдіру кристалдылықты арттырып, поляризацияны төмендеткенімен, бөлме температурасында тұндырылған пленкалар жоғары температурада алынған үлгілермен салыстырғанда ұзақ мерзімді циклдік тұрақтылықтың жоғары көрсеткішін көрсетті. Алынған нәтижелер SnO<sub>2</sub> жұқа қабатты анодтарының құрылымдық тұтастығы мен электрохимиялық тұрақтылығын басқаруда тұндыру температурасы мен аралық қабат конфигурациясының шешуші рөл атқаратынын көрсетеді.

**Түйін сөздер:** литий-ионды аккумуляторлар, SnO<sub>2</sub>, Ti/Pt аралық қабаты, радиожиілікті магнетронды шашырау, қыздыру, электрохимиялық көрсеткіштер.

## **Влияние условий осаждения на электрохимические характеристики тонких пленок SnO<sub>2</sub> в качестве анодов для литий-ионных аккумуляторов**

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

**Аннотация.** Тонкопленочные аноды SnO<sub>2</sub> были изготовлены методом высокочастотного магнетронного (ВЧ) распыления металлической мишени Sn на подложки из нержавеющей стали с покрытием Ti/Pt. Осаждение проводилось при комнатной температуре (RT) и при 300 °С в атмосфере Ar/O<sub>2</sub> с последующим отжигом на воздухе при 620 °С. Структура, морфология и электрохимические характеристики плёнок были систематически исследованы. Анализ рентгеновской дифракции (XRD) подтвердил формирование чистой фазы тетрагонального рутила SnO<sub>2</sub> без обнаружения вторичных фаз. Методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) выявлены значительные изменения размера зёрен и однородности поверхности в зависимости от температуры осаждения и термической обработки. Электрохимические испытания в моноточных ячейках CR2032 продемонстрировали характерный многостадийный механизм литирования SnO<sub>2</sub>, включающий реакции конверсии и сплавообразования. Несмотря на то, что отжиг способствовал повышению кристалличности и снижению поляризации, плёнки, осаждённые при комнатной температуре, показали более высокую долговременную циклическую стабильность по сравнению с образцами, полученными при повышенной температуре. Полученные результаты подчёркивают ключевую роль температуры осаждения и конфигурации подслоя в контроле структурной целостности и электрохимической стабильности тонкопленочных анодов SnO<sub>2</sub> для литий-ионных аккумуляторов.

**Ключевые слова:** литий-ионные аккумуляторы, SnO<sub>2</sub>, межслой Ti/Pt, радиочастотное магнетронное распыление, отжиг, электрохимические характеристики.

## Металл органикалық қаңқаны (ZIF-8) синтездеу және оның ағынды суды тазартуға қолданылуы: шолу

Назгуль Далабаева<sup>1\*</sup>, George Kostakis<sup>2</sup>, Нұрбану Сарова<sup>3</sup>, Гулия Сдикова<sup>4</sup>, Жанар Қорғанбаева<sup>5</sup>, Тұрар Ақылбекова<sup>5</sup>

<sup>1</sup>әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, химия және химиялық технология факультеті, жалпы және бейорганикалық химия кафедрасы, Алматы, Қазақстан, [nazgulds81@gmail.com](mailto:nazgulds81@gmail.com)

<sup>2</sup>Сассекс университеті, Тіршілік ғылымы мектебі, Ұлыбритания, [G.Kostakis@sussex.ac.uk](mailto:G.Kostakis@sussex.ac.uk)

<sup>3</sup>Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан, [n.sarova@abaiuniversity.edu.kz](mailto:n.sarova@abaiuniversity.edu.kz)

<sup>4</sup>М.Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан Университеті, Орал, Қазақстан, [sdikova.guliya@mail.ru](mailto:sdikova.guliya@mail.ru)

<sup>5</sup>Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан, [korganbaeva.zhan@mail.ru](mailto:korganbaeva.zhan@mail.ru), [t.akylbekova@abaiuniversity.edu.kz](mailto:t.akylbekova@abaiuniversity.edu.kz)

\*Корреспонденция: [nazgulds81@gmail.com](mailto:nazgulds81@gmail.com)

**Аңдатпа.** Өнеркәсіп пен ауыл шаруашылығының қарқынды өсуіне байланысты қоршаған ортаның ауыр металдар иондарымен ластануы жылдан жылға күшейе түсуде. Ауыр металдар адам үшін өте қауіпті және қоршаған орта мен

экожүйеге зиянды әсер етеді. Ауыр металдар ағынды суларға төгіліп, адам ағзасына ену қаупі бар. Сондықтан, ағынды сулардан ауыр металл иондарын жою қоршаған ортада да, бизнесте де үлкен назар аударатын өзекті мәселе болып табылады. Осыған орай қазіргі кезде суды тазартудың дәстүрлі әдіс-тәсілдерін ауыстыру немесе заманауи технологияларды енгізу үшін жетілдірілген материалдарды әзірлеу қарастырылуда. Осы мәселелерді шешу үшін үш өлшемді органикалық-бейорганикалық кешеннің жаңа түрі болып табылатын металл-органикалық қаңқалар (MOF) осы мәселелердің шешімі ретінде, әсіресе адсорбция саласында аса маңызды. Бұл шолу мақалада MOF материалының бір түрі - Zn металл атомынан және 2-метилимидазолдан тұратын цеолитті имидазол қаңқасын (ZIF-8) синтездеу тәсілдерінің түрлері және олардың ерекшеліктері келтірілген. Сондай-ақ (ZIF-8) ағынды суларды тазартуда белгілі материал болып табылатындығы, оның жоғары адсорбциялық қабілеті мен фотокаталитикалық материалдар үшін ерекше қасиеттері бар екені туралы қарастырылады. Сонымен қатар судан ауыр металдарды тиімді жоюда MOF-терді қолдану, синтездеу және олардың суды тазартудан басқа да қолданыстарға пайдаланудың соңғы жетістіктері талқыланған.

**Түйін сөздер:** металл-органикалық қаңқалар (MOF); ZIF-8; ауыр металдарды жою; суды тазарту, ластану

**Дәйексөз:** Далабаева, Н., Kostakis, G., Сарова, Н., Сдикова, Г., Қорғанбаева, Ж., Ақылбекова, Т. (2026). Металл органикалық қаңқаны (ZIF-8) синтездеу және оның ағынды суды тазартуға қолданылуы: шолу. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 154(1), 37-59. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-37-59>

Академиялық редактор:  
Э.Е. Копишев

Редакцияға түсті: 21.11.2025  
Түзетілді: 18.12.2025  
Қабылданды: 19.12.2025  
Басылымға шықты: 31.03.2026



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

## 1. Кіріспе

Адамдардың өнеркәсіптік ағынды суларды қайта қалпына келтіріп қолдануы әлемдегі ең маңызды экологиялық мәселелердің біріне айналды (Fayemiwo et al., 2018). Ауыр металдар биологиялық ыдырамайды және қоршаған ортада жиналуға бейім болғандықтан, ауыр металдардың ластануы қоршаған ортаға да, халықтың денсаулығына да үлкен қауіп төндіреді. Сонымен қатар, тіпті концентрациясы төмен көптеген ауыр металл иондары да қауіпті және адам денсаулығына өте зиян.

Судың ластануы адам денсаулығына үлкен қауіп төндіретін экологиялық мәселелердің бірі болып табылады (Shannon et al., 2008; Vorosmarty et al., 2000; Vorosmarty et al., 2010). Сондықтан судың ластануын бақылау және тазарту өте маңызды. Судың ластануына әртүрлі көздерден алынған көптеген күрделі құрауыштар ықпал етеді. Фармацевтикалық препараттар, жеке күтім заттары, өнеркәсіптік ластаушы заттар және басқа да заттар соңғы жылдары су көздерін ластайтыны анықталған. Бұлар жүздеген органикалық ластаушы заттардың (ОЛЗ) қатарына жатады (Lapworth et al., 2012; Liang et al., 2021). Концентрациясы төмен болса да суды тазартудың әдеттегі әдістерімен олардың физикалық немесе химиялық сипаттамаларына (мысалы, суда еритін) байланысты толығымен жою қиын (Joseph et al., 2019).

Өнеркәсіп қарқынды дамып келе жатқандықтан, өнеркәсіптік ағынды сулар қоршаған ортаны көбірек ластайды. Ауыр металдар өте улы және табиғи және жасанды ластанудың көптеген түрлері өмірге елеулі қауіпті. Адамдарға және басқа экожүйелерге зиянды әсер ететіндіктен, су ортасындағы ауыр металдардың, әсіресе өнеркәсіптік ағынды сулардың ластануы күрделі мәселеге айналды. Ауыр металдарды судан тиімді жоюдың немесе жою мүмкін болмағандықтан, олардың аздаған мөлшері денеге енгеннен кейін денсаулыққа қатысты маңызды мәселелерді тудыруы мүмкін. Қорғасын, сынап, мышьяк, кадмий және мыс иондары шынымен ластанған судан тазартылуы керек ластаушы заттар ретінде қарастырылады. Қорғасын мен сынап миды, бүйректі және бауырды зақымдауы мүмкін, сәйкесінше қан кету, энцефалопатия және гепатит ауруын тудыруы, сондай-ақ гемопозтикалық жүйені бұзуы мүмкін. Сонымен қатар, олар тірі ағзаларға және неврологиялық жүйеге, әсіресе бауыр мен өт қабына зиян келтіреді, бұл цирроз мен невритке әкеледі (Ahmad et al., 2021).

Меншікті беттік аудандары жоғары және белсенділіктері жоғары заттар мен ауыр металл иондарын су жүйелерінен балама әдістерді қолдану арқылы жоюға болады. Мысалы, құрысулар, диарея, асқазан-ішек жолдарының аурулары, бауыр мен бүйректің зақымдануы сияқты ауыр аурулар қоғамдық ауыз су жүйелеріндегі  $\text{Cu}^{2+}$  ионының шамадан тыс болғандығынан туындайды (Ajmal et al., 2005; Larous et al., 2005).

Мыспен ластанудың аква жұмыстарында дезинфекциялық құралдар мен құрамында мыс бар алгицидтерді кеңінен қолдану кезінде артқан. Уыттылық және қалпына келтірулерді зерттеулер бүгінгі күнге дейін бір ғана ластаушы жүйелерде жүргізілген. Жануарлар мен экожүйелер үшін уыттылықты түбегейлі өзгертуі мүмкін ластаушы заттардың арасындағы синергетикалық және антагонистік әсерлердің мүмкіндігін аздаған зерттеулер зерттеді, бірақ іс жүзінде екі ластаушы заттардың бір мезгілде көбеюі аралас ластаушы жүйелердің болашақта әлдеқайда кең таралғанын білдіреді (Jia et al., 2016; Shujing et al., 2017). Сондықтан, нақты тазарту үшін аралас ластанған жүйелерде айтарлықтай көп зерттеуді қажет етеді (Weng et al., 2013). Осылайша, су жүйелерінен өз деңгейінде ауыр металл иондарын тиімді жоюдың тиісті әдістерін жасау өте маңызды. Осы уақытқа дейін ауыр металдардың ағынды суларын тазартудың бірнеше әдістері анықталған, соның ішінде химиялық тұндыру, ион алмасу, мембраналық фильтрация, адсорбция және ион алмасу. Икемділігі мен құрылымының қарапайымдылығы, төмен пайдалану шығындары және күшті адсорбциялық қабілетіне байланысты адсорбция ауыр металдардың ағынды суларын тазартудың ең үнемді және тиімді әдістерінің бірі ретінде қарастырылды. Сонымен қатар,

адсорбция біршама қайтымды болғандықтан, адсорбенттер кейде тиісті десорбция процедурасы арқылы қалпына келтірілуі мүмкін (Chen et al., 2009; Gharabaghi et al., 2012; Vilensky et al., 2002; Ritchie et al., 2001., Celis et al., 2000; Wingensfelder et al., 2005; Yuvaraja et al., 2012).

Сондықтан өнеркәсіптік ағынды сулардан ауыр металдарды жоюда нақты пайдалану үшін адсорбциялық қабілеті және тиімділігі жоғары арзан адсорбенттер жасау өте қиын, бірақ өте қажет (Zhang et al., 2016).

Тіршілік суға тәуелді, таза суға деген қажеттілік күн сайын индустрияландыруға да, халық санының да көбеюіне байланысты артып келеді. Алайда, ағынды суларды қайта пайдалану үшін тұщы су көздерінің ластануын тиімді және тұрақты жою қажет. Биологиялық тазарту - химиялық, физикалық және биологиялық тазартуды қоса алғанда, кеңінен зерттелген бірнеше тазарту процедураларының ішінде ең үнемді және экологиялық таза болып саналады. Ауыр металдар мен күрделі, биологиялық ыдырамайтын заттар бұл үнемді әдісті қолдануды шектейді. Қарапайым синтез әдісі бар цеолитті имидазол қаңқасы (ZIF-8), арзанырақ, суға төзімді металл-органикалық каркас бұл зерттеуде оны сулы ерітінділерден ауыр металдарды жоюда тұрақты пайдалану үшін қарастырылған (Li et al., 2021).

Әлемдегі өнеркәсіптің қарқынды өсуіне байланысты бүкіл әлемде халық денсаулығы үшін артып келе жатқан экологиялық проблемалардың бірі коммуналдық және өндірістік ағынды суларды қайта жарату болып табылады (Nghah et al., 2008; Zhang et al., 2015). Электрлік қаптау, тау-кен өнеркәсібі, аккумулятор өндірісі, металлургия, былғары және металл жеткізу - мыс, кадмий, никель, сынап, қорғасын және т.б. сияқты ауыр металдардың салыстырмалы түрде жоғары концентрациясын қамтитын ағынды суларды шығаратын кәсіпорындардың бірнешеуі ғана. Бұл өндірістердің тазартылмаған ағынды сулары қоршаған ортаға және адам денсаулығына зиян келтіреді. Ауыр металдар иондары адамның ағзасына түскенде, олар адам денсаулығына өте қауіпті, өйткені олар органикалық ластаушылар сияқты ыдырамайды (Gavrilescu et al., 2004; Fu et al., 2010; Wang et al., 2011). Бұл металдар канцерогенді болумен қатар, көптеген ағзаларға зиян келтіруі мүмкін. Ағынды сулардағы ауыр металдар иондарының концентрациясы осы қауіптерге байланысты дүние жүзіндегі басты мәселе болып табылады (Kim et al., 2015).

Көлдер, өзендер және мұхиттар қазіргі кездегі ағынды сулардың жаппай төгілетін орны болды (Mahfuza et al., 2022; Saad et al., 2020). Қазіргі уақытта жер шары су тапшылығын бастан кешіруде, өйткені табиғи су көздері ластанған жерде халық саны артып жатыр. Ал ағынды суларды тазарту маңызды (Asano et al., 2002; Wirzal et al., 2015). Өнеркәсіптік ағынды сулардың ауыр металдар иондарымен ластануының артуы дүние жүзіндегі басты мәселе ретінде анықталды. Ауыр металл иондарының негізгі көздері гальваника, аккумулятор өндірісі, металлургия, тері өңдеу және металл өңдеу сияқты салалар болып табылады (Abo-Farha et al., 2019; Bakhtiari et al., 2015). Ауыр металл иондарының органикалық ластаушылардан айырмашылығы, биологиялық ыдырамайтын және теңіз жануарлары арқылы адамның ағзасына түскенде денсаулыққа қауіп төндіруі мүмкін (Babel et al., 2003; Nghah et al., 2007). Адсорбция, тұндыру, ион алмасу, мембраналық бөлу, электродиализ және фотокатализ ауыр металдарды ағынды сулардан тазарту үшін жылдар бойы зерттелген әдістердің бірі ретінде қарастырылады (Al-Saydeh et al., 2017). Су ерітіндісіндегі ауыр металл иондары MOF көмегімен экстракцияланады (Gnanasekaran et al., 2019).

## **2. Материалдар мен әдістер**

### *2.1. Цеолитті имидазол қаңқасы - 8 (ZIF-8) туралы ұғым*

Имидазол лигандтары бар Zn иондары дәстүрлі алюмосиликатты цеолиттермен құрылымдық ұқсастықтары бар (ZIF-8) деп аталатын металл-органикалық негіз класын құрайды. Бұл материалдың химиялық және термиялық тұрақтылығы жоғары, рН-сезімтал және табиғи кеуектілік қасиеттері бар. ZIF-8 синтез әдістері, меншікті сипаттамалары, дәрі

дәрмектер тасымалдау сияқты өзекті тақырыптар бойынша көптеген зерттеулер жүргізілді (Feng et al., 2021).

Алғаш рет 2006 жылы сипатталған цеолитті имидазол қаңқалар (ZIFs) термиялық тұрақтылығы жоғары цеолиттердің Si-O-Si бұрышына ұқсас кеуекті металл органикалық қаңқалардың (MOF) қосалқы класына жатады. Кеуекті металл органикалық қаңқаларының (MOFs) қосалқы класы болып табылатын цеолитті имидазол қаңқалары (ZIFs) металл мен имидазолды байланыстыратын (M-Im-M бұрышы) арасындағы  $145^\circ$  бірегей байланыс бұрышы бастапқыда 2006 жылы ашылған. Бұл бұрыш цеолиттердің Si-O-Si бұрышына ұқсайды. ZIF-8 кеуекті құрылымы 2-метилимидазол лигандтарымен тетраэдрлік байланысқан мырыш металл орталықтарынан тұрады. Бұл шамамен  $1600 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$  бетінің ауданы және  $3,4 \text{ \AA}$  алты сақиналы тесігі бар SOD (содалит) топологиясына жатады.  $400^\circ\text{C}$  дейін ZIF-8 өте термиялық тұрақты (Park et al., 2006).

ZIF-8 химиялық зондтауда (Lu et al., 2010), дәрілік заттарды енгізуде (Vasconcelos et al., 2012) және газды сақтауда немесе бөлуде (Peralta et al., 2012) пайдаланылады. Density Functional Theory - DFT (Тығыздық функционалдық теориясы) есептеулері ZIF-8-дің сыртқы бетінде Льюис қышқылы мен негіздік топтардан басқа Бронстед қышқылының топтары бар екенін көрсетеді. Кеуектердің ішкі жағында бұл белсенді топтар болмайды (Chizallet et al., 2010). ZIF-8 металл органикалық қаңқасы Фридел Крафт ацилденуі (Nguyen et al., 2012), трансэтерификация (Chizallet et al., 2010) және Кневенагель конденсациясы (Tran et al., 2011) сияқты үдерістерді катализдейтіні белгілі. Бұл реакциялардың барлығы сольвотермиялық әдіспен жасалған және BASF компаниясы Basolite Z1200® ретінде коммерциялық түрде сататын микроөлшемді ZIF-8 көмегімен жүзеге асырылды. Бөлме температурасында толуолдағы бензальдегид пен малонитрил арасындағы Кневенагель реакциясы гетерогенді катализаторлар ретінде микро өлшемді (100–200 нм) ZIF-8 бөлшектері пайдаланылған кезде тек ZIF-8 сыртқы бетінде катализденді. Кіші бөлшектер үлкендерге қарағанда үлкен каталитикалық белсенділік көрсетті (Zhao et al., 2014). Бөлме температурасында метанолдағы реагенттерді біріктіру арқылы ZIF-8 нанокристалдарын (nZIF-8) жасауға болады (Farrusseng et al., 2011). Нуклеация, кристалдық өсу және стационарлық фаза – метанолдағы ZIF-8 кристалының дамуының үш кезеңі (Venna et al., 2010). Кристалдың жылдам дамуы баяу нуклеациямен бірге жүреді (Cravillon et al., 2011) және 2-метилимидазол реагент бейтарап болғанда тұрақтандырғыш бірлік немесе протонсызданған кезде байланыстырушы бірлік ретінде қызмет ете алады (Jian et al., 2015). Ұсақ кристалдар 2-метилимидазол лигандын негізбен депротондау кезінде түзіледі, бұл нуклеация жылдамдығын тездетеді. Бұл катализге қол жетімді сыртқы бет аймағына әсер ететіндіктен, бөлшектердің өлшемі мен таралуын бақылау өте маңызды. 200-400 нм бөлшектердің өлшемдері және жоғары шығымдылыққа ZIF-8 өндірісі кезінде бөлшектердің өлшемін реттеуге көмектесетін қоспалар ретінде беттік белсенді заттар мен полимерлерді пайдалану арқылы қол жеткізілді (Yao et al., 2013). pH-тұрақталған сонокристалдау үдерісі шамамен 200 н және 85% кірістілігі бар кішірек бөлшектерді түзді (Cho et al., 2013). Метанол қатысындағы бөлме температурасында жылдам жүретін коллоидтық реакция 100 нм-ден кіші нанобөлшектерді жасау үшін пайдаланылды;  $\text{Zn}^{2+}$ , 2-метилимидазол және метанол үшін қатынасы тиісінше 1:8:700 болды. Бөлшектердің өлшемі 46 нм XRD шыңының кеңеюі арқылы табылды, ал 40 нм SEM және HRTEM (Cravillon et al., 2011) көмегімен табылды.

Бөлшектердің өлшемдері 9-дан 55 нм-ге дейін, бөлме температурасында метанолдағы реакциялық қоспаға әртүрлі қатынаста n-бутиламинді қосу арқылы алынды (Venna et al., 2010). Ең жоғары шығымдылық пен өнім тазалығы метанолды қолдану арқылы алынады, дегенмен ZIF-8 нанобөлшектерін су немесе (N,N-Диметилформамид) DMF сияқты басқа полярлық еріткіштермен де жасауға болады (Gross et al., 2012). Бөлме температурасында судағы n-ZIF-8 синтезі орташа мөлшері 85 нм болатын 80% шығымды бөлшектерді түзді (Pan et al., 2011). Бөлшектерінің өлшемі шамамен 100 нм болатын ZIF-8 метанол мен судың комбинациясын қолданатын бұрқу арқылы кептіру/буланған индукциялық өздігінен

құрастыру (EISA) үдерісі арқылы жасалды (Marquez et al., 2013). Беттік-белсенді заттар кішірек бөлшектердің артуын ынталандыру үшін басқа әдістерде жабу агенттері ретінде қолданылады.

Беттік-белсенді заттармен тұрақтандырылған майдағы су эмульсияларын (Brij® кері мицелла жүйелері) пайдалана отырып, синтезделген ZIF-8 нанобөлшектерінің өлшемін бақылау әдісі 30-дан 160 нм-ге дейінгі өте тар өлшемді үлестірімді бөлшектерді шығарды. 30 нм-ден аз бөлшектердің өлшемдері жүйенің температурасын 50°C-тан 37°C-қа дейін төмендету және прекурсор концентрациясын екі есе азайту арқылы алынды (Tran et al., 2011).

Термиялық, химиялық және гидротермиялық тұрақты цеолитті имидазолды қаңқалардың (ZIFs) беттік ауданы үлкен және ерекше адсорбциялық қасиеттері бар (Wu et al., 2015; Omar et al., 2010; Lee et al., 2015; Doonan et al., 2017). Дәрілік заттарды енгізу, газды сақтау, бөлу, катализ және химиялық датчиктерді қоса алғанда, әртүрлі мақсатта қолдану үшін бұл қасиеттер материалдарды қажет етеді (Demir et al., 2014; Li et al., 2010; Zhou et al., 2012). Әртүрлі имидазол байланыстырғыштары мен металл иондарының әртүрлі комбинациялары ZIF сипаттамаларының, түрлерінің және құрылымдарының негізгі детерминанттары болып табылады (Park et al., 2006; Kida et al., 2013). Көптеген ZIF құрылымдары әдебиетте құжатталған және әртүрлі ауыспалы металдарды (мысалы, Zn және Co), имидазол байланыстырғыштарын (мысалы, 2-метилимидазол және бензимидазол) және этанол, метанол, су, DMF сияқты еріткіштерді қолдану арқылы синтезделуі мүмкін (Zhou et al., 2012; Fathy et al., 2025).

ZIFs гидротермиялық немесе сольвотермиялық синтез әдістерін пайдалана отырып, 298-ден 423 К-ге дейінгі температурада, көбінесе имидазолдың артық мөлшерімен өндірілуі мүмкін (Lee et al., 2015; Qian et al., 2012).

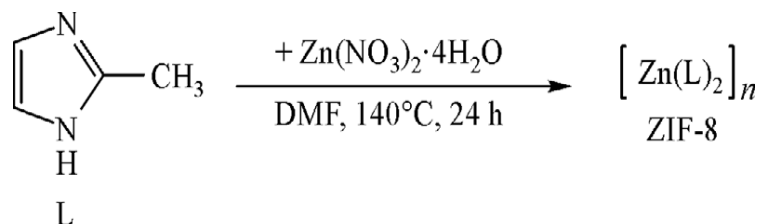
Химиялық өндірісті арттыратын және қоршаған ортаға әсерді азайтатын тиімдірек әдістерді жасау да соңғы зерттеулердің басты назарында болды (Yao et al., 2015).

## 2.2. ZIF-8 материалының синтезделуі

ZIF-8 синтездеуде гидротермиялық синтез, сольвотермиялық синтез, механохимиялық синтез және ультрадыбыстық/сонохимиялық синтезді қоса алғанда, бірқатар синтез әдістері ұсынылған. ZIF-8-тің дәрілік заттарды жеткізу, адсорбенттер мен катализаторлар ретінде қолданылуы оның кеуектілігінің жоғары және құрылымдарының өзгермелі болуымен ерекшеленеді (Lee et al., 2015).

### 2.2.1. Сольвотермиялық синтез

Бұл үдеріс ZIF-8 материалдарын алу үшін органикалық еріткіштерді пайдаланады. Park және т.б. (Park et al., 2006) N,N-диметилформамид (DMF), N-метилпирролидин және N,N-диэтилформамид сияқты органикалық еріткіштерді қолданып, алғаш рет ZIF-8 кристалдарын жасады. 1-суретте 1-метилимидазол (MIM) және мырыш нитраты тетрагидратының Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O DMF-те еруі, содан кейін 140°C температурада 24 сағаттық инкубациялық кезең көрсетілген (Park et al., 2006). Дегенмен, DMF молекулалары содалитті торлы молекулалардан үлкен болғандықтан, еріткіш алмасу арқылы ZIF-8 алу қиын (Lee et al., 2015).

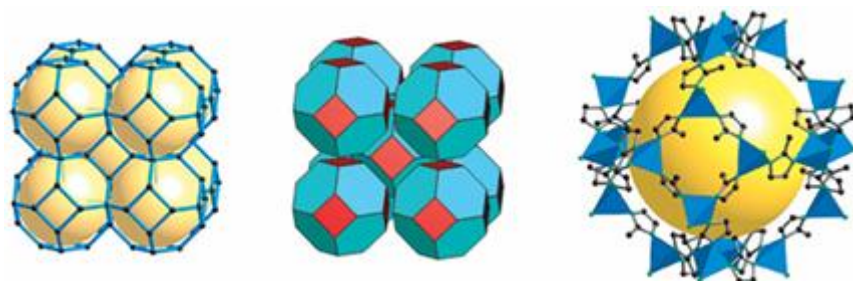


Сурет 1. ZIF-8 сольвотермиялық синтездеу процесі (Park et al., 2006)

Әдеби шолуларға сәйкес, метанол, DMF алмастырғыш болып табылады, өйткені ол ZIF-8 кеуектерінен оңай алынады, өйткені оның кинетикалық диаметрі DMF-ге қарағанда төмен (Lee et al., 2015). ZIF кристалдарын жасау үшін құрамында  $Zn(OH)_2$  бар сулы аммиак ерітіндісі құрамында MIM немесе 2-этилимидазол бар метанол ерітіндісімен біріктірілді (Kida et al., 2013). Осы жаңашыл зерттеуге сәйкес ZIF-8 кристалдары бірдей құрауыштарды біріктіріп, оларды бөлме температурасында бес сағат бойы ұстау арқылы жасалды (Huang et al., 2006; Zhang et al., 2011). Сонымен қатар, Zn иондары мен MIM арасындағы 1:8 молярлық қатынасы наноөлшемді ZIF-8 материалдарын синтездеу үшін пайдаланылуы мүмкін екендігі анықталды (Zhu et al., 2012).

Кейінгі зерттеулер бойынша метанол негізіндегі ZIF-8 синтезделді. Натрий форматы/ MIM және n-бутиламинді Cravillon және т.б. (Cravillon et al., 2009) 10-нан 65 нм-ге дейінгі диапазондағы ZIF-8 нанокристалдарының өлшемін реттеу үшін модификациялаушы лигандтар ретінде қолданды. Бөлме температурасында модификациялаушы лигандтар ZIF-8 кристалдануын да жылдамдатты (Cravillon et al., 2011). Алтыбұрышты пішінді ZIF-8 нанокристалдары метанолды жоғары молекулалы полимермен (диаллидиметиламмоний хлориді) тұрақтандыру арқылы жасалды (Cravillon et al., 2012). Сонымен қатар, ZIF-8 қосымша органикалық еріткіштерді, соның ішінде этанол (Bennett et al., 2013) және изопропил спирті (Nune et al., 2010) арқылы дайындалды.

Park және басқа ғалымдар (Park et al., 2006) 2 суретте көрсетілгендей кеуектілігі жоғары ZIF-8 монокристалды түрдегі құрылымын жасады. Одан кейін  $CH_3OH/NH_3 \cdot H_2O$  аралас ерітіндісімен синтезделді. Метанол мен аммиак ерітіндісінің қоспасын еріткіш ретінде қолдану тұрақты SOM-ZIF-8 материалының түзілуіне ықпал етеді. Бірақ метанол тұрақты ZIF-8 түзілуіне еріткіш ретінде қолданылатыны белгілі (Shen et al., 2018., Hu et al., 2019). Ал таза аммиак ZIF-8 көп мөлшерде түзілуіне ықпал етіп гомогенді ZIF-8 түзіледі және кристалдану жылдамдығы өте жоғары (Chen et al., 2019). Аммиак жоқ кезде барлық кристалдар ZIF-8 пайда болады және ZIF-8 нанокристал ретінде өседі. Екі еріткіштің әсерінің өте жақсы болатынына көз жеткізген Shen (Shen et al., 2018) және басқалар SOM-ZIF-8 (3, 0,5) аралықта түзілетіндігін анықтады.



**Сурет 2.** ZIF-8 кристалдық құрылымы. Сол жағы: таяқша диаграмма; Ортасы: ретпен орналасқан; Оң жағы: Ең үлкен топ (Park et al., 2006). Авторлық құқық: PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences, Ұлттық Академиялық ғылымдар еңбектері). <https://doi.org/10.1073/pnas.0602439103>

### 2.2.2. Гидротермиялық синтез

Бұл тәсіл арқылы ZIF-8 қолдануға оңай және экологиялық таза түрде шығарылуы мүмкін, өйткені солвотермиялық синтез үдерістерінде қолданылатын органикалық еріткіштер улы, қымбат, жанғыш және қоршаған ортаға зиянды. Қоршаған орта температурасында ZIF-8 синтезін зерттеу үшін соңғы жылдары сулы ерітінділер қолданылды; соған қарамастан, сулы ерітіндіде кеуекті қаңқасы жоқ тығыз құрылымды ZIF-8 синтезі алынуы өте қиын. Рап және т.б. (Troiano et al., 2019) алдымен бұл мәселені шешіп, сулы жүйеде қарапайым үдеріс арқылы бөлме температурасында ZIF-8 дайындады. Олар MIM ерітіндісін мырыш нитратының ерітіндісімен қоспаны шамамен 5 минут араластырды,

содан кейін центрифугалау арқылы өнімді алды. Дегенмен, МІМ мөлшері бұл әдісте қолданылатын Zn иондарынан шамамен 70 есе көп. Ол МІМ артық шығынын тудырады, себебі ZIF-8-дегі МІМ және Zn иондары арасындағы стехиометриялық молярлық қатынас теориялық тұрғыдан 2 болады. ZIF-8 препаратына 100-ден 20-ға дейінгі МІМ/Zn молярлық қатынасының әсері пайдаланылды (Pan et al., 2011). Zn иондары мен МІМ арасындағы әртүрлі стехиометриялық молярлық қатынаста синтез жағдайлары зерттелді. Сондай-ақ, синтез ерітіндісінің рН мәні ZIF-8 кристалдануына әсер ететіні анықталды. ZIF-8 су негізіндегі синтез әдістерін МІМ пайдалануды азайту үшін триэтанолламин (ТЕА), гидроксид және аммоний сияқты протондану агенттерін қолдану арқылы өзгертуге болады. Gross және т.б. (Tanaka et al., 2012) 4:1 МІМ және Zn иондары арасындағы молярлық қатынасты пайдаланып, триэтанолламин (ТЕА) қосу арқылы бөлме температурасында сулы жүйеде ZIF-8 синтездеді. Әдісте ешқандай жанама өнімдер пайда болған жоқ.

Wang және оның әріптестері одан әрі МІМ/металл молярлық қатынасы 2:1 болатын концентрлі аммоний гидроксиді сулы ерітінділерінде ZIF-8 синтезін жасады (Yao et al., 2013). Сулы аммиак ерітіндісінде ZIF-8 құрылымдарын, бөлшектердің өлшемдерін және текстуралық қасиеттерін реттеуге болатын өнім алуға болады. Бұл үнемді синтез әдістері ZIF-8 материалдарын кең көлемде өндіруді жеңілдетеді.

### 2.2.3. Ультрадыбыстық /сонохимиялық синтез

ZIF-8-ді ультрадыбыстық немесе сонохимиялық әдістермен де синтездеуге болады. Seoane және т.б. (He et al., 2014) ультрадыбыстық (АҚШ) және сольвотермиялық (ST) жағдайында ZIF-8, ZIF-7, ZIF-11 және ZIF-20 кристалдарын синтездеді. ZIF-8 жиілігі 47 кГц және қуаты 110Вт ультрадыбыстық өңдеу кезінде 45°C температурада өндірілді. Дәстүрлі сольвотермиялық әдістермен салыстырғанда ультрадыбыстық немесе сонохимиялық синтездің ұзақтығы қысқарады. Сондай-ақ, ZIF-8 кристалдары кәдімгі сольвотермиялық тәсілдермен жасалғандардан айырмашылығы кішірек бөлшектердің өлшеміне және өлшемі кіші бөлшектердің таралуына ие екендігі анықталды (He et al., 2014).

рН реттей отырып NaOH және ТЕА пайдалану арқылы Cho т.б. (Seoane et al., 2012) ZIF-8-ді сонохимиялық әдіспен синтездеді. Өте жоғары субстрат концентрацияларында ( $Zn^{2+}$ : DMF=1:3) ZIF-8 екі сағат ішінде көп мөлшерде синтезделді. Жоғары субстрат концентрациясын, рН және сонохимияны орынды пайдалану арқылы ZIF-8 синтезіне қол жеткізуге болады. Сонымен қатар, синтез уақытын дәстүрлі синтез әдістері үшін бірнеше күннен, ультрадыбыстық немесе сонохимиялық әдістер үшін 1-2 сағатқа дейін қысқартуға болады (Cho et al., 2013). Сонохимиялық әдіс жоғары температураны, қысымды және ерекше жылдам жылу беруді тудыратын әдістің бірі. Бұл үдерістер кезінде ерітінділерде көпіршіктер пайда болады (Suslick et al., 1986). ZIF-8 синтезі үшін дәстүрлі пешті қыздырудан айырмашылығы, сонохимиялық әдістер ерітінділердегі бөлшектердің біртекті нуклеациясын тездетеді (Son et al., 2008).

### 2.2.4. Механохимиялық синтез

Синтез үдерісінде еріткіштер мен тұздарды қолданбай, механохимиялық синтез әдісі қоршаған ортаның ластануын және кристалдық торға қоспалардың қосылуын азайтады (Schlesinger et al., 2010). Тығыз  $Zn(IM)_2$  ZnO-ны имидазолдың (IM) көп мөлшерімен қолмен ұнтақтау арқылы (Fernández-Bertrán et al., 2006) немесе  $ZnCl_2$  (Adams et al., 2007) қолданатын механохимиялық әдісті қолдану арқылы дайындалды. Құрғақ ұнтақтау нәтижесіндегі тотығуды болдырмау үшін ZIF-8 синтезіне сұйық немесе иондық ұнтақтау үдерістері ұсынылды (Beldon et al., 2010). Сұйық фаза бұл бөлшектердің жылжымалы қозғалғыштығын күшейте алады (Braga et al., 2006). Сонымен қатар, тұз қоспалары ZIF-8 түзілуін жеңілдетеді (Friscic et al., 2010). Ең бастысы, ұнтақтау үдерісінде сұйықтық пен тұз қоспаларынан синтезделген ZIF-8 түзіледі. Сондай-ақ еріткіштер мен қоспаларды қолданбай, ZnO-дан ZIF-8-ге механикалық химиялық құрғақ түрлендіру туралы айтылды (Tanaka et al., 2013).

1-Кестеден әр әдістің субстраттар, үдерістер және морфологиясынан өзіндік ерекшеліктері бар екенін көруге болады.

**Кесте 1.** ZIF-8 синтездеу әдістері (Qiaoling Zhou et al., 2025)

Әдістер	Субстраттар	Үдерістер	Морфология	Авторлық құқық
<b>Сольвотермиялық</b>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, 2-метилимидазол, N,N-диметилформаид (DMF)	Еріту араластыру → қыздыру → бөлме температурасына дейін суыту → сүзу → жуу → кептіру	Полигидратты ZIF-8 кристалдары	101, 2021, <i>Food and Chemical Toxicology</i> .
<b>Гидротермиялық</b>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, 2-метилимидазол, су, метанол	Еріту → араластыру → гидротермиялық синтез → центрифуга → жуу → кептіру	Ірі ZIF-8 кристалдар	102, 2020, <i>Journal of Alloys and Compounds</i> .
<b>Ультрадыбыстық/сонохимиялық</b>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, 2-метилимидазол, метанол	Dissolving separately → mixing → ultrasonic irradiation → centrifugation → washing → drying	Бірдей түрдегі ZIF-8 кристалдар	103, 2013, <i>Microporous and Mesoporous Materials</i> .
<b>Механохимиялық</b>	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O, 2-метилимидазол (ұнтақ)	Ұнтақты диірменде араластыру → електен өткізу → жуу → кептіру	Біріктірілген ZIF-8 бөлшектері	104, 2021, <i>Materials Today</i> .

### 3. Талдау

#### 3.1. ZIF-8 қолдана отырып ауыр металдарды ағынды сулардан жою

Өндіріс, құрылыс және пайдалы қазбаларды өндіру өнеркәсібінен жинақталған ағынды сулардың төгілуінен туындаған экологиялық мәселелер соңғы жылдары экономикалық және өнеркәсіптің жылдам артуына байланысты өзекті болып келеді. Қазіргі уақытта суды қоршаған ортаны қорғау алдында тұрған өзекті мәселелердің бірі су объектілерінің ауыр металдармен ластануы болып табылады. Ауыр металл иондарының көпшілігі мутагенді, канцерогенді және биологиялық ыдырамайтын болғандықтан адамдарға және судағы тіршілікке орны толмас зиян келтіреді.

Мыс пен қорғасынның негізгі антропогендік көздері, суды ластайтын ауыр металл иондары тау-кен және балқыту, аккумулятор өндірісі және басқа да өндіріс пен өндеу кәсіпорындары болып табылады (Hong et al., 2020; Baby et al., 2010). Яғни, суды ластаудың антропогендік көздері ауыр металдар болғандықтан бұл экологиялық мәселеге жатады. Суды ластайтын мыс пен қорғасынның биологиялық жинақталуы және уыттылығы жоғары, ластанған су ағзаға, балықтарға және адам денсаулығына зиян келтіреді (мысалы,

неврологиялық зақымдар, бүйрек аурулары). Адам қолынан жасалатын антропогендік көздердің сипаттамасы 2-кестеде келтірілген.

**Кесте 2.** Адам қолынан жасалатын антропогендік көздер (Baby et al., 2010)

Антропогендік көз	Сипаттамасы	Мысалдар
Тау - кен және балқыту	Кен өндіру және металды балқыту кезінде қалдық сулар арқылы металл иондары жіберіледі.	Мыс кеніштері, қорғасын-мырыш комбинаттары.
Аккумулятор өндірісі	Қорғасын-қышқыл аккумуляторларын өндіруде қорғасын қолданылады.	Барлық елдегі автомобиль аккумуляторларын шығаратын зауыттар.
Басқа өндіріс және өңдеу	Металлургия, бояу өндірісі, электроника, химия өнеркәсібі.	Түтін түтіктерінен немесе тазартылмаған ағын сулардан шығатын ластану.

Зерттеулерге сәйкес, судың құрамында мыс немесе қорғасын болса адамдарға қайтымсыз зиян келтіруі мүмкін. Мысалы, тым көп мыс бауыр циррозына және бүйрекке, миға және басқа мүше тіндеріне (Gaetke et al., 2003) зақым келтіруі мүмкін, ал тым көп қорғасын сүйектерді өзгертіп, қызыл қан жасушаларымен проблемаларды тудыруы мүмкін, бұл анемия мен қатерлі ісікке әкелуі мүмкін (Briffa et al., 2020).

Адам ағзасына тікелей немесе жанама ену арқылы мыс пен қорғасын ағзада жиналып, көптеген аурулар мен өлімге әкеледі (Zeitoun et al., 2014; Li et al., 2021).

Сондықтан, қоршаған ортаға жіберілмес бұрын құрамында ауыр металл иондары бар ағынды суларды аз мөлшерде тазарту керек. Қазіргі кезде ауыр металл иондары ағынды сулардан химиялық тұндыру, мембраналық бөлу, ион алмасу және электрохимиялық тазарту сияқты әртүрлі тазарту әдістерінің көмегімен жойылады (Fu et al., 2011; Arbabi et al., 2016).

Көптеген химиялық реагенттерді пайдаланудан басқа, флокуляция және коагуляция мәселесіне әкеледі. Мембрананы бөлу процесі ауыр металл иондарын жоюда айтарлықтай тиімді болғанымен, ол экономикалық тұрғыдан тиімсіз және көп күтімді қажет етеді. Электродиализ тәсілінің жоғары сепарациялық селективтілігі айтарлықтай техникалық күрделілікпен және ион алмасумен қатар жүреді (Azimi et al., 2017; Qasem et al., 2021; Ahmed H et al., 2016). Бұл пайдаланудың қарапайымдылығына, үнемділігіне және қоршаған ортаға зиянсыздығына байланысты адсорбциялық технология құрамында ауыр металл иондары бар ағынды суларды тазалаудың ең кең таралған әдістерінің бірі болып табылады (Lei et al., 2019; Aklil et al., 2004).

Адсорбент, ең алдымен, адсорбция технологиясын қолдана отырып, ауыр металл иондарын адсорбциялау кезінде химиялық немесе физикалық әрекет арқылы ауыр металл иондарын адсорбциялау және бөлу үшін қолданылады және адсорбентті таңдау өте маңызды. Ағынды суларды тазарту үшін белсендірілген көмір, саз минералдары, полимерлер, цеолит және басқа адсорбциялық материалдар пайдаланылды. Алайда, ауыр металл иондарының адсорбциясына келетін болсақ, бұл материалдарда адсорбциялық кемшіліктер немесе адсорбциялық тиімділігі төмен болды (Orolínova et al., 2010, Naat et al., 2021).

ZIF-8 адсорбция үдерісінің ішкі кемшіліктерін басқа материалдардың функционалдық топтарында ерекшеліктері бар, бұл композиттік катализатордың меншікті бетінің ауданы мен адсорбцияны арттырады (Mo et al., 2022; Qu et al., 2021).

Алдыңғы зерттеулер ZIF-8 нанобөлшектерінің қанықпаған металл торлары ( $Zn^{2+}$ ) өздігінен құрастыру кезінде координациялық, иондық және сутектік байланыстары арқылы өзара әрекеттесуі мүмкін екенін көрсетті (Wang et al., 2020; Yang et al., 2018; Li et al., 2021; Chen et al., 2019).

Келтірілген әдебиеттерде айтылғандай әр материалдың артықшылықтары мен кемшіліктері болады. Мысалы, материал ретінде белсендірілген көмір мен ZIF-8 салыстыратын болсақ, табиғи зат - белсендірілген көмір арзан, қолжетімді болғанымен адсорбция тиімділігі төмен және қайта қалпына келтіру мүмкін емес. Ал ZIF-8 адсорбция тиімділігі жоғары, кеуектеріне металдардың енуі өте жақсы және металдар имидазол топтарымен хелаттасады. Бірақ хлорсутек немесе натрий гидроксидімен қайта қалпына келтіру кезінде адсорбция тиімділігі төмендейді.

Дәстүрлі адсорбенттерді (цеолиттер, белсендірілген көмір, биокөмір, хитозан, кремний диоксиді, саз минералдары және графен) салыстырғанда, ZIF-8 ластанған сулардан көптеген ауыр металл иондарын тазартуда тамаша адсорбциялық қабілетіне байланысты жоғары тиімділік көрсетеді (3-кесте). 3-кестеде көрсетілгендей, ZIF-8 эксперименталды жағдайларда сулы ерітінділерден ауыр металдарды жоғары деңгейде адсорбциялайды. Басқа адсорбенттермен салыстырғанда ZIF-8 әлдеқайда тиімді жұмыс істейді және әртүрлі ауыр металдарға айтарлықтай жоғары адсорбция сыйымдылығын қамтамасыз етеді. Қысқа адсорбция уақыты, бейтарап немесе әлсіз қышқыл ортадағы жағдайлар, оңай бақылау және қолдану ыңғайлылығы ZIF-8-нің ауыр металл иондарын адсорбциялауда өте тиімді болуына ықпал етеді. Дегенмен, MIL сериялы металлорганикалық қаңқа немесе UiO-66 сияқты жетілдірілген адсорбенттерге ұқсас ZIF-8 бірнеше маңызды шектеулерге ие: (1) мақсатты функционалдық топтардың болмауына байланысты төмен селективтілік, (2) экстремалды рН жағдайларындағы төмен тұрақтылық және (3) салыстырмалы түрде жоғары синтез шығындары. Осы мәселелерді шешу үшін ZIF-8-ді стратегиялық функционализациялау немесе жаңа ZIF-8 негізіндегі композиттік материалдарды әзірлеу оның селективтілігін, химиялық тұрақтылығын және ауыр металдарды жою тиімділігін бір мезетте арттырып, өндіріс шығындарын онтайландыруға мүмкіндік береді.

**Кесте 3.** Әртүрлі адсорбенттердің ауыр металдарды сіңіруінің адсорбциялық қабілетін салыстыру (Qiaoling Zhou et al., 2025)

Ластаушы	Материалдар	Бастапқы концентрация (мг/л)	рН	Жанасу уақыты (мин)	Адсорбциялық қабілеті (мг/г)
<b>Cu(II)</b>	ZIF-8	120	5,0	90	378,5
	Күріш қабығы	128	–	20	2,30
	CS/SA/SiO <sub>2</sub>	100	6,0	240	47,50
	PANI@APTS-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /ATP-0,7	100	5,0	15	142,5
<b>Pb(II)</b>	SH/GG@MIL-100	100	6,0	300	311,48
	ZIF-8	100	6,0	15	475,54
	PANI@APTS-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /ATP-0,7	100	5,0	15	270,27
	A-MZF	100	3,0	300	160
	IDS-Mt5	300	8,0	10	214,73
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @UiO-66-PDA	50	5,0	800	121,42
	ZIF-8	50	5,0	45	34,3
<b>Cr(VI)</b>	ZnO NPs	20	6,0	35	48,50
	AO-CS	200	2,0	10	130,0
	MAF-LDOs	100	3,0	75	26,76
	UiO-66-(OH) <sub>2</sub>	20	3,0	200	18,20
	ZIF-8	20	7,0	480	81,40

	CS-FMO	40	3,0	1200	26,65
	Zr-Mn	10	7,0	900	52
	MIL-100(Fe)/1%GO-400	10	6,0	120	26,55
<b>Cd(II)</b>	ZIF-8	100	7,0	15	209,79
	MRBC	100	7,0	480	49,93
	MgAl-LDH	50	7,0	60	4,18
	MCTS@GO@DIP	50	6,0	30	39,35
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @UiO-66-Lcys	50	7,0	420	430,89
<b>Hg(II)</b>	ZIF-8	20	6,5	90	1271,27
	K-HAS	120	4,0	480	128,4
	Fe-Mn@SCAs	100	6,0	90	324,42
	PANI@SA-SNM	50	4,0	120	352,76
	NH <sub>2</sub> -MIL-101@PES	100	5,0	24 сағ	237,45

Судағы ауыр металдарды кетіруге арналған ZIF-8 негізіндегі адсорбенттердің адсорбциялық қабілетіне қарап ZIF-8 туындылары ауыр металдарды адсорбциялау бойынша көптеген басқа адсорбенттермен салыстырғанда әлдеқайда жоғары нәтиже көрсететіндігін байқауға болады. Олар ZIF-8-дің кеуекті құрылымын сақтай отырып, көміртектендіруден кейін кеуектік жүйеге (микрокеуектер мен мезокеуектер) және үлкен меншікті бет ауданына ие болады, бұл әртүрлі гидратталған радиустары бар ауыр металл иондары (мысалы, Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup> иондары үшін адсорбция алаңдарының санын арттырады. Олардың адсорбциялық сыйымдылығы көбіне дәстүрлі адсорбенттерге қарағанда бірнеше есе жоғары болады.

Кеуектердің өзара байланысқан құрылымы массаның тасымалдануын жеделдетіп, адсорбция кинетикасының жылдам жүруіне және тепе-теңдікке жету уақытын қысқартуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, ZIF-8-ден сақталған азотты функционалдық топтар және көміртектендіру кезінде түзілген оттекті топтар белгілі бір ауыр металдарға селективтілікті арттыра түседі. Ең маңыздысы, бұл туындылар қышқылдық және сілтілік орталарда бастапқы ZIF-8-ге қарағанда жоғары тұрақтылық танытады; олардың көміртекті құрылымы еру үдерісіне төзімді болып, Zn<sup>2+</sup> бөлінуін азайтады және көп циклді қолдану барысында тиімділігін сақтайды. Осы сипаттамаларына байланысты олар ауыр металдарды қайта қалпына келтіру үшін болашағы бар адсорбенттер болып табылады және өнімділігі арттырылған ZIF-8 композиттеріне жақсы сәйкес келеді (4-кесте). Допингтен кейін алынған ZIF-8-композиттердің адсорбциялық өнімділігі өзгертілмеген материалдармен салыстырғанда ауыр металдарды жою тұрғысынан айтарлықтай артқан. 4-кестеде көрсетілгендей, ZIF-8 қосылғаннан кейінгі композиттердің адсорбциялық қабілеті мен тиімділігі бастапқы, өзгеріссіз адсорбенттерге қарағанда шамамен 2-80 есе жоғары болды, бұл ZIF-8-дің матрицалық материалды айтарлықтай күшейтетініне дәлел. Ең жоғары модификациялық әсер Cu(II) иондарын адсорбциялау кезінде байқалады. ZIF-8 енгізілгеннен кейін әртүрлі субстраттарға негізделген адсорбенттердің әсері күшейеді. Ең жақсы модификация нәтижелері металл материалдарға негізделген астыңғы құрылымдарда байқалады, ал органикалық материалдар үшін де күшейту әсері өте жоғары. Сондықтан жаңа матрицалық материалдарды зерттеу және шикізаттың табиғатын ескере отырып, ZIF-8 допингі арқылы адсорбциялық қасиеттерді әрі қарай оңтайландыру болашақта зерттеуге әлі де лайық бағыт.

**Кесте 4.** Судағы ауыр металдарды кетіруге арналған ZIF-8 негізіндегі адсорбенттердің адсорбциялық қабілеті (Qiaoling Zhou et al., 2025)

Ластаушы	Шикізат	ZIF-8 негізінде	Бастапқы концентрация (мг/л)	pH	Жанасу уақыты	Адсорбциялық қабілет/тиімділік (мг/г)
Cu(II)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ZIF-8	40	5,0	24 сағ	дейін 5,7 / кейін 305
	GO	ZIF-8@GO-7,83%	40	6,0	120 мин	дейін 5 / кейін 380
	CS	CS-ZIF-8-1,2	100	5,0	5 сағ	дейін 16 / кейін 38
	MS	ZIF-8/MS	30	5,0	25 мин	дейін 50 / кейін 140
Pb(II)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ZIF-8	35	5,0	24 сағ	дейін 14,4 / кейін 714,7
	SF	SFZIF-8 (1:15)	100	7,0	12сағ	дейін 75 /кейін 380
	GO	ZIF-8@GO	25	5,0	100 мин	дейін 273 /кейін356
	MMT	ZIF-8/MMT	400	5,0	120 мин	дейін 79 кейін 297
	GO	ZG3	100	5,5	10 мин	дейін 150 /кейін 500
	BC	SA@ZIF-8/BC	200	5,0	90 мин	дейін 126,1/кейін 300,3
	CS	CS-ZIF-8-1,2	100	5,0	120 мин	дейін 23 / кейін 38
	CS	ZIF-8@CS/HAP	200	6,0	50 мин	дейін 98,74 / кейін 291,2
Cr(VI)	MS	ZIF-8/MS	30	5,0	25 мин	дейін 40 / кейін 150
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @PmPD(Z)	200	2,0	14 сағ	дейін 37,5 / кейін 255
	Mg(OH) <sub>2</sub> /GO	ZIF-8/NH <sub>2</sub> /Mg(OH) <sub>2</sub> /GO	10	7,0	60 мин	дейін 1,82 / кейін 4,88
As(V)	PAN	ZIF-8@ZIF-8/PAN-m <sub>3</sub>	20	2,0	90 мин	дейін 10,19 /кейін 39,68
	CL-2	CSL-2	20	5,0	30 мин	дейін 225 / кейін 378
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ZIF-8	50	3,0	24 сағ	76
As(III)	CS	ZIF-8/CS-N	20	6,0	60 мин	39,2
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ZIF-8	27	8,0	4 сағ	100
Ni(II)	FA	ZIF-8/FA	100	5,5	4 сағ	дейін 1,6% / кейін 36,1%
Ni(II)	PAA/PVDF	PAA/ZIF-8/PVDF-0,05	50	5,5	–	дейін 16,54 / кейін 219.09

#### 4. Қорытынды

Бұл шолу мақалада металлорганикалық қаңқа (ZIF-8) синтездеудің бірнеше әдіс-тәсілдері мен оның ағынды суды тазартуға қолданылуы келтірілген. Зерттеу жұмыстарында ZIF-8 синтездеу үшін арнайы үш еріткішті қолданған. Олар: DMF, метанол және су мен аммиак.

Соңғы жылдары металл органикалық қаңқалардың түрлері әр түрлі салада қолданылып келеді. Осыған орай кеуектілігі, адсорбциялық белсенділігі жоғары ZIF-8 синтезделуі, оның әр салада қолданылуына көптеген зерттеушілердің ғылыми қызығушылықтары артқан. Соған қарамастан, ZIF-8 бөлшектерінің топтасуға бейім екендігі, бұл меншікті бет ауданының төмендеуіне әкелетіндігі де ескерілуі қажет. Сондай-ақ ZIF-8 синтездеуде еріткіш таңдауда ерекше назар аударылады. Ластаушы заттар жойылғаннан кейін оларды судан бөліп алу қиын болғандықтан, олардың қайта өңделуі де нашар болатындықтан, ауыр металл иондарын тиімді жою үшін белгілі бір MOF синтездеу үшін қосымша зерттеулерді қажет

етеді. Бұл ағынды суды тазартуда ZIF-8 механизмі мен табиғатын тереңірек түсінуге және инновациялық шешімдерге қолданудың тиімділігін арттыруға жол ашады. Зерттеу жұмыстарын ескере отырып, суды ауыр металдардан тазартатын ZIF-8-тің басқа металлорганикалық қаңқалардан химиялық тұрақтылығы жоғары екенін байқауға болады. Құрылымы имидазолат байланыстырушысының әсерінен ауыр металл иондарына селективтілігі жеткілікті. Бейтарап ортада адсорбция сыйымдылығы 2-3 есе жоғары, шамамен 400-600 мг/г құрайды. Соңғы зерттеулерде ZIF-8-тің Cr(VI) үшін 30 минут ішінде 95% тиімділік көрсететінін, магнитті композиттер ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@ZIF-8$ ) сыртқы өріс арқылы 5 минутта бөлінетінін дәлелдеген.

#### Ұсыныс

Зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып мынадай ұсыныстарды ұсынамыз:

1. Ағынды суларды сирек жер металдарынан және ауыр металдарды сіңіретін жаңа металлорганикалық қаңқалы наноматериалдарды синтездеу бағытында ғылыми зерттеу жұмыстарын жасау. Синтез параметрлерін оңтайландыру, нанокұрылымдар, үздіксіз ағын реакторлары және фотокатализатор-мембрана жүйелері өнеркәсіптік қолдануға жол ашу.

2. ZIF-8 - тің суды ауыр металдардан тазартуға пайдаланудың тиімділігін анықтауда экологиялық таза синтездеу әдістерін жетілдіруде еріткішті тиімді қолдана білу.

3. ZIF-8 композиттерін дамыту үшін магнитті ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@ZIF-8$ ), графитке оксид ( $ZIF-8@GO$ ) және полимерлік ( $ZIF-8@PVA$ ) гибридтерді тиімді қолдану бағытында зерттеуді арттыру.

4. ZIF-8 композиттерін регенерациялауға сұйытылған 0,1 н HCl және EDTA ерітінділерін қолдану материал сіңірімділігін сақтап қалады. Тазартуға ультрадыбыстарды қолдану және магнитпен бөлу тәсілдерін қарастыру

5. Жасыл синтез тәсілдерін арттыруға DMF орнына су + аммиак жүйесін, еріткіш ретінде су: этанол қолдану

6. Адсорбциялық қасиеті бар заттардың басқа функционалдық топтармен топтасумен күресуде ZIF-8 құрылымдарын қолдану, синтездеуде стабилизатор қосу құрылымдық тұрақтылықты арттыру

**5. Қосымша материалдар:** бұл мақала үшін қосымша материалдар жоқ.

#### 6. Авторлық үлестер

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

#### 7. Автор туралы ақпарат

Далабаева, Назгуль – химия ғылымдарының кандидаты, жалпы және бейорганикалық химия кафедрасының аға оқытушысы, химия және химиялық технология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан, 050040; [nazgulds81@gmail.com](mailto:nazgulds81@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1350-5054>

Kostakis, George – тіршілік ғылымы кафедрасының физикалық/бейорганикалық химия бойынша қауымдастырылған профессоры, Сассекс университеті, Ұлыбритания, Фалмер, BN1 9RH; [G.Kostakis@sussex.ac.uk](mailto:G.Kostakis@sussex.ac.uk), <https://orcid.org/0000-0002-4316-4369>

Сарова, Нұрбану - химия ғылымдарының кандидаты, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің қауымдастырылған профессоры, Алматы, Қазақстан, 050000; [n.sarova@abaiuniversity.edu.kz](mailto:n.sarova@abaiuniversity.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-7541-2224>

Сдикова, Гулия - химия ғылымдарының кандидаты, М. Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан Университеті, Орал, Қазақстан, 090000; [sdikova.guliya@mail.ru](mailto:sdikova.guliya@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7949-1521>

Қорғанбаева, Жанар - химия ғылымдарының кандидаты, Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан, 30, Қазыбек би, кеңсе 721, 050000; [korganbaeva.zhan@mail.ru](mailto:korganbaeva.zhan@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8046-9586>

Акылбекова, Турар - химия ғылымдарының кандидаты, Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан, 30, Қазыбек би, кеңсе 721, 050000; [t.akylbekova@abaiuniversity.edu.kz](mailto:t.akylbekova@abaiuniversity.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-6028-6229>

**8. Қаржыландыру:** бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Болашақ Халықаралық бағдарламасындағы «500 Ғалым» жобасы бойынша Ұлыбритания елінде жасалды.

**9. Алғыстар:** біз Сассекс университетінің Тіршілік ғылымы кафедрасының ұжымына шын жүректен алғысымызды білдіргіміз келеді. Бұл жобаны жүзеге асыруда олардың тәжірибесі мен адалдығы маңызды рөл атқарды.

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

## 11. Әдебиеттер тізімі

1. Fayemiwo, O., Daramola, M., & Moothi, K. (2018). Tannin-based adsorbents from green tea for removal of monoaromatic hydrocarbons in water: preliminary investigations. *Chem. Eng. Commun. J*, 174, 310-317. <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1409738>
2. Dutta, R., Mohammad, S. S., Chakrabarti, S., Chaudhuri, B., Bhattacharjee S., & Dutta, B. K. (2010). Unveiling the adsorption mechanism of zeolitic imidazolate framework-8 with high removal efficiency on copper ions from aqueous solutions. *Dalton Trans*, 82, 138-146. <https://doi.org/10.1039/C6DT01827K>
3. Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301-310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
4. Vorosmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289, 284-288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>
5. Vorosmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555-561. <https://doi.org/10.1038/nature09549>
6. Lapworth, D. J., Baran, N., Stuart, M. E., & Ward, R. S. (2012). Emerging organic contaminants in groundwater: a review of sources, fate and occurrence environ. *Pollut*, 163, 287-303. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.034>
7. Liang, W., Wang, B., Cheng, J., Xiao, D., Xie, Z., & Zhao, J. (2021). Preparation of Co/Cr-MOFs for efficient removal of fleroxacin and rhodamine B. *J. Hazard. Mater*, 401, 123718. <https://doi.org/10.1515/gps-2024-0195>
8. Joseph, L., Jun, B. M., Jang, M., Park, C. M., Munoz-Senmache, J. C., Hernandez Maldonado, A. J., Heyden, A., Yu, M., & Yoon, Y. (2019). Removal of contaminants of emerging concern by metal-organic framework nanoadsorbents: a review. *Chem. Eng. J*, 369, 928-946. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.173>

9. Khalil, A., Habib-ur-Rehman, Sh., Muhammad, A., Syed, Sh., Ejaz, H., Hafiza, A., Sajidah, P., & Asif, A. (2021). Effect of metal atom in zeolitic imidazolate frameworks (ZIF-8 & 67) for removal of  $Pb^{2+}$  &  $Hg^{2+}$  from water. *Food and Chemical Toxicology*, 149, 112008. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112008>
10. Ajmal, M., Rao, R. A. K., & Khan, M. (2005). Adsorption of copper from aqueous solution on *Brassica cumpestris* (mustard oil cake). *J. Hazard. Mater.*, 122, 177-183. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.03.029>
11. Larous, S., Meniai, A. H. & Lehocine, M. B. (2005). Experimental study of the removal of copper from aqueous solutions by adsorption using sawdust. *Desalination*, 185, 483-490. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.090>
12. Jia, S., Yang, Z., Yang, W., Zhang, T., Zhang, S., Yang, X., & Dong, Y. (2016). Removal of Cu(II) and tetracycline using an aromatic rings-functionalized chitosan-based flocculant: enhanced interaction between the flocculant and the antibiotic. *Chem. Eng. J.*, 283, 495-503. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.003>
13. Ye, S. J., Zeng, G. M., Hu Zhang, H. P., Liang, C., Dai, J., Liu, Z. F., Xiong, W. P., Wan, J., Xu, P., & Cheng, M. (2017). Co-occurrence and interactions of pollutants, and their impacts on soil remediation - a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 47, 1528-1553. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1386951>
14. Weng, X. L., Lin, S., Zhong, Y. H., & Chen, Z. L. (2013). Chitosan stabilized bimetallic Fe/Ni nanoparticles used to remove mixed contaminants-amoxicillin and Cd(II) from aqueous solutions. *Chem. Eng. J.*, 229, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.096>
15. Chen, Q., Luo, Z., Hills, C., Xue, G., & Tyrer, M. (2009) Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Research*, 43, 10, 2605-2614. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.007>
16. Gharabaghi, M., Irannajad, M., & Azadmehr, A. R. (2012). Selective sulphide precipitation of heavy metals from acidic polymetallic aqueous solution by thioacetamide. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 954-963. <https://doi.org/10.1021/ie201832x>
17. Vilensky, M. Y., Berkowitz, B., & Warshawsky, A. (2002). In situ remediation of groundwater contaminated by heavy- and transition-metal ions by selective ion-exchange methods. *Environ. Sci. Technol.*, 36, 1851-1855. <https://doi.org/10.1021/es010313>
18. Ritchie, S. M. C., Kissick, K. E., Bachas, L. G., Sikdar, S. K., Parikh, C., & Bhattacharyya, D. (2001). Polycysteine and other polyamino acid functionalized microfiltration membranes for heavy metal capture. *Environ. Sci. Technol.*, 35, 3252-3258. <https://doi.org/10.1021/es010617w>
19. Celis, R., Hermosin, M. C., & Cornejo, J. (2000). Heavy metal adsorption by functionalized clays. *Environ. Sci. Technol.*, 34, 4593-4599. <https://doi.org/10.1021/es000013c>
20. Wingenfelder, U., Hansen, C., Furrer, G., & Schulin, R. (2005). Removal of heavy metals from mine waters by natural zeolites. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 4606-4613. <https://doi.org/10.1021/es048482s>
21. Yuvaraja, G., Subbaiah, M. V., & Krishnaiah, A. (2012). *Caesalpinia bonducella* leaf powder as biosorbent for Cu(II) removal from aqueous environment: kinetics and isotherms. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 11218-11225. <https://doi.org/10.1021/ie203039m>
22. Yujie, Zh., Zhiqiang, X., Zhuqing, W., Xuhui, F., Ying, W., & Aiguo, W. (2016). Unveiling the adsorption mechanism of zeolitic imidazolate framework-8 with high efficiency for removal of copper ions from aqueous solutions. *Dalton Trans. The Royal Society of Chemistry*, 45, 12653-12660. <https://doi.org/10.1039/C6DT01827K>
23. Ke Li., Nicholas, M., Lei, Ch., Huang, J., Paulette, S., Desmond, A., David, E., Wencong, X., Guang, Li., & Hai L. (2021). Sustainable application of ZIF-8 for heavy-metal removal in aqueous solutions. *Sustainability*, 13, 984. <https://doi.org/10.3390/su13020984>

24. Wan, N., & Hanafiah, W. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: a review. *Bioresource Technology*, 99, 3935-3948. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.011>
25. Yutian, Zh., Xudong, Zh., Hongliang, H., & Li, Zh. (2015). Selective removal of transition metal ions from aqueous solution by metal-organic frameworks. *Royal Society of Chemistry*, 5(88), 72107-72112. <https://doi.org/10.1039/c5ra09897a>
26. Gavrilescu, M. (2004). Removal of heavy metals from the environment by biosorption. *Eng. Life Sci*, 4, 219-232. <https://doi.org/10.1002/elsc.200420026>
27. Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of Environmental Management*, 92 (3), 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
28. Kim, H. S., Kim, Y. J., & Seo, Y. R. (2015). An overview of carcinogenic heavy metal: molecular toxicity mechanism and prevention. *J. Cancer Prev*, 20, 232-240. <https://doi.org/10.15430/JCP.2015.20.4.232>
29. Mahfuza, F., Md. Marjanul, H., Shamsunnahar, S., Anindita, S., Md. Razzak., & Ruhul, A. (2022). Types and treatment technology of industrial wastewater. *Journal of Chemical, Environmental and Biological Engineering*, 6, 56-69. <https://doi.org/10.11648/j.jcebe.20220602.12>
30. Muhammad, S., Lila, B., Mohd, D., Nur, S., Muhammad, R., Nik, A., Zulfan, A., & Fuad, N. (2020). Integrated membrane–electrocoagulation system for removal of celestine blue dyes in wastewater. *Membranes*, 10(8), 184. <https://doi.org/10.3390/membranes10080184>
31. Asano, T. (2002). The 2001 Stockholm water prize laureate lecture, water science and technology, 45, 23-33. Edition: LD/BI-499-06. Publisher: Technological Centre Gaiker, Zamudio, Spain
32. Wirzal, M. D. H., Mohd, Y. A. R., Zima, J., & Barek, J. (2015). Voltammetric determination of nifedipine at a hanging mercury drop electrode and a mercury meniscus modified silver amalgam electrode. *Int. J. Electrochem. Sci*, 10, 4571-4584. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01243-w>
33. Abo-Farha, S. A., Abdel-Aal, A. Y., Ashour, I. A., & Garamon, S. E. (2009). Removal of some heavy metal cations by synthetic resin purolite C100. *Journal of Hazardous Materials*, 169 (1–3), 190-194. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.086>
34. Bakhtiari, N., & Azizian, S. (2015) Adsorption of copper ion from aqueous solution by nanoporous MOF-5: a kinetic and equilibrium study. *Journal of Molecular Liquids*, 206, 114-118. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.02.009>
35. Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2004). Cr(VI) removal from synthetic wastewater using coconut shell charcoal and commercial activated carbon modified with oxidizing agents and/or chitosan. *Chemosphere*, 54, 951–967. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.001>
36. Wan N. W. S., & Hanafiah, M. A. K. M. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: a review. *Bioresource Technology*, 99, 3935-3948. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.011>
37. Al-Saydeh, S. A., El-Naas, M. H., & Zaidi, S. J. (2017). Copper removal from industrial wastewater: A comprehensive review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 56, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.07.026>
38. Gnanaselvan, G., Sasikumar, B., Gangasalam, A., & Diganta, B. (2019). Removal of hazardous material from wastewater by using metal organic framework (MOF) embedded polymeric membranes. *Separation science and technology*, 54, 3, 434-446. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1508232>
39. Simin, F., Xiaoli, Zh., Dunnyun, Sh., & Zheng, W. (2021). Zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) for drug delivery: a critical review. *Chem. Sci. Eng*, 15(2), 221-237. <https://doi.org/10.1007/s11705-020-1927-8>

40. Park, K. S., Ni, Z., Cote, A. P., Yong, J., Huang, R., Uribe-Romo, F. J., Chae, H. K., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2006). Exceptional chemical and thermal stability of zeolitic imidazolate frameworks. *PNAS*, 103(27), 10186-10191. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602439103>
41. Lu, G., & Hupp, J. T. (2010). Metal-organic frameworks as sensors: a ZIF-8 based fabry-perot device as a selective sensor for chemical vapors and gases. *J. Am. Chem. Soc.*, 132(23), 7832-3. <https://doi.org/10.1021/ja101415b>
42. Vasconcelos, I. B., Da Silva, T. G., Militao, G. C. G., Soares, T. A., Rodrigues, N. M., Rodrigues, M. O., Da Costa, N. B., Freire, R. O., & Junior, S. A. (2012). Cytotoxicity and slow release of the anti-cancer drugdoxorubicin from ZIF-8. *RSC Adv*, 2, 9437-9442. <https://doi.org/10.1039/C2RA21087H>
43. Peralta, D., Chaplais, G., Simon-Masseron, A., Barthelet, K., Chizallet, C., Quoineaud, A. A., & Pirngruber, G. D. (2012). Comparison of the behavior of metal-organic frameworks and zeolites for hydrocarbon separations. *J. Am. Chem. Soc.*, 134, 8115-8126. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja211864w>
44. Chizallet, C., Lazare, S., Bazer-Bachi, D., & Bonnier, F. (2010). Catalysis of transesterification by a nonfunctionalized metal-organic framework: acido-basicity at the external surface of ZIF-8 probed by FTIR and ab initio calculations. *J. Am. Chem. Soc.*, 132 (35), 12365-12377. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja103365s>
45. Nguyen, L. T. L., Le, K. K. A., Phan, N. T. S., & Chin, A. (2012). Zeolite imidazolate framework ZIF-8 catalyst for friedel-crafts acylation. *J. Catal*, 33, 688-696. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(11\)60368-9](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(11)60368-9)
46. Tran, U. P. N., Le, K. K. A., & Phan, N. T. S. (2011). Expanding applications of metal-organic frameworks: zeolite imidazolate framework ZIF-8 as an efficient heterogeneous catalyst for the knoevenagel reaction. *ACS Catal*, 1, 120-127. <https://doi.org/10.1021/cs1000625>
47. Zhao, X.-J., Fang, X.-L., Wu, B.-H., Zheng, L.-S., & Zheng, N.-F. (2014). Facile synthesis of size-tunable ZIF-8 nanocrystals using reverse micelles as nanoreactors. *Sci. China Chem*, 57, 141-146. <https://doi.org/10.1007/s11426-013-5008-4>
48. Farrusseng, D. (2011). Metal-organic frameworks: applications from catalysis to gas storage, Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527635856>
49. Venna, S. R., Jasinski, J. B., & Carreon, M. A. (2010). Structural evolution of zeolitic imidazolate framework-8. *J. Am. Chem. Soc.*, 132, 18030-18033. <https://doi.org/10.1021/ja109268m>
50. Cravillon, J., Nayuk, R., Springer, S., Feldhoff, A., Huber, K., & Wiebcke, M. (2011). Controlling zeolitic imidazolate framework nano- and microcrystal formation: insight into crystal growth by time-resolved *in situ* static light scattering. *Chem. Mater*, 23, 2130-2141. <https://doi.org/10.1021/cm103571y>
51. Meipeng, J., Bao, L., Ruiping, L., Jiuhui, Q., Huanting, W., & Xiwang, Zh. (2015). Water-based synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 with high morphology level at room temperature. *RSC Advances*, 5(60). <https://doi.org/10.1039/C5RA04033G>
52. Yao, J., He, M., Wang, K., Chen, R., Zhong, Z., & Wang, H. (2013). High-yield synthesis of zeolitic imidazolate frameworks from stoichiometric metal and ligand precursor aqueous solutions at room temperature. *Cryst Eng Comm*, 15, 3601-3606. <https://doi.org/10.1039/C3CE27093A>
53. Cho, H.-Y., Kim, J., Kim, S.-N., & Ahn, W.-S. (2013). High yield 1-L scale synthesis of ZIF-8 via a sonochemical route. *Microporous Mesoporous Mater*, 169, 180-184. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.11.012>
54. Gross, A., Sherman, E., & Vajo, J. (2012). Aqueous room temperature synthesis of cobalt and zinc sodalite zeolitic imidizolate frameworks. *Dalton Trans*, 41, 5458-5460. <https://doi.org/10.1039/c2dt30174a>
55. Pan, Y., Liu, Y., Zeng, G., Zhao, L., & Lai, Z. (2011). Rapid synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) nanocrystals in an aqueous system. *Chem. Commun.*, 47, 2071-2073. <https://doi.org/10.1039/c0cc05002d>

56. Marquez, A. G., Horcajada, P., Grosso, D., Ferey, G., Serre, C., Sanchez, C., & Boissiere, C. (2013). Green scalable aerosol synthesis of porous metal–organic frameworks. *Chem. Commun*, 49, 3848-3850. <https://doi.org/10.1039/c3cc39191d>
57. Wu, C. S., Xiong, Z. H., Li, C., & Zhang, J. M. (2015). Zeolitic imidazolate metal organic framework ZIF-8 with ultra-high adsorption capacity bound tetracycline in aqueous solution. *RSC Adv*, 5, 82127–82137. <https://doi.org/10.1039/c5ra15497a>
58. Omar, K., & Joseph, T. (2010). Rational design, synthesis, purification, and activation of metal-organic framework materials. *Accounts of Chemical Research*, 43(8), 1166-1175. <https://doi.org/10.1021/ar1000617>
59. Yu-Ri, L., Min-Seok, J., Hye-Young, Ch., Hee Jin, K., Sangho, K., & Wha-Seung, A. (2015). ZIF-8: a comparison of synthesis methods. *Chemical Engineering Journal*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.094>
60. Christian, D., Raffaele, R., Kang, L., Darren, B., & Paolo, F. (2017). Metal–organic frameworks at the biointerface: synthetic strategies and applications. *American Chemical Society*, 50(6), 1423-1432. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.accounts.7b00090>
61. Nilay, K., Berna, T., Levent, Y., & Halil, K. (2014). Synthesis of ZIF-8 from recycled mother liquors. *Microporous Mesoporous Mater*, 198, 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.07.052>
62. Li, Y. S., Liang, F. Y., Bux, H., Feldhoff, A., Yang, W. S., & Caro, J. (2010). Molecular sieve membrane: supported metal-organic framework with high hydrogen selectivity. *Angew. Chem. - Int. Ed*, 49, 548-551. <https://doi.org/10.1002/ange.200905645>
63. Zhou, H. C., Long, J. R., & Yaghi, O. M. (2012). Introduction to metal-organic frameworks. *Chem. Rev*, 112, 673. <https://doi.org/10.1021/cr300014x>
64. Park, K. S., Ni, Z., Côté, A. P., Choi, J. Y., Huang, R., Uribe-Romo, F. J., Chae, H. K., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2006). Exceptional chemical and thermal stability of zeolitic imidazolate frameworks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 103, 10186-10191. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602439103>
65. Kida, K., Okita, M., Fujita, K., Tanaka, S., & Miyake, Y. (2013). Formation of high crystalline ZIF-8 in an aqueous solution. *Cryst Eng Comm*, 15, 1794. <https://doi.org/10.1039/C2CE26847G>
66. Lin, W., Rieter, W. J., & Taylor, K. M. L. (2009). Modular synthesis of functional nanoscale coordination polymers. *Angew Chem, Int Ed*, 48, 650-658. <https://doi.org/10.1002/ange.200803387>
67. Aya, T., Mohamed, A., Ezzat, A., Abdalla, El., & Fatma, M. (2025). Effective removal of heavy metal ions (Pb, Cu, and Cd) from contaminated water by limestone mine wastes. *Sci Rep*, 15, 1680. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82861-2>
68. Junfeng, Q., Fuan, S., & Lizhen, Q. (2012). Hydrothermal synthesis of zeolitic imidazolate framework-67 (ZIF-67) nanocrystals. *Mater Lett*, 82, 220-223. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.05.077>
69. Yao, J., He, M., & Wang, H. (2015). Strategies for controlling crystal structure and reducing usage of organic ligand and solvents in the synthesis of zeolitic imidazolate frameworks. *Cryst Eng Comm*, 17, 4970-4976. <https://doi.org/10.1039/C5CE00663E>
70. Lee, Yu-Ri., Min-Seok, J., Hye-Young, Ch., Hee-Jin, K., Sangho, Kim., & Wha-Seung, A. (2015) ZIF-8: a comparison of synthesis methods. *Chemical Engineering Journal*, 271, 276-280. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.094>
71. Kida, K., Okita, M., Fujita, K., Tanaka, S., & Miyake, Y. (2013). Formation of high crystalline ZIF-8 in an aqueous solution. *Cryst Eng Comm*, 15(9), 1794. <https://doi.org/10.1039/C2CE26847G>
72. Huang, X. C., Lin, Y. Y., Zhang, J. P., & Chen, X. M. (2006). Ligand-directed strategy for zeolite-type metal-organic frameworks: zinc(II) imidazolates with unusual zeolitic topologies. *Angewandte Chemie International Edition*, 45(10), 1557-1559. <https://doi.org/10.1002/anie.200503778>

73. Zhang, J. P., Zhu, A. X., Lin, R. B., Qi, X. L., & Chen, X. M. (2011). Pore surface tailored sod-type metal-organic zeolites. *Advanced Materials*, 23(10), 1268-1271. <https://doi.org/10.1002/adma.201004028>
74. Zhu, A. X., Lin, R. B., Qi, X. L., Liu, Y., Lin, Y.Y., Zhang, J. P., & Chen, X. M. (2012). Zeolitic metal azolate frameworks (MAFs) from ZnO/Zn(OH)<sub>2</sub> and monoalkyl-substituted imidazoles and 1,2,4-triazoles: efficient syntheses and properties. *Microporous and Mesoporous Materials*, 157, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.11.033>
75. Cravillon, J., Münzer, S., Lohmeier, S.J., Feldhoff, A., Huber, K., & Wiebcke, M. (2014). Rapid room-temperature synthesis and characterization of nanocrystals of a prototypical zeolitic imidazolate framework. *Chem. Commun*, 50, 13260. <https://doi.org/10.1039/C4CC06491G>
76. Cravillon, J., Nayuk, R., Springer, S., Feldhoff, A., Huber, K., & Wiebcke, M. (2011). Controlling zeolitic imidazolate framework nano- and microcrystal formation: Insight into crystal growth by time-resolved in situ static light scattering. *Chemistry of Materials*, 23(8), 2130-2141. <https://doi.org/10.1021/cm103571y>
77. Cravillon, J., Schröder, C. A., Bux, H., Rothkirch, A., Caro, J., & Wiebcke, M. (2012). Formate modulated solvothermal synthesis of ZIF-8 investigated using time-resolved in situ X-ray diffraction and scanning electron microscopy. *Cryst Eng Comm*, 14(2), 492-498. <https://doi.org/10.1039/C1CE06002C>
78. Bennett, T. D., Saines, P. J., Keen, D. A., Tan, J. C., & Cheetham, A. (2013). Ballmilling-induced amorphization of zeolitic imidazolate frameworks (ZIFs) for the irreversible trapping of iodine. *Chemistry (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)*, 19(22), 7049-7055. <https://doi.org/10.1002/chem.201300216>
79. Nune, S. K., Thallapally, P. K., Dohnalkova, A., Wang, C., Liu, J., & Exarhos, G. J. (2010). Synthesis and properties of nano zeolitic imidazolate frameworks. *Chemical Communications*, 46(27), 4878-4880. <https://doi.org/10.1039/c002088e>
80. He, M., Yao, J., Li, L., Wang, K., Chen, F., & Wang, H. (2013). Synthesis of zeolitic imidazolate framework-7 in a water/ethanol mixture and its ethanol-induced reversible phase transition. *ChemPlusChem*, 78(10), 1222-1225. <https://doi.org/10.1002/cplu.201300193>
81. Shen, K., Zhang, L., Chen, X., Liu, L., Zhang, D., Han, Y., Chen, J., Long, J., Luque, R., Li, Y., & Chen, B. (2018). Ordered macro-microporous metalorganic framework single crystals. *Science*, 359(6372), 206-210. <https://doi.org/10.1126/science.aao3403>
82. Hu, L., Yan, Z., Zhang, J., Peng, X., Mo, X., Wang, A., & Chen, L. (2019). Surfactant aggregates within deep eutectic solvent-assisted synthesis of hierarchical ZIF-8 with tunable porosity and enhanced catalytic activity. *Journal of Materials Science*, 54(16), 11009-11023. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03644-z>
83. Chen, Y., & Tang, S. (2019). Solvothermal synthesis of porous hydrangea-like zeolitic imidazole framework-8 (ZIF-8) crystals. *Journal of Solid State Chemistry*, 85, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.04.034>
84. Troyano, J., Carne-Sanchez, A., Avci, C., Imaz, I., & Maspocho, D. (2019). Colloidal metal-organic framework particles: The pioneering case of ZIF-8. *Chemical Society Reviews*, 48(23), 5534–5546. <https://doi.org/10.1039/C9CS00472F>
85. Pan, Y., Liu, Y., Zeng, G., Zhao, L., & Lai, Z. Rapid synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) nanocrystals in an aqueous system. (2011). *Chemical Communications*, 47(7), 2071-2073. <https://doi.org/10.1039/c0cc05002d>
86. Tanaka, S., Kida, K., Okita, M., Ito, Y., & Miyake, Y. (2012). Size-controlled synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) crystals in an aqueous system at room temperature. *Chemistry Letters*, 41(10), 1337-1339. <https://doi.org/10.1246/cl.2012.1337>
87. Yao, J., He, M., Wang, K., Chen, R., Zhong, Z., & Wang, H. (2013). High-yield synthesis of zeolitic imidazolate frameworks from stoichiometric metal and ligand precursor aqueous solutions at room temperature. *Cryst Eng Comm*, 15(18), 3601. <https://doi.org/10.1039/C3CE27093A>

88. He, M., Yao, J., Liu, Q., Wang, K., Chen, F., & Wang, H. (2014). Facile synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 from a concentrated aqueous solution. *Microporous and Mesoporous Materials*, 184, 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.10.003>
89. Seoane, B., Zamaro, J. M., Tellez, C., & Coronas, J. (2012). Sonocrystallization of zeolitic imidazolate frameworks (ZIF-7, ZIF-8, ZIF-11 and ZIF-20). *Cryst Eng Comm*, 14(9), 3103. <https://doi.org/10.1039/C2CE06382D>
90. Cho, H. Y., Kim, J., Kim, S. N., & Ahn, W. S. (2013). High yield 1-L scale synthesis of ZIF-8 via a sonochemical route. *Microporous and Mesoporous Materials*, 169, 180-184. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.11.012>
91. Suslick, K. S., Hammerton, D. A., & Cline, R. E. (1986). Sonochemical hot spot. *Journal of the American Chemical Society*, 108(18), 5641-5642. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja00278a055>
92. Son, W. J., Kim, J., Kim, J., & Ahn, W. S. (2008). Sonochemical synthesis of MOF-5. *Chemical Communications*, (47), 6336–6338. <https://doi.org/10.1039/b814740j>
93. Schlesinger, M., Schulze, S., Hietschold, M., & Mehring, M. (2010). Evaluation of synthetic methods for microporous metal-organic frameworks exemplified by the competitive formation of [Cu<sub>2</sub>(btc)<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>3</sub>]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 132(1-2), 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.02.008>
94. Fernández-Bertrán, J. F., Hernández, M. P., Reguera, E., Yee-Madeira, H., Rodriguez, J., Paneque, A., & Llopiz, J. C. (2006). Characterization of mechanochemically synthesized imidazolates of Ag<sup>+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, and Hg<sup>2+</sup>: solid state reactivity of cations. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 67(8), 1612-1617. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2006.02.006>
95. Adams, C. J., Colquhoun, H. M., Crawford, P. C., Lusi, M., & Orpen, A. G. (2007). Solid-state interconversions of coordination networks and hydrogen-bonded salts. *Angewandte Chemie International Edition*, 119(7), 1142–1146. <https://doi.org/10.1002/anie.200603593>
96. Beldon, P. J., Fabian, L., Stein, R. S., Thirumurugan, A., Cheetham, A. K., & Friscic, T. (2010). Rapid room-temperature synthesis of zeolitic imidazolate frameworks by using mechanochemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(50), 9640-9643. <https://doi.org/10.1002/anie.201005547>
97. Braga, D., Curzi, M., Johansson, A., Polito, M., Rubini, K., & Grepioni, F. (2006). Simple and quantitative mechanochemical preparation of a porous crystalline material based on a 1D coordination network for uptake of small molecules. *Angewandte Chemie International Edition*, 45(1), 142-146. <https://doi.org/10.1002/anie.200502597>
98. Friscic, T., Reid, D. G., Halasz, I., Stein, R. S., Dinnebier, R. E., & Duer, M. J. (2010). Ion- and liquid-assisted grinding: Improved mechanochemical synthesis of metal-organic frameworks reveals salt inclusion and anion templating. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(4), 712-715. <https://doi.org/10.1002/anie.200906583>
99. Tanaka, S., Kida, K., Nagaoka, T., Ota, T., & Miyake, Y. (2013). Mechanochemical dry conversion of zinc oxide to zeolitic imidazolate framework. *Chemical Communications*, 49(72), 7884-7886. <https://doi.org/10.1039/c3cc43028f>
100. Qiaoling, Zh., Tian, Yu., Rongkang, Y., Xin, G., & Yao, Ch. (2025). ZIF-8 and its derivative adsorbents for heavy metal removal in water: a review. *ACS Omega*, 10, 47790-47801. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c05692>
101. Ahmad, K., Shah, H.-U.-R., Ashfaq, M., Shah, S. S. A., Hussain, E., Naseem, H. A., Parveen, S., & Ayub, A. (2021). Effect of metal atom in zeolitic imidazolate frameworks (ZIF-8 & 67) for removal of Pb<sup>2+</sup> & Hg<sup>2+</sup> from water. *Food Chem. Toxicol*, 149, 112008. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112008>
102. Li, R., Li, W., Jin, C., He, Q., & Wang, Y. (2020). Fabrication of ZIF-8@TiO<sub>2</sub> micron composite via hydrothermal method with enhanced absorption and photocatalytic activities in tetracycline degradation. *J. Alloys Compd*, 825, 154008. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154008>

103. Nalesso, S., Varlet, G., Bussemaker, M. J., Sear, R. P., Hodnett, M., Monteagudo-Olivan, R., Sebastian, V., Coronas, J., & Lee, J. (2021). Sonocrystallisation of ZIF-8 in water with high excess of ligand: effects of frequency, power and sonication time. *Ultrason. Sonochem*, 76, 105616. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105616>
104. Głowniak, S., Szczeńniak, B., Choma, J., & Jaroniec, M. (2021). Mechanochemistry: toward green synthesis of metal-organic frameworks. *Mater. Today*, 46, 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.01.008>
105. Hong, Y., Liao, W., Yan, Z., Bai, Y., Feng, C., Xu, Z., Xu, D., & Lim, K. (2020). Progress in the research of the toxicity effect mechanisms of heavy metals on freshwater organisms and their water quality criteria in China, *J. Chem.-NY*. <https://doi.org/10.1155/2020/9010348>
106. Baby, J., Raj, J. S., Biby, E. T., Sankarganesh, J., Jeevitha, M. V, Ajisha, S. U. & Rajan, S. S. (2010). Toxic effect of heavy metals on aquatic environment. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 4(4), 939-952. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v4i4.62976>
107. Gaetke, L. M., & Chow, C. K. (2003). Copper toxicity, oxidative stress, and antioxidant nutrients. *Toxicology*, 189, 147-163. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(03\)00159-8](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(03)00159-8)
108. Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6, 4691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
109. Zeitoun, M. M., & Mehana, E. E. (2014). Impact of water pollution with heavy metals on fish health: overview and updates. *Global Veterinaria*, 12, 219-231. <https://doi.org/10.5829/idosi.gv.2014.12.02.82219>
110. Li, Z., Wang, L., Qin, L., Lai, C., Wang, Z., Zhou, M., Xiao, L., Liu, S., & Zhang, M. (2021). Recent advances in the application of water-stable metal-organic frameworks: adsorption and photocatalytic reduction of heavy metal in water. *Chemosphere*, 285, 131432. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131432>
111. Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *J. Environ. Manage*, 92, 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
112. Arbabi, M. N., & Golshani, N. (2016). Removal of copper ions Cu(II) from industrial wastewater: a review of removal methods. *Int. J. Epidemiol. Res*, 3, 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.07.026>
113. Azimi, A., Azari, A., Rezakazemi, M., & Ansarpour, M. (2017). Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. *Chem Bio Eng Rev*, 37-59. <https://doi.org/10.1002/cben.201600010>
114. Qasem, N. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *Clean Water*, 4, 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
115. Ahmed H. Algureiri Yossor Abdulmajeed (2016). Removal of heavy metals from industrial wastewater by using ro membrane. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 17(4), 125-136. <https://doi.org/10.31699/IJCPE.2016.4.12>
116. Lei, C., Gao, J., Ren, W., Xie, Y., Abdalkarim, S. Y. H., Wang, S., Ni, Q., & Yao, J. (2019). Fabrication of metal-organic frameworks@ cellulose aerogels composite materials for removal of heavy metal ions in water. *Carbohydr. Polym*, 205, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.029>
117. Aklil, A., Mouflih, M., & Sebti, S. (2004). Removal of heavy metal ions from water by using calcined phosphate as a new adsorbent. *J. Hazard. Mater*, 112, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.05.018>
118. Orolínova, Z., Mockovčiakov, A., & Škvarla, J. (2010). Sorption of cadmium(II) from aqueous solution by magnetic clay composite. *Desalin Water Treat*, 24, 284-292. <https://doi.org/10.13189/eee.2013.010206>
118. Naat, J. N., Neolaka, Y. A., Lapailaka, T., Tj, R. T., Sabarudin, A., Darmokoesoemo, H., & Kusuma, H. S. (2021). Adsorption of Cu(II) and Pb(II) using silica@ mercapto (hs@m)

- hybrid adsorbent synthesized from silica of Takari sand: optimization of parameters and kinetics. *Rasayan J. Chem*, 14, 550-560. <https://doi.org/10.31788/RJC.2021.1415803>
120. Mo, Z., Tai, D., Zhang, H., & Shahab, A. (2022). A comprehensive review on the adsorption of heavy metals by zeolite imidazole framework (ZIF-8) based nanocomposite in water. *Chem. Eng. J*, 136320. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136320>
121. Qu, H., Huang, L., Han, Z., Wang, Y., Zhang, Z., Wang, Y., Chang, Q., Wei, N., Kipper, M. J., & Tang, J. (2021). A review of graphene-oxide/metal-organic framework composites materials: characteristics, preparation and applications. *J. Porous Mat*, 28, 1837-1865. <https://doi.org/10.1007/s10934-021-01125-w>
122. Wang, Q., Sun, Y., Li, S., Zhang, P., & Yao, Q. (2020). Synthesis and modification of ZIF-8 and its application in drug delivery and tumor therapy. *RSC Adv*, 10, 37600-37620. <https://doi.org/10.1039/D0RA07950B>
123. Yang, H., Wang, N., Wang, L., Liu, H., An, Q., & Ji, S. (2018). Vacuum-assisted assembly of ZIF-8@GO composite membranes on ceramic tube with enhanced organic solvent nanofiltration performance. *J. Membrane Sci.*, 545, 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.09.074>
124. Li, D., & Xu, F. (2021). Removal of Cu (II) from aqueous solutions using ZIF-8@GO composites. *J. Solid State Chem.*, 302, 122406. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122406>
125. Chen, B., Wan, C., Kang, X., Chen, M., Zhang, C., Bai, Y., & Dong, L. (2019). Enhanced CO<sub>2</sub> separation of mixed matrix membranes with ZIF-8@GO composites as fillers: effect of reaction time of ZIF-8@GO. *Sep. Purif. Technol.*, 223, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.04.063>

## Synthesis of metal-organic framework (ZIF-8) and application in wastewater treatment: review

Nazgul Dalabayeva, George Kostakis, Nurbanu Sarova, Gulyia Sdikova, Zhanar Korganbayeva, Turar Akylbekova

**Abstract:** Environmental pollution with heavy metal ions is increasing year after year due to the rapid growth of industry and agriculture. Heavy metals are a major concern due to their extreme toxicity to humans and their detrimental impact on the environment and ecosystems. The effective removal of heavy metal ions from wastewater is a critical necessity, driven by strict environmental regulations and the potential for resource recovery (metal value) in industrial contexts.

The development of advanced materials is key to overcoming the limitations (such as sludge generation, low efficiency at low concentrations, and high cost) of traditional heavy metal removal methods like chemical precipitation. Metal-Organic Frameworks (MOFs) have emerged as a paradigm-shifting class of materials for the adsorption of heavy metal ions from wastewater. Their unique structural and chemical properties directly address the limitations of traditional adsorbents. This article presents various methods for the synthesis of the zeolite framework of imidazole-8 (ZIF-8), consisting of one type of MOF material - from atoms of metallic zinc and 2-methylimidazole, as well as their characteristics. It is also believed that (ZIF-8) is a well-known wastewater treatment material with high adsorption capacity and unique properties for photocatalytic materials. In addition, recent advances in the use, synthesis and other applications of MOF for the effective removal of heavy metals from water were discussed.

**Keywords:** metal-organic frameworks (MOF); ZIF-8; heavy metal removal; water purification; pollution.

## **Синтез металлоорганического каркаса (ZIF-8) и применение для очистки сточных вод: обзор**

**Назгуль Далабаева, George Kostakis, Нурбану Сарова, Гулия Сдикова, Жанар Корманбаева, Турар Акылбекова**

**Аннотация.** В связи с интенсивным ростом промышленности и сельского хозяйства из года в год усиливается загрязнение окружающей среды ионами тяжелых металлов. Тяжелые металлы чрезвычайно опасны для человека и оказывают пагубное воздействие на окружающую среду и экосистемы. Удаление ионов тяжелых металлов из сточных вод является неотложной задачей, требующей значительного внимания как с экологической, так и с коммерческой точки зрения. Для решения таких проблем, как повышение экономической эффективности, масштабируемость, удаление нескольких металлов, возможность повторного использования и т. д., разрабатываются передовые материалы, которые призваны заменить традиционные методы очистки воды или внедрить современные технологии. Для решения этих проблем особое значение имеют металлоорганические каркасы (MOF), являющиеся новым типом трехмерных органическо-неорганических гибридов, особенно в области адсорбции. В данной статье представлены различные методы синтеза цеолитового каркаса имидазола-8 (ZIF-8), состоящего из одного вида материала MOF - из атомов металлического цинка и 2-метилимидазола, а также их характеристики. Также считается, что (ZIF-8) является хорошо известным материалом для очистки сточных вод, обладающим высокой адсорбционной способностью и уникальными свойствами для фотокаталитических материалов. Кроме того, были обсуждены последние достижения в области использования, синтеза и другие применения MOF для эффективного удаления тяжелых металлов из воды.

**Ключевые слова:** металлоорганические каркасы (MOF); ZIF-8; удаление тяжелых металлов; очистка воды, загрязнение.

# Колориметрическое определение 1-нафтола на полиметакрилатном сенсоре

Бато Митупов<sup>1</sup>, Дарья Кузнецова<sup>2</sup>, Никита Кожемякин<sup>1</sup>, Олег Роор<sup>3</sup>, Александр Стукалов<sup>4</sup>, Михаил Гавриленко<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация; [bcm1@tpu.ru](mailto:bcm1@tpu.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация; [dce@mail.tsu.ru](mailto:dce@mail.tsu.ru)

<sup>3</sup>Сургутский государственный университет, Сургут, Российская Федерация; [olg\\_roor@mail.ru](mailto:olg_roor@mail.ru)

<sup>4</sup>Алтайский государственный университет, Барнаул, Российская Федерация; [stukalov.62021@asu.ru](mailto:stukalov.62021@asu.ru)

\*Корреспонденция: [dce@mail.ru](mailto:dce@mail.ru)

**Цитирование:** Митупов, Б., Кузнецова, Д., Кожемякин, Н., Роор, О., Стукалов, А., Гавриленко, М. (2026).

Колориметрическое определение 1-нафтола на полиметакрилатном сенсоре. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География, 154(1), 60-74. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-60-74>

Академический редактор: Э.Е. Копишев

Поступила: 10.01.2026

Исправлена: 09.02.2026

Принята: 04.03.2026

Опубликована: 31.03.2026



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

**Аннотация.** Разработан способ внелабораторного определения продукта деструкции карбаматных пестицидов с использованием колориметрического полиметакрилатного сенсора, что обеспечивает портативность и оперативность анализа. 1-нафтол экстрагируют в объем сенсора с последующим колориметрическим определением его количества по цифровому изображению. Цифровые изображения сенсора преобразуют в красные, зеленые и синие (RGB) каналы цветовых координат с помощью смартфона, затем используют алгоритм обработки цветного изображения, который вычисляет среднее значение  $\Delta E$  цветовых координат RGB. Экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования полиметакрилатной матрицы в качестве аналитической среды для тест-систем и цифровой колориметрии при определении 1-нафтола. Показано, что модифицированные полимерные прозрачные сенсоры размером 4,0×4,0 мм обеспечивают оптимальное сочетание экстракционной способности и оптических характеристик. Способ использования ПММ показал достаточную для большинства определений чувствительность с пределом обнаружения 0,1 мг/кг и линейным диапазоном 0,5–8,0 мг/кг для визуального определения и 0,2–16,0 мг/кг для цифрового колориметрического определения.

**Ключевые слова:** полиметакрилатная матрица; 1-нафтол; колориметрия; твердофазная экстракция; диазотирование

## 1. Введение

Использование пестицидов существенно расширяется одновременно с повышением качества сельскохозяйственной продукции; тем не менее, токсичность пестицидов и их остатков остается серьезной проблемой. Карбаматные пестициды (КП) широко используются для борьбы с вредителями в сельском хозяйстве, являются одними из самых токсичных пестицидов и относятся к I классу опасности для человека (Gupta, 2014; WHO, 2009). КП запрещены в Европейском союзе, США и Канаде, в России

действующее вещество разрешено только для обработки семян на специализированных предприятиях (Dias et al., 2015; Sahana et al., 2018). Однако, в ряде стран Центральной Азии и Юго-Восточной Азии которые являются экспортерами больших объемов сельскохозяйственной продукции, КП продолжают использовать. При невозможности отказа от них, актуальным является внелабораторный мониторинг остаточных концентраций пестицидов в продуктах питания. Исследования показали, что КП имеют умеренно длительный период полураспада в почве, их миграция в почве загрязняет грунтовые воды (Sharma et al., 2015). Кислотность почвы является одним из основных факторов, определяющих стойкость пестицидов, которые более стабильны в кислых почвах, чем в нейтральных или щелочных почвах (Kunpatee et al., 2022; Samsidar et al., 2018). Продукты деструкции могут загрязнять водные ресурсы, такие как пруды, озера, бассейны, реки, ручьи и питьевые грунтовые воды (Bazrafshan et al., 2017; ALothman et al., 2022; Bordbar et al., 2020). Следовательно, поступление продуктов трансформации КП в организм человека может быть не только при их наличии в сельскохозяйственных продуктах (AlFaris et al., 2020; Rahmani et al., 2018; Chowdhury et al., 2013), но также и в почвах и водах.

Для обнаружения остатков КП, основным из которых является 1-нафтол, используют лабораторные методы, например, газовую хроматографию (Cavaliere et al., 2012; Deng et al., 2022), ВЭЖХ (Fiori et al., 2024; Habila et al., 2022) с тандемным масс-спектрометрическим детектором (Huang et al., 2019; Hashemi et al., 2019; Ahn et al., 2021). Хроматографические методы являются селективными и надежными, но с разработкой новых чувствительных сенсорных материалов также стали обширно применять электрохимические и оптические сенсорные системы (Kunpatee et al., 2023; Liu et al., 2012; Moraes et al., 2009; Khosropour et al., 2025).

Спектроскопические методы также применяют для определения 1-нафтола и включают в себя спектрофотометрию (Ahmadi et al., 2024; Peng et al., 2022), колориметрию (Lee et al., 2018; Jing et al., 2021; Lee et al., 2024), флуориметрию (Bordbar et al., 2020; Bvargavi et al., 2006; Shahdost-fard et al., 2021) и рамановскую спектроскопию (Adhikari et al., 2024; Joshi et al., 2023). Эти методы имеют ряд ограничений, включая сложную подготовку образцов, необходимость лабораторного оборудования и трудности внелабораторного использования (Armenta et al., 2008). Колориметрический сенсор является актуальным внелабораторным решением для преодоления этих ограничений, которое обладает простотой, портативностью и удобством использования. Аналиты могут быть обнаружены по изменению цвета сенсора, возникающему в результате химических реакций между специфическим реагентом и целевыми аналитами (Lee et al., 2024). Определение спектрофотометрическим методом зачастую проводят, связывая 1-нафтол в окрашенный комплекс. Например, в работе (Dhahir et al., 2015) использовали *p*-аминофенол в качестве реагента, который соединяется с 1-нафтолом в щелочной среде карбоната натрия для получения окрашенных в синий цвет комплексов с максимумом поглощения при 637 нм. Результаты также можно наблюдать невооруженным глазом, что облегчает внелабораторные измерения. Таким образом, этот метод становится интересным для скрининга остатков пестицидов в фруктах (Huang et al., 2019).

Основной проблемой является небольшая растворимость КП <1 % в воде и необходимость гидролиза для полного перевода аналита в анализируемый раствор. Вследствие этого существующие процедуры экстракции предполагают использование органических растворителей, таких как метанол (Khosropour et al., 2025), этанол (Soltani-Shahrivar et al., 2019), ацетонитрил (Soulis et al., 2020). Например, в работе (Suk-in et al., 2024) определение карбаматного пестицида по 1-нафтолу включало экстракцию из образцов сельскохозяйственных продуктов, оставляя сначала в хлороформе на сутки, после чего удаляли хлороформ роторным испарителем и добавляли этанол для повторной экстракции. Вследствие использования токсичных органических растворителей, реагентов и образования опасных отходов, эти методы не включены в направление «зеленой химии», поскольку это противоречит рекомендациям по экологически чистой аналитической химии (Chemat et al., 2019).

В настоящее время предложены альтернативные методы, в основном ориентированные на миниатюризацию экстракционной системы и твердофазную экстракцию (ТФЭ).

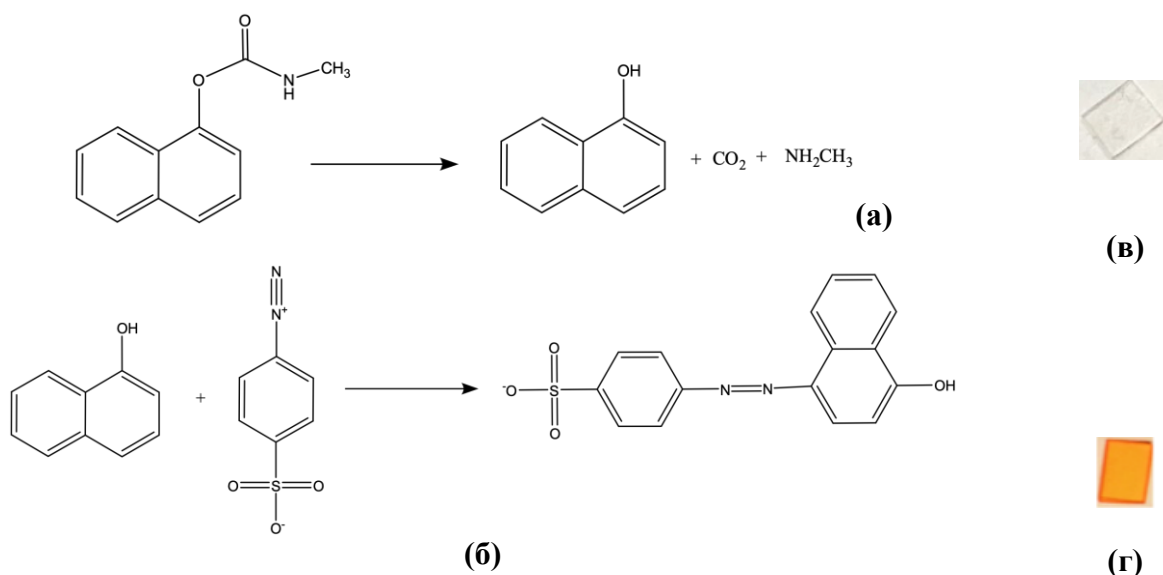
Способность полиметакрилатной матрицы (ПММ) как твердофазного экстрагента позволяет экстрагировать 1-нафтол в объем сенсора с последующим колориметрическим определением его количества по цифровому изображению. Такие колориметрические сенсоры, основанные на изменении цвета ПММ в результате специфичных химических реакций, ранее предложены для обнаружения тетрациклина (Saranchina et al., 2025), антиоксидантов (Gavrilenko et al., 2016) и микроэлементов (Gavrilenko et al., 2017) в образцах пищевых продуктов. Цифровые изображения сенсора преобразуют в красные, зеленые и синие (RGB) каналы цветовых координат с помощью смартфона, затем используют алгоритм обработки цветного изображения, который вычисляет среднее значение цветовых координат RGB (Rakkun et al., 2022; Supharoek et al., 2022; Raja et al., 2023).

Цель работы – изучение колориметрического аналитического сигнала колориметрического сенсора для определения 1-нафтола во фруктах с помощью смартфона.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Гидролиз карбаматных пестицидов до 1-нафтола

В качестве образцов карбаматного пестицида использованы карбарил и карбофуран, для гидролиза (рисунок 1а) 10 мг пестицида растворяют в 5 мл этанола, затем добавляют 2 мл 0,1 М NaOH. Полученную смесь нагревают до 65 °С в течение 15 минут для обеспечения гидролиза, затем охлаждают до комнатной температуры. После этого гидролизованный раствор нейтрализуют 0,1 М раствором HCl до pH 4–5, затем доводят объем до 50 мл. Аликвоту раствора 5 мл переносят в стакан объемом 50 мл, затем туда помещают бесцветную прозрачную пластинку ПММ на 40 мин при перемешивании. Пластинку сенсора с экстрагированным 1-нафтолом извлекают и переносят в слабокислый раствор диазотированной сульфаниловой кислоты, которая взаимодействует с 1-нафтолом с образованием продукта азосочетания п-(4-гидрокси-1-нафтилазо)бензолсульфоновой кислоты (4-ГНБС) (рисунок 1б) (Quintero et al., 1988). После реакции между диазотированной сульфаниловой кислотой (ДСК) и экстрагированным в ПММ 1-нафтолом наблюдают появление красно-оранжевой окраски колориметрического сенсора (Рисунок 1в, г). Спектрофотометрическое определение проводят при 475 нм в области максимума поглощения образующегося азосоединения. Общая схема определения представлена на рисунке 2.



**Рисунок 1.** Схема гидролиза карбаматного пестицида карбарила (а) и диазотирования 1-нафтола (б) с соответствующим изображением ПММ сенсора (в, г)



**Рисунок 2.** Схема колориметрического определения карбарила по 1-нафтолу с использованием ПММ

Для подготовки образца в пробирку к 2 г кожуры апельсина или винограда добавляли  $1,0 \text{ см}^3$  этанола и встряхивали в течение 15 минут без нагревания. Затем добавляли  $1,0 \text{ см}^3$  0,1 М NaOH и смесь нагревали при  $65^\circ\text{C}$  в течение 15 мин для гидролиза КП в 1-нафтол. После этого стабилизировали pH 4,5–5,5 внесением 1,0 мл 0,1 М HCl. При использовании метода стандартных добавок растворы 1-нафтола с точной концентрацией вносили непосредственно в исходный образец. Исходную пластинку ПММ помещали в гидролизованный раствор на 30 минут при комнатной температуре  $17\text{--}28^\circ\text{C}$ , затем извлекали, протирали фильтровальной бумагой и опускали в раствор диазотированной сульфаниловой кислоты до появления красно-оранжевой окраски.

Для обеспечения стандартных условий детектирования с использованием смартфона изображение ПММ сканировали камерой смартфона на поверхности фона белого цвета с расстояния 15–20 см. Интенсивность цвета колориметрической чувствительной области измеряли с помощью программного обеспечения для анализа цвета ColorGrab. Полученные результаты по содержанию 1-нафтола пересчитывали на исходное содержание пестицида согласно стехиометрии реакции гидролиза.

## 2.2. Реактивы

В работе использован порошок карбарила (1-нафтил-N-метилкарбамат, Wuxi Admas Technology Co. Ltd.), фосфатный буферный раствор, гидроксид натрия и соляная кислота (Химмедснаб, Россия); хлороформ и нитрит натрия (Sigma-Aldrich, Laborchemikalien GMBH). Все химические реагенты использованы в полученном виде без дополнительной очистки.

Для приготовления диазотированной сульфаниловой кислоты 50 мг сульфаниловой кислоты (Вектон, Россия) растворяли в 10 мл дистиллированной воды. Раствор переносили в мерную колбу 50 мл, затем добавляли по 3 мл 0,1 М соляной кислоты и 1 М раствора нитрита натрия. Полученный раствор хранили в холодильнике  $+6^\circ\text{C}$ .

## 2.3. Оборудование

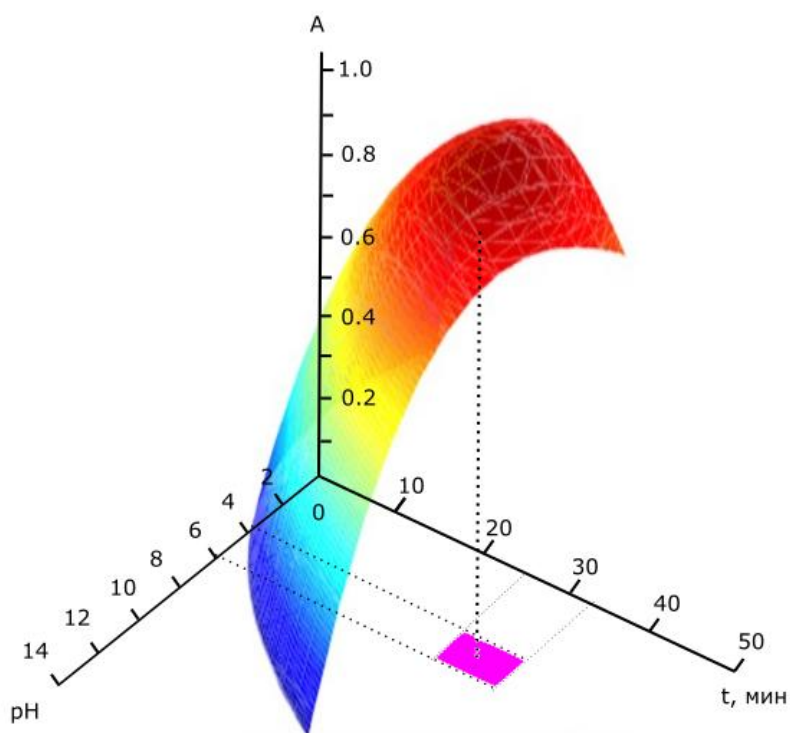
Изучение оптических свойств ПММ проводили с использованием сканирующего спектрофотометра Shimadzu UV-1800 (Shimadzu, Япония). Пластины ПММ с экстрагированным 1-нафтолом, полученные после контакта с раствором гидролизованного КП, сканировали на камеру смартфона iPhone XR, затем анализировали изменение цветовых каналов R, G, B и  $\Delta E = \sqrt{\Delta R^2 + \Delta G^2 + \Delta B^2}$  цифрового изображения сенсора в программе ColorGrab V.9.3.2.

## 3. Результаты и обсуждение

### 3.1. Оптимизация твердофазной экстракции 1-нафтола в ПММ

Оптимизация твердофазной экстракции 1-нафтола в ПММ проведена по параметрам pH и времени контакта сенсора с раствором. Поверхностные функциональные группы, включая C–O–C и C=O, в кислой среде протонируются, что создает локальный положительный заряд. В результате электростатического взаимодействия, локальный положительный заряд поверхности ПММ является центром связывания и индуцирует взаимодействие неподеленной электронной пары кислорода гидроксильной группы или избытка электронной плотности бензольного кольца. Такое электростатическое взаимодействие между функциональными группами ПММ и 1-нафтола зависит от  $\sigma^*$ - $\pi$  связывания и приводят к усилению экстракции 1-нафтола на поверхности ПММ. Проведенные исследования выявили прямую зависимость между продолжительностью ТФЭ и количеством экстрагированного 1-нафтола.

На основе результатов однофакторных экспериментов, построена поверхность отклика для определения взаимного влияния различных условий экстракции с использованием ANOVA и оптимизации твердофазной экстракции 1-нафтола в ПММ с использованием метода Бокса-Бенкена (Sattler et al., 2025). Экспериментальные данные с базовой концентрацией 1-нафтола 1,0 мг/л обработаны с помощью уравнения полиномиальной регрессии, результирующая поверхность представлена на рисунке 3. Параметры pH 1–14, и время контакта 2–40 мин использованы в качестве регрессионных факторов, влияющих на оценку величины экстракции 1-нафтола. Чувствительность определения непрерывно возрастала до 25–30 минут, после чего колориметрический сигнал (A) стабилизировался. Величина pH пробы определяет полноту экстракции 1-нафтола и непосредственно влияет на экстракционную способность поверхности ПММ и дальнейшую диффузию в твердую полимерную фазу (Gavrilenko et al., 2018). На Рисунке 3 показано влияние pH на эффективность экстракции, где максимум достигнут в диапазоне pH 5–6.



**Рисунок 3.** Поверхность Бокса-Бенкена для оптимизации твердофазной экстракции 1-нафтола в объем ПММ

Это свидетельствует о зависимости экстракции и концентрирования 1-нафтола в ПММ от величины протонирования поверхности ПММ в кислой среде и, соответственно, электростатических взаимодействий локального положительного заряда с отрицательно заряженными фрагментами 1-нафтола. С увеличением pH протонирование поверхности ПММ

уменьшилось, что снизило разность заряда между карбонильными группами поверхности ПММ и бензольным кольцом 1-нафтола, следовательно, увеличило аналитический отклик сенсора. Дальнейший сдвиг рН в щелочную среду привел к снижению сигнала сенсора, вероятно, за счет сдвига равновесия адсорбционной стадии накопления 1-нафтола на поверхности ПММ в сторону десорбции обратно в раствор.

Сравнение расчетного значения критерия Фишера с табличным показало адекватность регрессионной модели для определения 1-нафтола (т.к.  $F_{\text{эсп}} < F_{\text{табл}}$ ) для линейного диапазона 0,2–16,0 мг/кг. Установлены основные метрологические характеристики колориметрической методики количественного определения содержания 1-нафтола в образцах винограда и апельсина (Таблица 1) в соответствие с действующим нормативным документом (Santana et al., 2022).

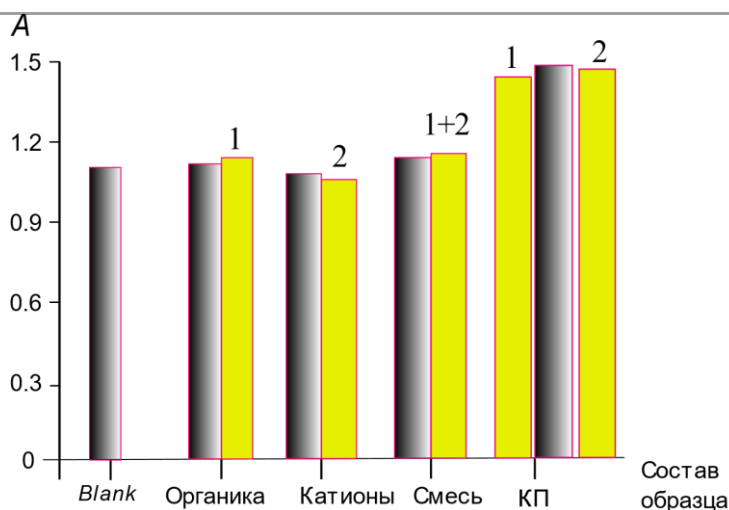
**Таблица 1.** Значения показателей точности ( $\sigma_r$ , %), повторяемости ( $\sigma_R$ , %), лабораторной ( $\pm\Delta_c$ , %) и внутрилабораторной ( $\pm\Delta$ , %) прецизионности при определении 1-нафтола ( $P=0,95$ ,  $n=3$ ,  $L=12$ )

С, мг/кг	$\sigma_r$ , %	$\sigma_R$ , %	$\pm\Delta_c$ , %	$\pm\Delta$ , %
0,2	8	9	17	30
1,0	7	7	6	15
5,0	3	3	5	8
10,0	3	3	5	8
15,0	6	6	6	13

Таким образом, при определении 1-нафтола колориметрическим методом показатель точности не превышает 15 % в области линейного диапазона. Указанные показатели качества результатов анализа являются установленными характеристиками погрешности для совокупности результатов анализа, полученных при соблюдении требований методики при ее реализации в отдельной лаборатории.

### 3.2. Исследование мешающего влияния компонентов реальных объектов

Разработанный ПММ сенсор использовали для количественного определения 1-нафтола в фруктах, матрица которых содержит другие компоненты, в основном, витамины, органические соединения и микроэлементы. Для оценки мешающего влияния исследованы интерферирующие вещества растительной матрицы (органические компоненты: глюкоза, аскорбиновая кислота, пектин и яблочная кислоты; катионы:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{K}^+$ ), которые могут повлиять на обнаружение 1-нафтола в образцах реальных фруктов, для оценки селективности этой системы. Мешающие компоненты вводили в соотношении 100:1 для органических веществ и 10:1 для катионов металлов. Результаты влияния мешающих веществ на аналитический сигнал 1-нафтола, представленные на рисунке 4, не демонстрируют существенного различия в изменении интенсивности сигнала для компонентов матрицы объекта.



**Рисунок 4.** Влияние присутствия органических веществ (1), катионов (2) и присутствия второго карбаматного пестицида на определение 1-нафтола

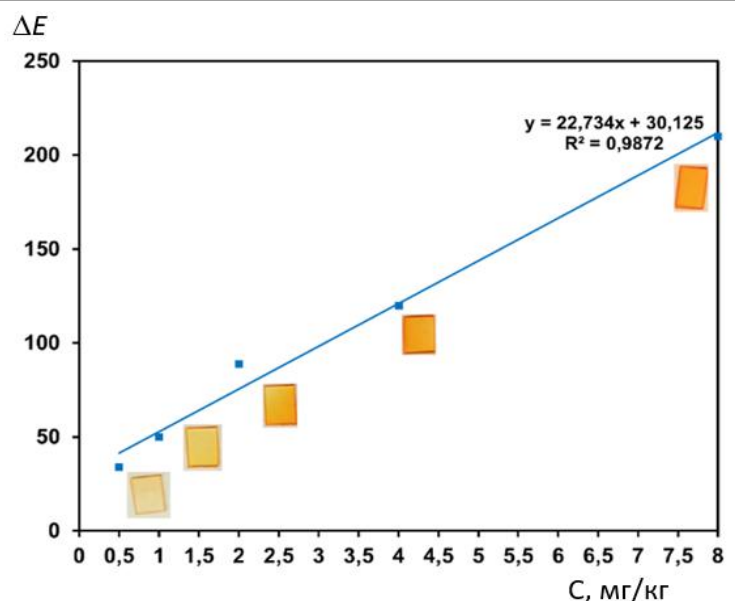
Полученные данные подтверждают селективность разработанного метода по отношению к 1-нафтолу. Однако, поскольку 1-нафтол образуется из карбаматных пестицидов, их совместное присутствие вносит суммарный вклад в определяемое количество 1-нафтола. Цветовая диаграмма для колориметрического определения 1-нафтола с использованием ПММ в кожуре апельсина представлена на рисунке 5.



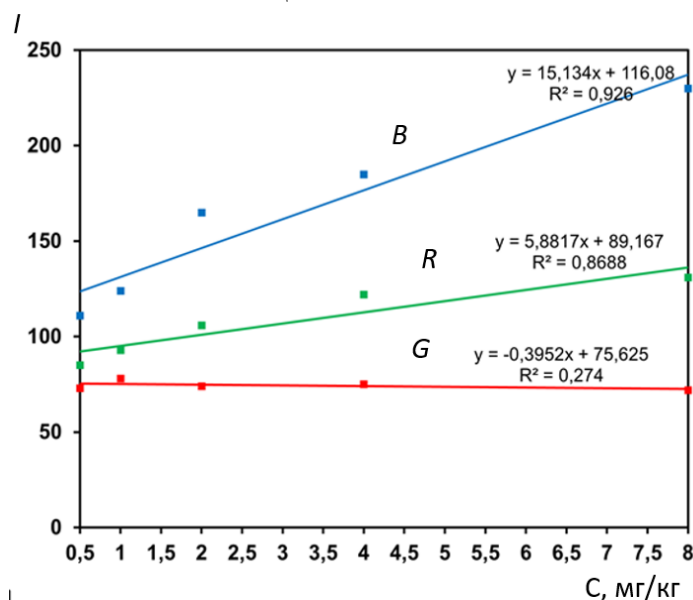
**Рисунок 5.** Цветовая шкала для колориметрического определения 1-нафтола с использованием ПММ

Разработанный ПММ применен в качестве колориметрического сенсора для скрининга 1-нафтола. Воспроизводимость сенсорной системы исследовали путем анализа изменения интенсивности цвета ( $\Delta E$ ) в колориметрической чувствительной области. Цветовая диаграмма и линейная зависимость между интенсивностью окраски и концентрацией 1-нафтола показали линейное увеличение интенсивности цвета с возрастанием концентрации, а линейность наблюдали в диапазоне 0,02–16 мг/кг с коэффициентом  $R^2$  0,987 (рисунок 6). Таким образом, сенсор показал себя достаточно чувствительным и эффективным для обнаружения 1-нафтола в образцах фруктов, для которых требуется пороговый уровень 0,1 мг/кг в пересчете на общую массу образца.

Изменение интенсивности каждого канала цвета R, G, B при различных концентрациях 1-нафтола линейное в более узком диапазоне видимой области спектра от 0,5 до 8 мг/кг (Рисунок 7). Вероятно, это связано с использованием в качестве добавки карбарила, который гидролизует до 1-нафтола с появлением дополнительных погрешностей, связанных с эффективностью твердофазной экстракции.



**Рисунок 6.** Градуировочный график для спектрофотометрического определения 1-нафтола в сравнении с изменением интенсивности цвета ΔE с использованием сенсора ПММ



**Рисунок 7.** Градуировочный график для определения карбарила методом цифровой колориметрии с использованием интенсивности R,G,B каналов

### 3.3. Колориметрическое определение карбарила

Предложен способ колориметрического определения пестицидов, основанный на изменении цвета ПММ после реакции диазотирования экстрагированного 1-нафтола. Процент извлечения определяли методом добавок (Таблица 2). Аналитические характеристики предлагаемого ПММ сенсора сопоставлены с подобными сенсорами для обнаружения 1-нафтола (Таблица 3). Результаты, полученные с помощью ПММ, показали сопоставимые аналитические характеристики, достаточно чувствительные для определения максимально допустимых остаточных количеств 1-нафтола в образцах. Разработанная схема определения с использованием ПММ обеспечивает колориметрическую информацию, которую можно считывать с помощью смартфона, что приводило к получению точных результатов скрининга 1-нафтола непосредственно на месте отбора.

**Таблица 2.** Результаты определения 1-нафтола колориметрическим и хроматографическим методами, ( $P=0,95$ ,  $n=4-5$ ,  $t_{\text{табл}}=2,78$ )

Объект анализа	Введено, мг/кг	Колориметрия	ВЭЖХ	S <sub>r</sub> , %	F-критерий
		Найдено, мг/кг	Найдено, мг/кг		
Виноград	0	<0.1	<0.02	–	–
	0,05	0,07±0,02	0,05±0,01	11.5	1,4
	0,10	0,13±0,03	0,12±0,02	9.3	
	0,50	0,48±0,14	0,52±0,08	11.7	
Апельсин	0	<0.1	<0.02	–	–
	0,05	0,06±0,02	0,05±0,01	13.4	1,9
	0,10	0,09±0,02	0,11±0,02	9.0	
	0,50	0,54±0,10	0,52±0,07	7.5	

**Таблица 3.** Сравнение аналитических характеристик колориметрических систем для обнаружения КП и 1-нафтола

Сенсор	Объекты	Время, мин	Диапазон, мг/кг	PrO, мг/кг	Источник
НЧ Ag на микрофлюидной бумаге	фрукты	60	12,0–60,0	7,0	(Sukin et al., 2024)
Ацетилхолинэстераза на полиэфире	овоци	5	1,0–50,0	0,3	(Rakkhun et al., 2022)
Колориметрия в растворе	злаковые	80	0,03–30,00	0,01	(Gunasekara et al., 2008)
НЧ Ag на оксиде графена	Смесь катионов и пестицидов	120	0,2–10,0	0,04	(Minh et al., 2020)
ПММ	фрукты	45	0,2–16,0	0,1	Эта работа

Сочетание избирательной твердофазной экстракции 1-нафтола в прозрачную ПММ и цифровой колориметрии с использованием смартфона позволило создать простой в использовании и экологически чистый способ контроля КП. В сравнении с ВЭЖХ, ПММ представляет собой аналитическую колориметрическую систему с быстрым получением результата для контроля непосредственно на месте отбора пробы.

#### 4. Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность разработанного способа цифровой колориметрии с использованием полиметакрилатной матрицы в качестве сенсора для определения 1-нафтола как продукта щелочного гидролиза карбаматных пестицидов. Оптимизированы условия определения в слабокислой среде, время определения <1 минуты и твердофазной экстракции – 25–30 минут. Способ использования ПММ показал достаточную для большинства определений чувствительность с пределом обнаружения 0,1 мг/кг и линейным диапазоном 0,5–8,0 мг/кг для визуального определения и 0,2–16,0 мг/кг для цифрового колориметрического определения.

#### 5. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

## 6. Вклады авторов

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

## 7. Информация об авторах

Митупов, Бато – аспирант отделения химической инженерии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация, 634050; [bcml@tpu.ru](mailto:bcml@tpu.ru), <https://orcid.org/0009-0008-0075-8053>

Кузнецова, Дарья – аспирант кафедры аналитической химии, химический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация, 634050; [dce@mail.tsu.ru](mailto:dce@mail.tsu.ru), <https://orcid.org/0009-0004-4977-8849>

Кожемякин, Никита – аспирант отделения химической инженерии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация, 634050; [nak60@tpu.ru](mailto:nak60@tpu.ru), <https://orcid.org/0009-0006-1895-1607>

Роор, Олег – аспирант Института естественных и технических наук, Сургутский государственный университет, Сургут, Российская Федерация, 628408; [olg\\_roor@mail.ru](mailto:olg_roor@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0006-7940-5415>

Стукалов, Александр – студент Института химии и химико-фармацевтических технологий, Алтайский государственный университет, Барнаул, Российская Федерация, 656049; [stukalov.62021@asu.ru](mailto:stukalov.62021@asu.ru), <https://orcid.org/0009-0003-0869-5580>

Гавриленко, Михаил – доктор химических наук, профессор кафедры органической химии, химический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация, 634050; [dce@mail.ru](mailto:dce@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1111-0016>

**9. Финансирование:** данное исследование выполнено при поддержке Министерством образования и науки Российской Федерации, соглашение FSWN-2025-0013.

**10. Благодарности:** нет.

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

## 12. Список литературы

1. Gupta, R. C. (2014). Carbamate pesticides. In P. Wexler (Ed.), *Encyclopedia of toxicology* (3rd ed., pp. 661–664). Academic Press.
2. World Health Organization. (2010). WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2009. World Health Organization.
3. Dias, E., Garcia e Costa, F., Morais, S., & De Lourdes Pereira, M. (2015). A review on the assessment of the potential adverse health impacts of carbamate pesticides. In *Topics in public health*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/59613>
4. Sahana, A., & Agarwal, S. (2018). Carbaryl and human health: a review. *Journal of Science*, 2(5), 12–22. <https://doi.org/10.47944/jos2.5.2018.12>
5. Sharma, K. D., Dharmani, T., & Sharma, N. (2015). Extractive spectrophotometric method for the determination of carbaryl in environmental samples. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 29(2), 173–180. <https://doi.org/10.4314/bcse.v29i2.2>
6. Kunpatee, K., Kaewdorn, K., Duangtong, J., Chaiyo, S., Chailapakul, O., Kalcher, K., Kerr, M., & Samphao, A. (2022). A new disposable electrochemical sensor for the individual and simultaneous determination of carbamate pesticides using a nanocomposite modified screen-

- printed electrode. *Microchemical Journal*, 177, 107318. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107318>
7. Samsidar, A., Siddiquee, S., & Shaarani, S. M. (2018). A review of extraction, analytical and advanced methods for determination of pesticides in environment and foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 188–201. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.011>
  8. Bazrafshan, A. A., Ghaedi, M., Rafiee, Z., Hajati, S., & Ostovan, A. (2017). Nano-sized molecularly imprinted polymer for selective ultrasound-assisted microextraction of pesticide carbaryl from water samples: Spectrophotometric determination. *Journal of Colloid and Interface Science*, 498, 313–322. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.03.076>
  9. ALOthman, Z. A., Yilmaz, E., Habila, M. A., Alhenaki, B., Soylak, M., Ahmed, A. Y. B. H., & Alabdulkarem, E. A. (2022). Development of combined-supramolecular microextraction with ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry procedures for ultra-trace analysis of carbaryl in water, fruits and vegetables. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(7), 1491–1501. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1738419>
  10. Bordbar, M. M., Nguyen, T. A., Arduini, F., & Bagheri, H. (2020). A paper-based colorimetric sensor array for discrimination and simultaneous determination of organophosphate and carbamate pesticides in tap water, apple juice, and rice. *Microchimica Acta*, 187(11), 621. <https://doi.org/10.1007/s00604-020-04596-x>
  11. AlFaris, A. N., ALTamimi, Z. J., ALOthman, Z. A., Wabaidur, S. M., Ghafar, A. A., & Aldayel, S. T. (2020). Development of a sensitive liquid-liquid extraction and ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for the analysis of carbaryl residues in fresh vegetables sold in Riyadh. *Journal of King Saud University - Science*, 32(4), 2414–2418. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.03.030>
  12. Rahmani, T., Bagheri, H., Behbahani, M., Hajian, A., & Afkhami, A. (2018). Modified 3D graphene-Au as a novel sensing layer for direct and sensitive electrochemical determination of carbaryl pesticide in fruit, vegetable, and water samples. *Food Analytical Methods*, 11(11), 3005–3014. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1280-4>
  13. Chowdhury A. Z. M., Fakhruddin, A. N. M., Nazrul I. Md., Moniruzzaman, M., Gan, S. H., & Khorshed A. Md. (2013). Detection of the residues of nineteen pesticides in fresh vegetable samples using gas chromatography–mass spectrometry. *Food Control*, 34(2), 457–465. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.05.006>
  14. Cavaliere, B., Monteleone, M., Naccarato, A., Sindona, G., & Tagarelli, A. (2012). A solid-phase microextraction-gas chromatographic approach combined with triple quadrupole mass spectrometry for the assay of carbamate pesticides in water samples. *Journal of Chromatography A*, 1257, 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.08.011>
  15. Deng, G., Wang, S., Chen, H., Ren, L., Liang, K., Wei, L., Long, W., Yang, J., Guo, L., Han, X., She, Y., & Fu, H. (2022). Digital image colorimetry in combination with chemometrics for the detection of carbaryl based on the peroxidase-like activity of nanoporphyrins and the etching process of gold nanoparticles. *Food Chemistry*, 394, 133495. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133495>
  16. Fiori, S., Scroccarello, A., Della Pelle, F., Del Carlo, M., & Compagnone, D. (2024). Integrated paper/graphene 3D pop-up device for the quantitative sensing of carbaryl. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 399, 134768. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134768>
  17. Habila, M. A., Alhenaki, B., El-Marghany, A., Sheikh, M., Ghfar, A. A., ALOthman, Z. A., & Soylak, M. (2022). Metal organic framework-based dispersive solid-phase microextraction of carbaryl from food and water prior to detection by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Separations*, 9(2), 32. <https://doi.org/10.3390/separations9020032>
  18. Hashemi, P., Karimian, N., Khoshshafar, H., Arduini, F., Mesri, M., Afkhami, A., & Bagheri, H. (2019). Reduced graphene oxide decorated on Cu/CuO-Ag nanocomposite as a high-performance material for the construction of a non-enzymatic sensor: Application to the

- determination of carbaryl and fenamiphos pesticides. *Materials Science and Engineering: C*, 102, 764–772. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.05.010>
19. Huang, Y., Shi, T., Luo, X., Xiong, H., Min, F., Chen, Y., Nie, S., & Xie, M. (2019). Determination of multi-pesticide residues in green tea with a modified QuEChERS protocol coupled to HPLC-MS/MS. *Food Chemistry*, 275, 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.094>
20. Ahn, S., Lee, J.-Y., & Kim, B. (2021). Accurate determination of carbaryl, carbofuran and carbendazim in vegetables by isotope dilution liquid chromatography/tandem mass spectrometry. *Chromatographia*, 84(1), 27–35. <https://doi.org/10.1007/s10337-020-03976-y>
21. Kunpatee, K., Kalcher, K., Chailapakul, O., Chaiyo, S., & Samphao, A. (2023). A paper chromatographic-based electrochemical analytical device for the separation and simultaneous detection of carbofuran and carbaryl pesticides. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 377, 133116. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.133116>
22. Liu, D., Chen, W., Wei, J., Li, X., Wang, Z., & Jiang, X. (2012). A highly sensitive, dual-readout assay based on gold nanoparticles for organophosphorus and carbamate pesticides. *Analytical Chemistry*, 84(9), 4185–4191. <https://doi.org/10.1021/ac300545p>
23. Moraes, F. C., Mascaro, L. H., Machado, S. A. S., & Brett, C. M. A. (2009). Direct electrochemical determination of carbaryl using a multi-walled carbon nanotube/cobalt phthalocyanine modified electrode. *Talanta*, 79(5), 1406–1411. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.06.013>
24. Khosropour, H., Keramat, M., Primpray, V., Karuwan, C., Tasca, F., & Laiwattanapaisal, W. (2025). An electrochemical aptamer-based biosensor for rapid and ultrasensitive detection of carbaryl by red blood cell-like MOFs. *Alexandria Engineering Journal*, 124, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.03.058>
25. Ahmadi, S., Khazaei, S., & Mehri, F. (2024). Determination of pesticide residues in fruits: A systematic review and meta-analyses. *Journal of Food Composition and Analysis*, 128, 106012. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106012>
26. Peng, L., Zhu, J., Yang, B., Hao, H., & Lou, S. (2022). A green photocatalytic-biosensor for colorimetric detection of pesticide (carbaryl) based on inhibition of acetylcholinesterase. *Talanta*, 246, 123525. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123525>
27. Lee, M.-G., Patil, V., Na, Y.-C., Lee, D. S., Lim, S. H., & Yi, G.-R. (2018). Highly stable, rapid colorimetric detection of carbaryl pesticides by azo coupling reaction with chemical pre-treatment. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 261, 489–496. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.01.151>
28. Jing, X., Wang, H., Huang, X., Chen, Z., Zhu, J., & Wang, X. (2021). Digital image colorimetry detection of carbaryl in food samples based on liquid phase microextraction coupled with a microfluidic thread-based analytical device. *Food Chemistry*, 337, 127971. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127971>
29. Lee, C. Y., Jeong, S. Y., Kim, D.-H., Kim, M. J., Heo, J. H., & Lee, J. H. (2024). Facile and rapid colorimetric detection of carbaryl using nitrite-conjugated gold nanoparticles to ensure environmental and consumer safety. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 419, 136358. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.136358>
30. Bordbar, M. M., Nguyen, T. A., Arduini, F., & Bagheri, H. (2020). A paper-based colorimetric sensor array for discrimination and simultaneous determination of organophosphate and carbamate pesticides in tap water, apple juice, and rice. *Microchimica Acta*, 187, 621. <https://doi.org/10.1007/s00604-020-04596-x>
31. Bhargavi, O., Kiran, K., Suvardhan, K., Rekha, D., Janardhanam, K., & Chiranjeevi, P. (2006). A sensitive determination of carbofuran by spectrophotometer using 4,4-azo-bis-3,3',5,5'-tetra bromoaniline in various environmental samples. *E-Journal of Chemistry*, 3 (2), 68–77.

32. Shahdost-fard, F., Fahimi-Kashani, N., & Hormozi-nezhad, M. R. (2021). A ratiometric fluorescence nanoprobe using CdTe QDs for fast detection of carbaryl insecticide in apple. *Talanta*, 221, 121467. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121467>
33. Adhikari, S., Joshi, R., Joshi, R., Kim, M., Jang, Y., Tufa, L. T., Gicha, B. B., Lee, J., Lee, D., & Cho, B.-K. (2024). Rapid and ultrasensitive detection of thiram and carbaryl pesticide residues in fruit juices using SERS coupled with the chemometrics technique. *Food Chemistry*, 457, 140486. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140486>
34. Joshi, R., Adhikari, S., Pil Son, J., Jang, Y., Lee, D., & Cho, B.-K. (2023). Au nanogap SERS substrate for the carbaryl pesticide determination in juice and milk using chemometrics. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 297, 122734. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.122734>
35. Armenta, S., Garrigues, S., & de la Guardia, M. (2008). Green analytical chemistry. *Trends in Analytical Chemistry*, 27(6), 497–511. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.05.003>
36. Dhahir, S. A., Mohammed, N. J., & Khalaf, K. D. (2015). Spectrophotometric determination of carbofuran by using p-amino phenol as a reagent. *International Journal of Chemical Sciences*, 13(1), 213–229.
37. Soltani-Shahrivar, M., Karimian, N., Fakhri, H., Hajian, A., Afkhani, A., & Bagheri, H. (2019). Design and application of a non-enzymatic sensor based on metal-organic frameworks for the simultaneous determination of carbofuran and carbaryl in fruits and vegetables. *Electroanalysis*, 31(12), 2455–2465. <https://doi.org/10.1002/elan.201900301>
38. Soulis, D., Trigazi, M., Tsekenis, G., Chandrinou, C., Klinakis, A., & Zergioti, I. (2020). Facile and low-cost SPE modification towards ultra-sensitive organophosphorus and carbamate pesticide detection in olive oil. *Molecules*, 25(21), 4988. <https://doi.org/10.3390/molecules25214988>
39. Suk-in, N., Thongpim, K., Phamonpon, W., Yukird, J., Ummartyotin, S., & Rodthongkum, N. (2024). A dual colorimetric/electrochemical sensor of carbaryl in fruits on microfluidic paper-based analytical device connected with a smartphone readout. *Journal of Food Composition and Analysis*, 133, 106445. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106445>
40. Chemat, F., Garrigues, S., & de la Guardia, M. (2019). Portability in analytical chemistry: A green and democratic way for sustainability. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 19, 94–98. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.07.007>
41. Saranchina, N. V., Kuznetsova, D. E., Gavrilenko, N. A., & Gavrilenko, M. A. (2025). Solid phase extraction and determination of tetracycline using gold nanoparticles stabilized in a polymethacrylate matrix. *Molecules*, 30(22), 4458. <https://doi.org/10.3390/molecules30224458>
42. Gavrilenko, N. A., Saranchina, N. V., & Gavrilenko, M. A. (2016). Novel colorimetric sensor for cupric reducing antioxidant capacity (CUPRAC) measurement. *Procedia Engineering*, 168, 355–358. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.120>
43. Gavrilenko, N. A., Saranchina, N. V., Fedan, D. A., & Gavrilenko, M. A. (2017). Solid-phase spectrophotometric iodometric determination of nitrite and selenium(IV) using a polymethacrylate matrix. *Journal of Analytical Chemistry*, 72(6), 546–550. <https://doi.org/10.1134/S1061934817030054>
44. Rakkhun, W., Jantra, J., Cheubong, C., & Teepoo, S. (2022). Colorimetric test strip cassette readout with a smartphone for on-site and rapid screening test of carbamate pesticides in vegetables. *Microchemical Journal*, 181, 107837. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107837>
45. Supharoek, S., Siriangkawut, W., Grudpan, K., & Ponghong, K. (2022). A simple and reliable dispersive liquid-liquid microextraction with smartphone-based digital images for determination of carbaryl residues in *Andrographis Paniculata* herbal medicines using simple peroxidase extract from *Senna Siamea* Lam. Bark. *Molecules*, 27(10), 3261. <https://doi.org/10.3390/molecules27103261>

46. Raja, D. A., Rahim, S., Shah, M. R., Bhangar, M. I., & Malik, M. I. (2023). Silver nanoparticle based efficient colorimetric assay for carbaryl – an insecticide. *Journal of Molecular Liquids*, 372, 121200. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121200>
47. Quintero, M. C., Silva, M., & Perez-Bendito, D. (1988). Stopped-flow determination of carbaryl and its hydrolysis product in mixtures in environmental samples. *Talanta*, 35(12), 943–948. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(88\)80225-X](https://doi.org/10.1016/0039-9140(88)80225-X)
48. Sattler, P., & Rosenbaum, M. (2025). Choice of the hypothesis matrix for using the anova-type-statistic. *Statistics & Probability Letters*, 219, 110356.
49. Gavrilenko, N. A., Saranchina, N. V., Sukhanov, A. V., & Fedan, D. A. (2018). Reversible pH-sensitive element based on bromocresol purple immobilized into the polymethacrylate matrix. *Mendeleev Communications*, 28(4), 450–452. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2018.07.038>
50. Santana, M. K. A., & Loureiro, G. (2022). Risk management approach for testing and calibration laboratories. *Accreditation and Quality Assurance*, 27(6), 313–318. <https://doi.org/10.1007/s00769-022-01521-y>
51. Gunasekara, A. S., Rubin, A. L., Goh, K. S., Spurlock, F. C., & Tjeerdema, R. S. (2008). Environmental fate and toxicology of carbaryl. In *Reviews of environmental contamination and toxicology* (Vol. 196, pp. 95–121). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-78444-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78444-1_4)
52. Minh, P. N., Hoang, V.-T., Dinh, N. X., Van Hoang, O., Van Cuong, N., Thi Bich Hop, D., Tuan, T. Q., Khi, N. T., Huy, T. Q., & Le, A.-T. (2020). Reduced graphene oxide-wrapped silver nanoparticles for applications in ultrasensitive colorimetric detection of Cr(VI) ions and the carbaryl pesticide. *New Journal of Chemistry*, 44(18), 7611–7620. <https://doi.org/10.1039/D0NJ00947D>

## Полиметакрилатты сенсормен 1-нафтолды колориметриялық анықтау

**Бато Митупов, Дарья Кузнецова, Никита Кожемякин, Олег Роор, Александр Стукалов, Михаил Гавриленко**

**Аңдатпа.** Полиметакрилат сенсорын қолдана отырып колориметриялық, карбаматты пестицидтерді жою өнімін зертханадан тыс анықтау әдісі әзірленді, бұл талдаудың тасымалдануы мен жеделдігін қамтамасыз етеді. 1-нафтол сенсордың көлеміне шығарылады, содан кейін сандық кескін бойынша оның мөлшерін колориметриялық анықтайды. Сенсордың сандық кескіндері смартфон көмегімен қызыл, жасыл және көк (RGB) түс координаттарының арналарына түрлендіріледі, содан кейін RGB түс координаттарының орташа мәнін есептейтін түсті кескінді өңдеу алгоритмін пайдаланады. 1-нафтолды анықтауда полиметакрилат матрицасын сынақ жүйелері мен цифрлық колориметрия үшін аналитикалық орта ретінде пайдаланудың принциптік мүмкіндігі тәжірибе жүзінде расталды. 4,0×4,0 мм модификацияланған полимерлі мөлдір сенсорлар экстракция қабілеті мен оптикалық өнімділіктің оңтайлы үйлесімін қамтамасыз ететіні көрсетілген. РММ қолдану тәсілі көптеген анықтамалар үшін жеткілікті сезімталдықты көрсетті, анықтау шегі 0,1 мг/кг және сызықтық диапазоны 0,5–8,0 мг/кг визуалды анықтау үшін және 0,2–16,0 мг/кг сандық колориметриялық анықтау үшін.

**Түйін сөздер:** полиметакрилат матрицасы, 1-нафтол, колориметрия, қатты фазалы экстракция, диазоттау реакциясы

## Colorimetric determination of 1-naphthol on a polymethacrylate sensor

**Bato Mitupov, Dar'ya Kuznetsova, Nikita Kozhemyakin, Oleg Roor, Alexander Stukalov, Mikhail Gavrilenko**

**Abstract.** A method for the in-laboratory determination of the degradation product of carbamate pesticides using a colorimetric polymethacrylate sensor has been developed, which ensures the portability and efficiency of the analysis. 1-Naphthol is extracted into the sensor volume, followed by colorimetric determination of its amount from a digital image. The digital images of the sensor are converted into red, green, and blue (RGB) channels of color coordinates using a smartphone, then a color image processing algorithm is used, which calculates the average value of the RGB color coordinates. The fundamental possibility of using a polymethacrylate matrix as an analytical medium for test systems and digital colorimetry in the determination of 1-naphthol has been experimentally confirmed. It is shown that modified polymer transparent sensors measuring 4.0×4.0 mm provide an optimal combination of extraction ability and optical characteristics. The method of using PMM showed sufficient sensitivity for most definitions with a detection limit of 0.1 mg/kg and a linear range of 0.5-8.0 mg/kg for visual detection and 0.2-16.0 mg/kg for digital colorimetric detection.

**Keywords:** polymethacrylate matrix, 1-naphthol, colorimetry, solid phase extraction, diazotization

МРНТИ 31.25.19

Химия

Обзор

## Радиационная сшивка первичных и вторичных полимеров: эффективность и возможности радиационной сшивки полимеров

Лязат Толымбекова, Айымжан Казбекова, Айша Бақтыбек, Гайни Сейтенова, Арайлым Турсынова

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; [tolymbekova\\_lb@enu.kz](mailto:tolymbekova_lb@enu.kz), [aiymzhanr2502@gmail.com](mailto:aiymzhanr2502@gmail.com), [aishabaktybek1@gmail.com](mailto:aishabaktybek1@gmail.com), [seitenova\\_gzh@enu.kz](mailto:seitenova_gzh@enu.kz), [tursynova\\_ak@enu.kz](mailto:tursynova_ak@enu.kz)

\*Корреспонденция: [aiymzhanr2502@gmail.com](mailto:aiymzhanr2502@gmail.com)

**Аннотация:** Статья посвящена обзору радиационной сшивки первичных и вторичных полимеров как перспективному направлению модификации макромолекулярных материалов. Рассматриваются физико-химические основы процесса сшивки под воздействием ионизирующего излучения, в том числе  $\gamma$ -излучения, электронного пучка и ультрафиолета, с акцентом на механизмы образования поперечных связей в структуре полимеров. Особое внимание уделяется сравнительному анализу поведения первичных и вторичных полимеров при радиационном воздействии, включая влияние примесей, остаточных стабилизаторов и степени деградации. Обобщены результаты современных научных исследований, демонстрирующих изменения в механических и термических свойствах полимеров после сшивки. Значительная часть статьи посвящена практическому применению радиационно-сшитых материалов в различных отраслях: в энергетике (изоляция кабелей), в медицине (одноразовые изделия), в строительстве (трубы и плёнки), а также в переработке и утилизации пластиковых отходов. В работе затрагиваются экономические аспекты рассматриваемого метода, при этом отмечается, что при переходе к массовому производству радиационная сшивка характеризуется рядом технологических особенностей, потенциально влияющих на экономические показатели процесса. К ним относятся высокая производительность, высокий уровень автоматизации и отсутствие необходимости в применении химических инициаторов. Отмечены экологические преимущества, включая отсутствие токсичных побочных продуктов и возможность глубокой переработки вторичных полимеров. Сделан вывод о высокой актуальности и потенциале радиационной сшивки в контексте устойчивого развития и перехода к циркулярной экономике.

**Цитирование:** Толымбекова, Л., Казбекова, А., Бақтыбек, А., Сейтенова, Г., Турсынова, А. (2026). Радиационная сшивка первичных и вторичных полимеров: эффективность и возможности радиационной сшивки полимеров. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия Химия. География. 154(1), 75-99. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-75-99>

Академический редактор:  
Э.Е. Копишев

Поступила: 15.09.2025

Исправлена: 28.01.2026

Принята: 29.01.2026

Опубликована: 31.03.2026



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

**Ключевые слова:** радиационная сшивка; ионизирующее излучение; первичные полимеры; вторичные полимеры; полиэтилен; модификация полимеров; экологичность; полимерные отходы; циркулярная экономика

## 1. Введение

В условиях устойчивого роста производства и потребления полимерных материалов одной из приоритетных задач современной химической и материаловедческой науки становится повышение эксплуатационных характеристик полимеров, а также разработка эффективных подходов к переработке и повторному использованию полимерных отходов. Особую актуальность данные вопросы приобретают в контексте перехода к принципам устойчивого развития и циркулярной экономики, предполагающим снижение экологической нагрузки и рациональное использование ресурсов. В этом аспекте радиационная сшивка рассматривается как перспективный физико-химический метод модификации полимерных материалов, позволяющий улучшать их механические, термические и химические свойства без применения химических реагентов и растворителей. Особенно значимым является применение данной технологии к вторичным полимерам, что открывает возможности не только для утилизации пластиковых отходов, но и получения материалов с повышенными эксплуатационными и технико-экономическими показателями (Azevedo et al., 2025; Ahmed et al., 2024).

Настоящая работа представляет собой обзор современных научных исследований, посвящённых радиационной сшивке первичных и вторичных полимеров. В статье выполнено обобщение и аналитическое сопоставление литературных данных с акцентом на влияние типа полимера, вида ионизирующего излучения, диапазона поглощённых доз и условий облучения на формирование пространственной структуры и изменение эксплуатационных свойств материалов. Рассмотренные исследования систематизированы с целью выявления общих закономерностей радиационного воздействия, а также различий в поведении первичных и вторичных полимеров, что позволяет оценить потенциал и ограничения радиационной сшивки для практического применения и экологически ориентированных технологий переработки.

Радиационная сшивка является одной из ключевых технологий физико-химической модификации полимерных материалов, основанной на воздействии ионизирующего излучения высокой энергии на макромолекулярную структуру. В результате облучения в полимерной матрице инициируются свободнорадикальные процессы, приводящие к образованию поперечных ковалентных связей между макромолекулярными цепями и формированию трёхмерной пространственной сетки. Одним из существенных преимуществ данного метода является отсутствие необходимости в химических инициаторах или катализаторах, а также возможность проведения процесса при относительно низких температурах. В промышленных и исследовательских условиях для радиационной сшивки применяются  $\gamma$ -излучение, пучки ускоренных электронов и рентгеновское излучение, выбор которых определяется требуемой глубиной проникновения, дозовыми характеристиками и геометрией обрабатываемых изделий (Makarov & Krivchenko, 2020; Krieguer et al., 2024).

С точки зрения молекулярной механики под действием ионизирующего излучения происходит ионизация и возбуждение молекул полимера, что приводит к образованию активных центров - макрорадикалов. Их последующая миграция и рекомбинация инициируют формирование поперечных связей между цепями. Общий механизм радиационной сшивки включает образование первичных радикалов в результате отрыва атомов водорода или разрыва C–C-связей, развитие цепных радикальных процессов и их завершение с образованием пространственной сетки. В результате данных процессов наблюдается повышение теплостойкости, химической инертности, устойчивости к деформации и растрескиванию полимерных материалов (Gheysari & Behjat, 2001; Glauser et al., 2000). Наиболее эффективно радиационная сшивка реализуется в полимерах с насыщенной углеродной цепью, таких как полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и этиленвинилацетат, что определяет их широкое применение в промышленности и технологиях переработки (Maharaj et al., 2018).

## 2. Радиационная сшивка первичных и вторичных полимеров: истоки, индустриализация и тренды

Исследования в области радиационной химии полимеров начались в 1950-х годах с фундаментальных работ авторов (Charapiro et al., 1962), заложивших основы понимания кинетики радиационных процессов в органических материалах. Были получены первые сведения о дозозависимости процессов сшивки и деструкции, а также о влиянии структуры полимера, кристалличности, наличия стабилизаторов и внешней атмосферы на направление радиационного воздействия. Уже в 1970-х годах радиационная технология была внедрена в промышленность: сначала в производстве теплоусаживаемых труб и изоляционных материалов, а затем в упаковочной и автомобильной промышленности (Mendizabal et al., 1996). Классическим примером применения радиационной сшивки является модификация полиэтилена высокой плотности (HDPE), который после облучения приобретает свойства, аналогичные сшитым терморезистивным полимерам - термостойкость до 200°C, высокая прочность на разрыв и стойкость к растрескиванию под нагрузкой (Lapshin & Voronkova, 2015).

В отчёте Международного агентства по атомной энергии (IAEA) «1st RCM Report for CRP F23035: Radiation Effects on Polymer Materials Commonly Used in Medical Devices» (2021) обобщены результаты международного координированного проекта по оценке влияния ионизирующего излучения на широко применяемые в медицинских изделиях первичные полимерные материалы. В работе анализируются технологические режимы  $\gamma$ -излучения (источники  $^{60}\text{Co}/^{137}\text{Cs}$ ), электронно-лучевой обработки и рентгеновских источников, релевантные прежде всего радиационной стерилизации медицинских изделий, а также более высокодозовым воздействиям, приводящим к изменениям структуры и свойств полимеров. Рассматриваются конкурирующие процессы радиационной сшивки и цепного расщепления, влияние кислорода, скорости дозы и температуры, а также эффекты пост-облучательного старения материалов при различных режимах облучения (International Atomic Energy Agency, 2021).

Современный этап исследований акцентирует внимание на возможности тонкой настройки свойств полимеров путём варьирования дозы облучения, температуры, наличия сенсбилизаторов (например, триаллилизотиоцианурата - ТАТС, дивинилбензола - DVB) и условий среды (вакуум, воздух, инертная атмосфера). Кроме того, особое значение приобретают работы по созданию композитов и нанокompозитов на основе радиационно-сшитых матриц, позволяющих получить материалы с направленными функциональными свойствами - барьерными, электроизоляционными, механическими (Zenkiewicz et al., 2015; Manaila et al., 2012).

Историческое развитие методов радиационной сшивки показало устойчивый интерес научного сообщества к использованию ионизирующего излучения как инструмента для улучшения свойств полимерных материалов. Однако эффективность такого воздействия во многом определяется изначальной структурой и физико-химическими характеристиками самих полимеров. Для понимания масштабов и перспектив радиационной модификации необходимо рассмотреть основные различия между первичными и вторичными полимерами, а также особенности их физико-химических и механических свойств, определяющих реакцию материала на облучение (Charlesby, 1960; Woods et al., 1994; Ferry et al., 2020).

Физико-химические и механические характеристики полимерных материалов определяют их пригодность к использованию в различных технических и промышленных областях. Первичные полимеры, полученные непосредственно в результате синтеза мономеров, обладают высокой степенью молекулярной регулярности, однородной кристалличностью, отсутствием дефектов в цепях, а также строго контролируруемыми молекулярно-массовыми распределениями (Smith et al., 2018). Это обеспечивает их высокую прочность на разрыв, устойчивость к термическим и химическим воздействиям, стабильность во времени и при длительной эксплуатации. Такие полимеры широко применяются в

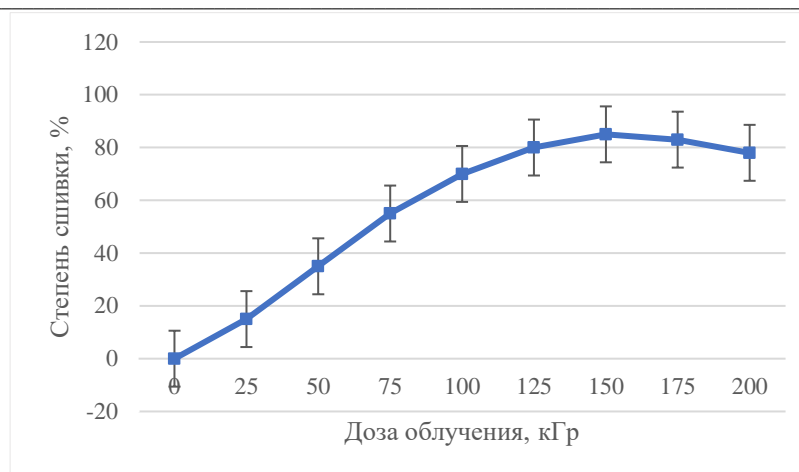
медицине, электронике, строительстве, упаковке и других сферах, где важны стабильность свойств и соответствие строгим требованиям (Thiher et al., 2020; Schneider et al., 2019).

Вторичные полимеры напротив, представляют собой переработанные или повторно использованные материалы, полученные в результате рециклинга промышленных или бытовых пластиков. В процессе переработки исходный полимер подвергается ряду воздействий – термическому старению, окислению, механическому разрушению и воздействию ультрафиолета. Эти процессы приводят к образованию короткоцепочечных фрагментов, снижению молекулярной массы, увеличению количества кислородсодержащих групп (карбонильных, гидроксильных), ухудшению морфологии и снижению степени кристалличности. Соответственно, механические свойства вторичных полимеров – прочность, ударная вязкость, модуль упругости – резко снижаются. Также ухудшается адгезия, снижается термостойкость и устойчивость к химическим реагентам (Al-Gahtany et al., 2018; Kimura et al., 2020).

Для восстановления утраченных свойств и продления срока службы вторичных полимеров используется ряд технологий модификации, одной из наиболее эффективных из которых является радиационная сшивка. Этот процесс позволяет улучшить структуру материала за счёт образования поперечных ковалентных связей между макромолекулами, повышая прочность, термостабильность и химическую инертность (Basfar et al., 2015; Alavarse et al., 2022). При этом важно учитывать начальные свойства материала: полимеры с изначально высокой кристалличностью или большим содержанием дефектов могут по-разному реагировать на облучение. Например, полиэтилен низкой плотности (LDPE) обладает хорошей податливостью к радиационной сшивке благодаря своей аморфной структуре, тогда как полипропилен или полиэтилентерефталат (PET) могут требовать введения сшивающих агентов или подбора особых условий облучения (Sharif et al., 2000; Al Lafi et al., 2015). Кроме того, структура и физико-химические свойства полимера определяют выбор дозы ионизирующего излучения. При слишком низкой дозе может не достигаться необходимая степень сшивки, тогда как при высоких дозах начинается деструкция, особенно в случае вторичных полимеров с уже повреждённой цепной структурой (Silva et al., 2021; Podhornaya et al., 2020).

В работах (Chen et al., 2006) показано, при облучении вторичного полиэтилена в диапазоне доз 100–250 кГр наблюдается значительное повышение прочностных характеристик – до 60% по сравнению с необлучённым материалом, а также улучшение тепловой деформационной стойкости и устойчивости к растрескиванию. В то же время, при превышении дозы 300 кГр происходит деградация цепей, выражающаяся в снижении эластичности и появлении хрупкости. Это подтверждает необходимость оптимизации режимов облучения в зависимости от истории переработки и примесного состава вторичных полимеров (International Atomic Energy Agency, 2020).

Для оценки эффективности радиационной сшивки полимеров широко используется анализ зависимости степени сшивки (гель-фракции) от поглощённой дозы ионизирующего излучения. На рисунке 1 представлена обобщённая типичная кривая зависимости степени сшивки (%) от дозы облучения (кГр) для полиэтилена, построенная на основе данных экспериментальных исследований, представленных в литературе (Makarov & Krivchenko, 2020; Cataldo et al., 2007). Кривая иллюстрирует характерный рост степени сшивки с увеличением дозы до достижения максимума, за которым при дальнейшем облучении начинает доминировать цепное расщепление.



**Рисунок 1.** Обобщённая зависимость степени сшивки полиэтилена от дозы ионизирующего излучения

Как видно из графика, при увеличении дозы облучения до 150 кГр наблюдается практически линейный рост степени сшивки, достигающий пика (около 88–90%). Это указывает на активное формирование поперечных связей между макромолекулами. Однако при дальнейшем увеличении дозы (свыше 150–175 кГр) степень сшивки начинает снижаться, что объясняется началом процессов деструкции и разрушения полимерной цепи из-за переоблучения. Таким образом, для получения оптимальных характеристик радиационно-сшитого материала необходимо строго контролировать дозу облучения, ориентируясь на максимум кривой сшивки (Elbarbary et al., 2017; Ashfaq et al., 2021).

Особое внимание уделяется влиянию остаточных стабилизаторов (Cleland et al., 2003; Gao et al., 2020), пигментов и наполнителей на эффективность сшивки (Lenfeld et al., 2020). Авторами работы (Naikwadi et al., 2022; Khalil, 2023) показано, что предварительная очистка и дегазация вторичных полимеров существенно повышают степень образования гелевой фракции и снижают долю деструктивных процессов. Кроме того, в ходе радиационного воздействия происходит частичная деструкция низкомолекулярных загрязнений, что способствует улучшению однородности материала и снижению запаха, что важно при использовании вторичных полимеров в потребительской сфере (Ahmed et al., 2024; Calina et al., 2025).

Необходимо отметить, что исследования радиационной сшивки не ограничиваются термопластами. В настоящее время усиливается интерес к модификации термопластичных эластомеров, полимерных сплавов, биоразлагаемых полимеров – полилактидов (PLA) и полигидроксиалканоатов (PHA), а также материалов на основе возобновляемого сырья. Эти направления находят применение в упаковке, медицине, электронике и биоинженерии, где требуется высокоточная настройка свойств материала при минимальном воздействии посторонних реагентов (Kalapakdee, 2013; Coqueret, 2024).

В последние годы опубликовано значительное количество исследований, демонстрирующих, что радиационная сшивка первичных и вторичных полимеров при корректной настройке параметров облучения (тип излучения, доза, скорость дозы, атмосферные условия, температура) и использовании коагентов (например, ТАИС) представляет собой эффективный метод направленной модификации эксплуатационных характеристик полимерных материалов (Manas et al., 2018). Наиболее отчетливо фиксируются такие эффекты, как повышение модуля упругости и термостойкости, снижение коэффициента трения и удельного износа, стабилизация межфазных взаимодействий (матрица – наполнители/фазы) и увеличение долговечности. Вместе с тем наблюдается характерный компромисс в виде снижения относительного удлинения при разрыве на высоких степенях сшивки (Kurbanova et al., 2023; Mo et al., 2013). Для вторичных полимеров радиационная

обработка дополнительно выполняет функцию выравнивания изменяющихся свойств рециклатов и расширяет возможности их практического применения (Hara, 2022; Darwis et al., 2015).

Ряд экспериментальных исследований демонстрирует, что эффект радиационной сшивки существенно зависит от типа полимера, условий облучения и состава системы. Так, Kurbanova и соавт. (2023) показали, что электронно-лучевая обработка листов полиэфирэфиркетона (PEEK) в диапазоне доз 50–400 кГр приводит к снижению коэффициента трения (минимум при ~100 кГр), уменьшению удельной скорости изнашивания и росту микротвёрдости при более высоких дозах, что указывает на формирование более жёсткой и износостойкой поверхностной структуры.

Для полиолефинов наблюдаются иные закономерности. Gheysari и соавт. (2024) установили, что  $\gamma$ -облучение LDPE в диапазоне 40–120 кГр сопровождается ростом степени сшивки (гель-фракции) и прочности при растяжении при одновременном снижении относительного удлинения, тогда как термические параметры плавления и кристаллизации изменяются незначительно. Кроме того, отмечено улучшение эффекта памяти формы при умеренных дозах облучения (Fujisato et al., 1999; Lee et al., 2021).

В системах полимерных смесей радиационная обработка может способствовать укреплению межфазного взаимодействия. Rahaman и соавт. (2023) показали, что электронно-лучевая обработка смесей линейного полиэтилена низкой плотности (LLDPE) с полидиметилсилоксаном (PDMS) в диапазоне 50–250 кГр приводит к формированию прочной адгезии между силиконовой фазой и полиэтиленовой матрицей, сопровождаемой изменением морфологии и улучшением диэлектрических свойств, релевантных для кабельной изоляции. Аналогично, Rekel и соавт. (2022) показали, что электронно-лучевая сшивка смесей HDPE с полиуретаном приводит к повышению термостабильности и прочности при одновременном снижении удлинения при разрыве, что отражает характерный компромисс между жёсткостью и пластичностью.

Для полипропилена эффективная сшивка часто требует введения коагентов. Так, Ovsík и соавторы (2023) показали, что добавление триаллилизотиоцианурата (ТАИС) и последующее электронное облучение инициируют формирование пространственной сетки в полипропилене (PP), что приводит к улучшению микромеханических характеристик формованных образцов. Ряд исследований посвящённых нанокомпозитам на основе полиэтиленвинилацетат (PEVA) и LDPE, подтвердил, что  $\gamma$ -облучение, в том числе в сочетании с функциональными добавками, обеспечивает улучшение комплекса структурных, термических и электрических характеристик (Nature, 2023; RSC, 2024). В обобщённом виде можно заключить, что для полиолефинов и инженерных термопластов (PEEK, PP) радиационная сшивка в диапазоне доз ~50–300 кГр приводит к росту модуля упругости, износостойкости и термостойкости при сопутствующем снижении относительного удлинения и ударной вязкости. Для систем с низкой склонностью к сшиванию (PP, PA) ключевую роль играют коагенты (ТАИС и др.), что согласуется с современными обзорными публикациями по модификации термопластов ионизирующим излучением (MDPI, 2023; PMC, 2024).

Аналогичные тенденции наблюдаются и для вторичных полимерных материалов. Так, Lee и соавторы (2023) сопоставили  $\gamma$ -облучение первичного и переработанного полиамида-6 (PA-6) и выявили существенные различия в перерабатываемости и реологических характеристиках, включая вязкость расплава, что имеет принципиальное значение для подбора дозового диапазона и стабилизации свойств рециклатов. Zhou и соавт. (2012) установили, что электронно-лучевая модификация отходов акрилонитрил-бутадиен-стирола (wABS) с использованием 1,3-фенилен-бис-оксазолина (1,3-PBO) приводит к усилению межмолекулярных взаимодействий (IMI), улучшению прочностных и ударных характеристик и изменению морфологии разрушения, что подтверждает перспективность вторичного использования ABS-отходов. В работе Ashfaq и соавт. (2021) установлено, что  $\gamma$ -индуцированная сшивка вторичного LLDPE в диапазоне доз 0–90 кГр позволяет получать

материалы с улучшенными сорбционными характеристиками по отношению к органическим загрязнителям, при этом микроструктурные и механические изменения коррелируют с функциональными свойствами адсорбции.

Таким образом, радиационная сшивка вторичных полимеров может существенно повысить их эксплуатационный и функциональный потенциал при корректном подборе режимов обработки. Однако допустимый дозовый диапазон для рециклатов, как правило, оказывается более узким и в большей степени зависит от степени деградации и уровня загрязнения исходного материала. В ряде случаев требуется применение коагентов (ТАИС, 1,3-РВО и др.), а также строгий контроль дозиметрических и атмосферных условий обработки. Для полиолефинов в типичных условиях оптимальный диапазон доз часто лежит в пределах порядка 50–200(300) кГр, при которых достигается благоприятное сочетание роста модуля упругости, прочности и износостойкости. При превышении этих значений или при проведении процесса в окислительной атмосфере возрастает вероятность деструкции, сопровождаемой снижением относительного удлинения.

По данным морфологических исследований, выполненных методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), радиационная обработка приводит к упрочнению межфазных границ и более устойчивому удержанию дисперсных фаз в полимерной матрице. Эти выводы согласуются с обобщающими обзорами по воздействию ионизирующего излучения на термопласты (Billiet et al., 2013; Covas et al., 2011).

### *2.1. Области применения радиационной сшивки*

Современные области применения радиационной сшивки охватывают широкий спектр отраслей, включая электротехнику, строительство, автомобилестроение, упаковочную промышленность, медицину и экологически ориентированные технологии переработки пластмасс. В первую очередь технология была адаптирована к первичным термопластичным полимерам, таким как полиэтилен низкой и высокой плотности (LDPE и HDPE), полипропилен (PP), поливинилхлорид (PVC), этиленвинилацетат (EVA), политетрафторэтилен (PTFE), а также их сополимеры (Ishihara et al., 2020; Khodkar et al., 2011). В этом случае основной задачей радиационной сшивки является повышение эксплуатационных характеристик – термостойкости, стойкости к механическому износу, сопротивления трещинообразованию под нагрузкой, а также улучшение барьерных и электроизоляционных свойств. Одним из характерных примеров является производство термоусаживаемых труб и муфт из радиационно-сшитого полиэтилена, используемых в системах горячего водоснабжения и отопления, где требуется сочетание гибкости и устойчивости к температурам до 200 °С (Krieguer et al., 2024; Jabbari & Nozari, 2000).

В электротехнической промышленности радиационно-сшитые полиолефины широко используются в качестве кабельной изоляции, особенно в условиях повышенных температур и влажности. Например, LDPE, подвергнутый электронно-лучевой обработке в диапазоне доз порядка 150–200 кГр, демонстрирует снижение поляризуемости и токов утечки, а также повышенную устойчивость к электрическому пробое. В упаковочной промышленности технология применяется для получения тонких, прочных и термостабильных плёнок на основе этиленвинилацетата (EVA) и полиолефинов, используемых для упаковки пищевых продуктов, медицинских изделий и электроники (Khosroshahi et al., 2025; Jaganathan et al., 2015).

В медицинских применениях радиационно-сшитые материалы используются при изготовлении имплантатов, катетеров и мембран, где требуется стабильность свойств при последующей радиационной стерилизации и химическая инертность по отношению к биологическим средам. Следует подчеркнуть, что в данном случае радиационная сшивка и стерилизация представляют собой разные технологические стадии с различными дозовыми окнами (Hasan et al., 2024; Gluszewski et al., 2018).

С развитием концепции устойчивого производства радиационная сшивка всё шире применяется и в отношении вторичных полимеров. Учитывая ухудшение механических и оптических свойств в результате термической и механической переработки, задача восстановления структуры и повышения эксплуатационного потенциала рециклатов выходит на первый план. Наибольшее внимание уделяется вторичному полиэтилену и полипропилену, которые составляют основную долю твёрдых бытовых пластиковых отходов. При корректном подборе дозы облучения (типично в диапазоне 100–250 кГр для полиолефинов) возможно частичное восстановление прочности, повышение стойкости к термоокислению и термической деформации, а также снижение водопоглощения. В строительной индустрии вторично сшитый полиэтилен применяется для изготовления технических плит, гидроизоляционных покрытий и трубных соединений, сопоставимых по характеристикам с изделиями из первичного сырья (Krzeminski et al., 2010; Leisen et al., 2015). В сельском хозяйстве радиационно-модифицированные полимеры используются в дренажных системах, парниковых укрытиях и мульчирующих материалах с повышенной стойкостью к ультрафиолетовому излучению (Choi et al., 2009; Mendizabal et al., 1996).

Кроме того, метод радиационной сшивки применяется при создании композитных материалов и полимерных сплавов, где требуется сочетание жёсткости, эластичности и химической инертности. Радиационно-модифицированные полиолефины демонстрируют повышенную совместимость с наполнителями (талк, графит, микрокальцит), что позволяет получать армированные материалы для автомобильной и авиационной промышленности. Перспективным направлением является также радиационная модификация биоразлагаемых и возобновляемых полимеров, включая полилактид (PLA), полигидроксиалканоаты (PHA) и термопластичный крахмал, где низкодозовое облучение может способствовать структурной стабилизации и улучшению эксплуатационной надёжности (Stephen et al., 2006).

Инновационным направлением остаётся разработка радиационно-сшитых мембран и ионообменных материалов для электрохимических приложений, включая топливные элементы, аккумуляторы и системы водоочистки. Применение радиационной технологии позволяет варьировать пористость, смачиваемость и электропроводность мембранной структуры (Voit et al., 2010; Novikov et al., 2019).

Таким образом, радиационно-сшитые полимеры находят применение в широком спектре отраслей – от электроники и медицины до строительства и переработки отходов. Их использование обеспечивает технологические преимущества по сравнению с традиционными материалами, особенно в условиях растущих требований к долговечности, надёжности и экологической безопасности продукции (Tsai et al., 2021; Ovsík et al., 2019).

## *2.2. Механические свойства первичных и вторичных полимеров после радиационной сшивки*

Радиационная сшивка формирует в полимерной матрице пространственную сеть, что приводит к перераспределению нагрузки между макромолекулярными цепями и ограничению их относительного скольжения. На макроуровне это, как правило, проявляется ростом модуля упругости и твёрдости, снижением ползучести и скорости релаксации напряжений, а также повышением размерной стабильности при длительном нагружении. Одновременно вследствие уменьшения подвижности цепей и укорочения путей деформации уменьшается предельное удлинение при разрыве; изменения прочности при растяжении и ударной вязкости носят, как правило, нелинейный характер и зависят от дозы облучения и химической природы полимера (Manas et al., 2018; Rellve et al., 2021).

Реологический и механический отклик во многих полимерных системах носит колоколообразный характер: при низких дозах облучения преобладают процессы сшивки, что сопровождается упрочнением материала (увеличение модуля хранения  $E'$  по данным динамического механического анализа (DMA), рост прочности и предела текучести, снижение ползучести). При превышении оптимального дозового окна возрастает вклад процессов цепного расщепления, что может приводить к охрупчиванию материала и снижению ударной

вязкости. Существенное влияние оказывают атмосфера облучения (присутствие кислорода стимулирует радиационное окисление и трещинообразование), скорость дозы, температура и наличие коагентов, смещающих баланс между сшивкой и деструкцией (Touati et al., 2007; Ramaraj, 2007).

Радиационная сшивка преимущественно протекает в аморфных областях полимера, «фиксируя» подвижность межламеллярных связей и усиливая роль связующих молекулярных фрагментов между кристаллитами. Для LDPE и EVA это проявляется в выраженном повышении сопротивления ползучести и термомеханической стабильности; в HDPE эффект особенно заметен при длительном нагружении, где подавляется вторичная ползучесть. В случае полипропилена конкуренция процессов сшивки и деструкции выражена сильнее, и достижение прироста прочности и ударной вязкости возможно лишь в узких дозовых окнах и/или при использовании коагентов. Для PET и других полиэфилов при  $\gamma$ - и электронно-лучевом облучении чаще доминирует цепное расщепление, поэтому необходима аккуратная настройка доз и модификация состава (компатибилизация, стабилизация) для предотвращения охрупчивания (Ping et al., 2011; Ortega et al., 2023).

Для вторичных полимеров наблюдаются в целом сходные закономерности изменения свойств под действием радиационной сшивки, однако оптимальные дозовые диапазоны, как правило, оказываются более узкими и в большей степени зависят от степени дегградации, загрязнённости и истории переработки исходного материала (Clough, 2001).

Для первичных полиолефинов, прежде всего полиэтилена (LDPE, LLDPE, HDPE), радиационная сшивка обычно сопровождается ростом начального модуля упругости, снижением деформации ползучести и повышением стойкости к растрескиванию под напряжением (ESCR), при относительно умеренных изменениях прочности при разрыве и снижении относительного удлинения. В случае полипропилена (ударопрочного PP) возможно увеличение модуля и температуры тепловой деформации (HDT), однако без применения коагентов и антиоксидантов возрастает риск охрупчивания, проявляющегося в снижении удлинения при разрыве и ударной вязкости. Сополимеры типа EVA и полиолефиновые эластомеры характеризуются высокой склонностью к сшивке; для них типичен рост упругой составляющей деформации и повышение стойкости к циклическим нагрузкам, тогда как баланс между прочностью и эластичностью определяется содержанием винилацетатных фрагментов и дозой облучения. Для полиамидов и полиэфилов радиационная обработка вызывает дозозависимые изменения, при которых возможен прирост модуля упругости при одновременном риске снижения ударной вязкости; в этих системах особенно критичны условия облучения (влажность, присутствие кислорода) и применение стабилизаторов.

Для вторичных полимеров характерны более широкое распределение молекулярных масс, наличие остаточных окислительных дефектов, загрязнений и ухудшенная межфазная адгезия в смесях, что определяет их повышенную чувствительность к режимам облучения. В этих системах радиационная сшивка используется, во-первых, для реологической стабилизации – ограничения роста показателя текучести расплава при повторных переработках и снижения чувствительности к термоокислительной дегградации, и, во-вторых, для частичного восстановления механических свойств за счёт повышения модуля упругости, ползучестойкости и локального «сшивания» межфазных областей в смесях типа PE/PP (Ogul, 2022).

При этом относительное удлинение при разрыве у рециклатов, как правило, снижается быстрее, чем у первичных аналогов, что отражает накопление дефектов цепной структуры. Поэтому для смесей вторичных полиолефинов целесообразно применение компатибилизаторов и коагентов, а также антиоксидантной защиты и дегазации для минимизации пост-облучательного окисления и деструкции (Rimdisit et al., 2012).

Данные динамического механического анализа (DMA) показывают, что после радиационной сшивки модуль хранения  $E'$  в температурной области выше температуры стеклования ( $T_g$ ) возрастает, тогда как амплитуда пика  $\tan \delta$  уменьшается, что отражает

ограничение подвижности макромолекулярных цепей и снижение внутренних потерь. Эти изменения коррелируют с ростом усталостной долговечности и уменьшением гистерезисных потерь. В режиме малоциклового усталости наблюдается увеличение числа циклов до зарождения трещины, а в многоциклового усталости – смещение кривых S-N в область более высоких напряжений, что указывает на повышение сопротивления усталостному разрушению. Эффект наиболее выражен для полиолефинов с развитой аморфной фазой (Novikov et al., 2018).

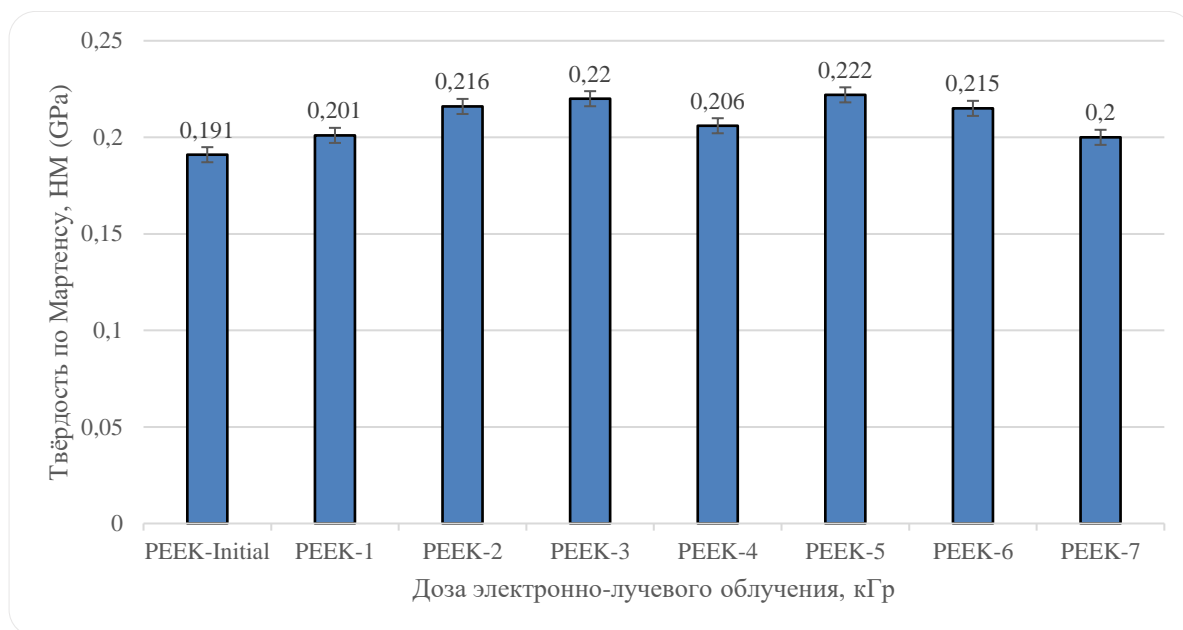
Изменения ударной вязкости носят нелинейный характер. При умеренных степенях сшивки возможен её рост за счёт подавления микроползучести и стабилизации морфологии, тогда как при переоблучении наблюдается снижение вследствие охрупчивания аморфной фазы и накопления дефектов цепной структуры. Для полипропилена и полиэтилентерефталата существенны скорость дозы и атмосфера облучения, тогда как для EVA и LDPE чаще наблюдается сохранение или улучшение ударной вязкости в оптимальных дозовых диапазонах (Oshima et al., 1997).

Анализ литературы позволяет сформулировать ряд практических соображений. Подбор дозового окна целесообразно осуществлять для каждого конкретного полимера или смеси с учётом целевых эксплуатационных свойств и допустимого уровня охрупчивания. Для вторичных полимеров рекомендуется предусматривать стабилизацию антиоксидантами, применение коагентов и компатибилизаторов в смесях, а также контроль показателя текучести расплава и летучих продуктов деградации. В ряде работ подчёркивается важность пост-облучательного контроля свойств через 1–4 недели для учёта эффектов послеоблучательного окисления и дополнительного формирования сетки, а также оценки трибологических и ударных характеристик при температурах и скоростях деформации, релевантных условиям эксплуатации изделия (Pirvu et al., 2024; Svoboda, 2016).

В целом радиационная сшивка позволяет повысить жёсткость, ползучесть и термомеханическую стабильность как первичных, так и вторичных полимеров при корректном подборе дозы облучения и состава материала. Возможным компромиссом при этом является уменьшение относительного удлинения и частичная утрата термопластичных свойств, что необходимо учитывать при последующей переработке. Для вторичных полимеров корректно настроенная радиационная сшивка может служить эффективным инструментом восстановления эксплуатационных характеристик и поддержания качества материала при многократной переработке (Svarcova et al., 2025; Haji-Saeid et al., 2005).

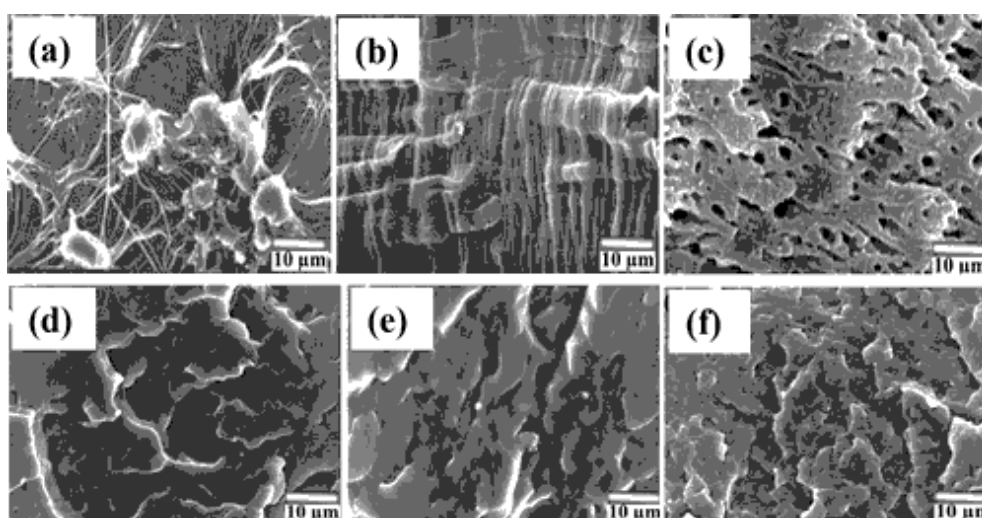
В качестве иллюстрации экспериментальной реализации следует привести работу Kurbanova и соавт. (2023), в которой исследовано влияние электронно-лучевого облучения (энергия электронов 2,7 МэВ; суммарные дозы 50–400 кГр) на механические и трибологические свойства листов полиэфирэфиркетона (PEEK). Показано, что коэффициент трения уменьшается и достигает минимума порядка 0,18 при дозе около 100 кГр, тогда как удельная скорость изнашивания снижается более чем втрое – с  $\sim (13,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$  до  $\sim (4,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>·Н<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> при дозе 200 кГр. Микротвёрдость возрастает с 0,191 до 0,222 ГПа при дозе 300 кГр. Структурный анализ выявил уширение рентгеновских дифракционных пиков при сохранении кристаллической решётки, а данные дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) и термогравиметрического анализа (TGA) указывают на незначительный сдвиг температуры плавления и сохранение температуры термической деградации в пределах экспериментальной погрешности, за исключением образцов, обработанных при максимальной дозе 400 кГр.

На рисунке 2 представлены значения твёрдости по Мартенсу (НМ) образцов PEEK до и после электронно-лучевой обработки. Данные заимствованы и адаптированы из работы Kurbanova и соавт. (2023). Облучение приводит к росту микротвёрдости всех образцов по сравнению с исходным материалом; максимальное значение ( $\approx 0,222$  ГПа) наблюдается для образца PEEK-5, соответствующего дозе 300 кГр, тогда как для необлучённого PEEK микротвёрдость составляет 0,191 ГПа.



**Рисунок 2.** Изменение твёрдости по Мартенсу (НМ) РЕЕК в зависимости от дозы электронно-лучевого облучения

В работе Schneider и соавт. (2024) исследовано влияние электронно-лучевой обработки (порядка 50–300 кГр) на морфологию и свойства смесей линейного полиэтилена низкой плотности (LLDPE) и полидиметилсилоксана (PDMS), а также нанокомпозитов на их основе. После облучения, в оптимальном дозовом диапазоне, наблюдается рост гелевой фракции и усиление межфазной адгезии, сопровождаемые увеличением прочности при разрыве и модуля упругости при одновременном снижении относительного удлинения. По данным динамического механического анализа, возрастает модуль хранения, тогда как положения термических переходов изменяются незначительно, что согласуется с переходом от двухфазной морфологии к более связной, эффективно однофазной структуре.



**Рисунок 3.** СЭМ-изображения (a) LL100, (b) PD100, (c) LL50 до облучения электронным пучком и (d) LL100, (e) PD100 и (f) LL50 после облучения электронным пучком при 100 кГр

Морфологические изменения иллюстрируются на рисунке 3, где показаны СЭМ-изображения чистого LLDPE, PDMS и их смеси до и после электронно-лучевого облучения. До обработки наблюдается отчётливо выраженная двухфазная структура с дисперсными доменами силиконового каучука в полиэтиленовой матрице, тогда как после облучения и последующего селективного травления домены PDMS сохраняются и не удаляются растворителем, что указывает на их сшивку и прочное прикрепление к матрице LLDPE. В результате формируется более однородная морфология с повышенной межфазной связностью, что коррелирует с ростом механических и реологических характеристик материала.

В таблице 1 представлены сравнительные данные по влиянию радиационной сшивки на механические свойства первичных и вторичных полимерных материалов на основе обобщения литературных источников.

**Таблица 1.** Сравнительные данные по механическим свойствам первичных и вторичных полимеров после радиационной сшивки

Полимер/система	Диапазон доз (кГр)	Основные эффекты	Компромиссы	Источник
PEEK	50–400	↓коэф. трения (~0.18 при 100 кГр), ↑твёрдость, ↑износостойкость	Оптимум 200–300 кГр; при 400 кГр – деградация	Kurbanova et al., 2023 (Polymers)
LDPE	40–120	↑ $\sigma_b$ (+51% при 120 кГр), ↓ $\epsilon_r$ , улучшение <i>shape-memory</i>	Рост свойств до 120 кГр, затем охрупчивание	Wang et al., 2013 (Journal of Applied Polymer Science)
HDPE/PU	50–250	↑прочность, ↑термостабильность, ↓ $\epsilon_r$	Компромисс «жёсткость–растяжимость»	Jeong et al., 2022 (Polymers)
LLDPE/PDMS	50–300	↑адгезия фаз, ↑ $\sigma_b$ и модуль, ↓ $\epsilon_r$ , стабильность морфологии	Увеличение жёсткости при падении эластичности	Rahaman et al., 2023 (ACS Omega)
PP+TAIC	50–200	Формирование сетки, ↑микромеханика	Требуется TAIC; без него охрупчивание	Ovsik et al., 2021 (Materials)
PA-6 (virgin/recyc.)	50–200	Стабилизация реологии, ↑перерабатываемость	Зависит от исходного состояния рециклата	Zhao et al., 2003 (Carbohydrate Polymers)
wABS + 1,3-PBO	50–250	↑прочность, ↑ударная вязкость, укрепление межцепных связей	Оптимум ~100–200 кГр	Steleescu et al., 2018 (Polymers)
rLLDPE	0–90	Образование геля, ↑адсорбция органических веществ	Узкое дозовое окно, при превышении охрупчивание	Sutekin et al., 2019 Applied Radiation and Isotopes

Как следует из приведённых данных, для первичных полимеров радиационная сшивка, как правило, приводит к увеличению модуля упругости и твёрдости, снижению ползучести и повышению усталостной и износостойкости. Для вторичных материалов дополнительным эффектом является укрепление межфазных границ и стабилизация реологических характеристик, что способствует повышению механической надёжности композиций на основе PE/PP при повторной переработке. Максимальный эффект достигается в оптимальном дозовом диапазоне; при этом возможным компромиссом является снижение относительного

удлинения и перерабатываемости, что требует подбора дозы и условий облучения с учётом целевых свойств материала (Ghobashy et al., 2016; Gao et al., 2017).

### 2.3. Техничко-экономическая эффективность и преимущества радиационной сшивки

Радиационная сшивка рассматривается в литературе как один из промышленных методов модификации полимерных материалов, который может обеспечивать технологические и потенциальные экономические преимущества по сравнению с химическими способами сшивки в ряде прикладных областей. К ключевым особенностям метода относится возможность регулирования степени сшивки за счёт параметров облучения (доза, мощность пучка, время воздействия) без применения химических инициаторов, растворителей и побочных реагентов. Это снижает потребность в последующей очистке продукции и обращении с отходами и делает технологию потенциально применимой в областях с жёсткими санитарными и экологическими требованиями, включая медицинские изделия и материалы для пищевой упаковки (Tretinnikov et al., 1998; Schneider et al., 2019).

Дополнительным технологическим преимуществом является возможность проведения радиационной обработки при комнатной температуре, что отличает её от термохимических методов, где сшивка обычно осуществляется при повышенных температурах (порядка 150–200 °С и выше). Вместе с тем энергетическая и экономическая эффективность радиационной обработки существенно зависят от типа оборудования, требуемой дозы, геометрии изделий и коэффициента загрузки линии, что ограничивает универсальность количественных оценок и требует явного указания допущений (Berejka, 2010).

В литературе экономические показатели электронно-лучевой обработки (e-beam), включая стерилизацию и радиационную модификацию полимеров, как правило, приводятся в виде диапазонов оценок при заданных условиях эксплуатации. По данным обзорных работ и отчётов Международного агентства по атомной энергии (IAEA), удельная стоимость e-beam-обработки пластиковых изделий может варьироваться в пределах приблизительно 1–5 USD/кг в зависимости от требуемой дозы (типично 10–25 кГр для стерилизации и десятки–сотни кГр для радиационной сшивки термопластов), производительности линии (десятки–сотни кг/ч), формы и толщины изделий, а также коэффициента загрузки оборудования и логистики процесса (IAEA, 2015). Важно подчеркнуть, что стерилизационные дозы (обычно 15–25 кГр) и дозы радиационной сшивки термопластов относятся к разным технологическим задачам и не должны рассматриваться в одном экономическом контексте.

Капитальные и эксплуатационные затраты электронно-лучевых установок. Капитальные затраты (CAPEX) на создание электронно-лучевой линии включают стоимость ускорителя, радиационной защиты, систем транспортировки, дозиметрии и сопутствующей инфраструктуры. По данным технических обзоров и отраслевых публикаций, стоимость промышленного электронного ускорителя мощностью порядка 50–100 кВт с необходимой инфраструктурой оценивается ориентировочно в диапазоне ≈1,5–3,0 млн USD, при этом конкретные значения зависят от конфигурации линии, требований к радиационной безопасности и региональных условий.

Эксплуатационные затраты (OPEX) включают расходы на электроэнергию, персонал, техническое обслуживание, дозиметрический контроль и амортизацию оборудования. При типичных тарифах на электроэнергию (≈0,05–0,10 USD/кВт·ч) энергозатраты для ускорителя мощностью 50–100 кВт могут составлять порядка (0,1–0,3) млн USD в год, однако итоговая себестоимость обработки существенно зависит от фактической загрузки оборудования, режима работы и организации производственного процесса (Berejka, 2010; IAEA, 2015).

Энергоэффективность и экологические аспекты. Сравнительные оценки энергопотребления показывают, что электронно-лучевые процессы в ряде случаев обладают более высокой энергоэффективностью по сравнению с некоторыми традиционными термохимическими технологиями, особенно в процессах поверхностной модификации, отверждения покрытий и текстильной обработки. В частности, в обзорах указывается, что e-

beam-методы могут обеспечивать снижение удельного энергопотребления и связанных с ним выбросов CO<sub>2</sub> по сравнению с растворными или термическими процессами, однако такие сравнения корректны только при сопоставимых функциональных результатах и строго заданных условиях процесса (Wach et al., 2003; Lee et al., 2023). В этом контексте радиационная обработка часто рассматривается как потенциально «зелёная» технология, поскольку она не требует использования растворителей и может быть интегрирована в замкнутые производственные циклы. Вместе с тем количественные оценки сокращения выбросов CO<sub>2</sub> и энергозатрат остаются чувствительными к методике расчёта и принятым допущениям, что подчёркивается в современных обзорах (Krieguer, 2024).

Применение к первичным и вторичным полимерам. В отношении первичных термопластов радиационная сшивка используется для расширения температурного и эксплуатационного диапазона изделий. Так, радиационно-сшитый полиэтилен (PEX) способен сохранять механическую стабильность при температурах до ~200 °С, тогда как обычный полиэтилен размягчается при ~90–110 °С. Это позволяет применять более тонкостенные конструкции и повышать надёжность изделий, что в ряде случаев компенсирует более высокую стоимость обработки (Yamashita et al., 2016; Zhao et al., 2021).

Для вторичных полимеров радиационная сшивка рассматривается как один из инструментов компенсации деградации структуры, возникающей при повторной переработке. Экспериментальные исследования показывают, что при оптимизированных дозах (порядка 100–250 кГр, в зависимости от полимера) возможно формирование пространственной сетки без выраженной деструкции, что делает метод сопоставимым по эффективности с использованием химических модификаторов (Kaminskaya et al., 2008). Однако экономическая целесообразность такого подхода требует индивидуальной оценки с учётом стоимости энергии, оборудования и альтернативных технологий модификации.

Сравнение радиационной сшивки с химическими методами (например, пероксидной сшивкой) показывает, что радиационный подход обеспечивает более гибкое управление степенью сшивки за счёт изменения параметров облучения. Вместе с тем утверждения о безусловном экономическом преимуществе радиационной технологии по сравнению с химическими методами не являются универсальными и зависят от масштаба производства, типа полимера и требований к конечному продукту. В литературе подчёркивается, что корректное технико-экономическое сравнение возможно только при анализе конкретных производственных сценариев (Svarcova et al., 2025; Calina et al., 2025).

В целом радиационная сшивка рассматривается как перспективная технологическая платформа для модификации как первичных, так и вторичных полимеров. Её применение может быть оправдано при соответствующем масштабе производства и строгом учёте эксплуатационных и экологических требований. В условиях ужесточения экологического регулирования и роста интереса к циркулярной экономике значимость таких технологий, вероятно, будет возрастать (Zhang, 2022; Zhou, 2012).

### 3. Ограничения и риски радиационной сшивки

Несмотря на продемонстрированные технологические и эксплуатационные преимущества радиационной сшивки полимеров, её практическое применение требует учёта ряда ограничений и потенциальных рисков, связанных как с физико-химической природой радиационного воздействия, так и с особенностями переработки и эксплуатации получаемых материалов.

#### *Радиационное окисление (роль O<sub>2</sub>)*

При радиационной сшивке полимеров в присутствии кислорода значительную роль играют процессы радиационно-индуцированного окисления, обусловленные реакциями макрорадикалов с молекулярным O<sub>2</sub>. Образующиеся пероксидные и гидропероксидные группы (-OO•, -OOH) инициируют вторичные цепные реакции, приводящие к частичной

деструкции макромолекулярных цепей и изменению структуры полимерной сетки (Singh et al., 2014).

В таблице 2 приведено влияние атмосферы облучения на характер радиационно-индуцированных процессов и эксплуатационные свойства радиационно-сшитых полимеров, включая доминирующие механизмы окисления и связанные с ними изменения механических характеристик.

**Таблица 2.** Влияние кислорода на свойства радиационно-сшитых полимеров

Условия облучения	Доминирующие процессы	Изменение свойств
Воздух	Пероксирадикалы, окисление	↓ $\epsilon_r$ , ↑ хрупкость, трещины
Азот	Сшивка преобладает	Более стабильная механика
Вакуум	Максимум сшивки	Минимум деградации
Воздух + АО	Частичное подавление окисления	Ограниченный эффект при высоких дозах

Образующиеся в присутствии  $O_2$  пероксидные и гидропероксидные структуры сохраняют химическую активность и после завершения радиационного воздействия, что приводит к развитию пост-облучательных процессов и обуславливает временную нестабильность свойств радиационно-сшитых материалов.

#### *Пост-облучательное старение*

Пост-облучательное старение радиационно-сшитых полимеров связано с наличием долгоживущих макрорадикалов и продуктов радиационного окисления, способных инициировать вторичные цепные реакции в период хранения. Экспериментально установлено, что для полиолефинов (PE, PP) концентрация активных радикальных центров может сохраняться в течение  $10^2$ – $10^3$  часов, что сопровождается постепенными изменениями механических, реологических и термомеханических характеристик в течение нескольких недель и месяцев после обработки.

В указанный период для полиэтилена и этиленвинилацетата наблюдается снижение относительного удлинения при разрыве на 15–40 % при сравнительно малых изменениях прочности, тогда как для полипропилена пост-облучательные эффекты выражены сильнее и могут сопровождаться дополнительным снижением ударной вязкости на 20–50 %. Реологические параметры также изменяются во времени: показатель текучести расплава, как правило, снижается на 10–30 % в течение первых 1–3 недель после облучения вследствие продолжающегося роста гелевой фракции и уплотнения пространственной сетки.

Выраженность пост-облучательного старения определяется условиями облучения и хранения и существенно усиливается при обработке и хранении в присутствии кислорода. Облучение в инертной атмосфере, применение антиоксидантов и снижение времени контакта материала с кислородом приводят к уменьшению амплитуды временных изменений свойств и более быстрой стабилизации характеристик радиационно-сшитых полимеров (Relleve et al., 1997).

#### *Перерабатываемость сшитых материалов*

Увеличение степени радиационной сшивки приводит к росту гелевой фракции и резкому снижению текучести расплава, что является одним из ключевых технологических ограничений данной методики. При достижении гелевой фракции порядка 20–30 % наблюдается значительное снижение показателя текучести расплава, затрудняющее переработку методом экструзии, а при значениях выше 40–50 % материал фактически утрачивает термопластичное поведение и способность к повторному плавлению. В этих условиях переработка стандартными методами экструзии, литья под давлением и термоформования становится

технологически невозможной, поскольку материал не переходит в вязкотекучее состояние и не способен к формированию однородного расплава.

Данное ограничение приобретает особую значимость для вторичных полимеров и многокомпонентных систем, где наличие остаточных примесей, продуктов предшествующей термоокислительной деградаци и неоднородное распределение молекулярной массы приводят к сужению допустимого дозового окна радиационной обработки. В таких системах даже умеренное увеличение дозы может сопровождаться непропорционально быстрым ростом гелевой фракции и потерей перерабатываемости, что существенно осложняет промышленную реализацию технологии и снижает потенциал последующего механического рециклинга.

#### 4. Радиационная сшивка полимеров в Казахстане

Радиационная обработка полимеров в Республике Казахстан осуществляется на ограниченном числе специализированных площадок, оснащённых промышленными ускорителями и инфраструктурой радиационной безопасности. Ведущей организацией в данной области является Республиканское государственное предприятие «Институт ядерной физики» (ИЯФ, Алматы), оснащённое электронно-лучевыми установками, системами дозиметрического контроля и сертифицированной системой менеджмента качества, соответствующей международным стандартам, в том числе ISO 11137, и обладающее инфраструктурой для радиационной модификации полимерных материалов. Важно подчеркнуть, что в рамках радиационной обработки на данных площадках реализуются два принципиально различных класса процессов: радиационная стерилизация и радиационная модификация (включая сшивку) полимеров. Радиационная стерилизация направлена на снижение биологической нагрузки и достижение заданного уровня стерильности (Sterility Assurance Level, SAL) и осуществляется, как правило, при дозах порядка 15–25 кГр в соответствии с международными стандартами (ISO 11137, ISO/ASTM 51649). Напротив, радиационная модификация и сшивка полимеров преследуют цель изменения структуры и эксплуатационных свойств материала и требуют существенно более высоких доз, обычно в диапазоне десятков–сотен кГр, в зависимости от типа полимера, наличия соагентов, атмосферы облучения и требуемой степени сшивки.

На базе ИЯФ в настоящее время промышленно реализуется радиационная стерилизация медицинских изделий, а также пилотные и контрактные проекты по радиационной модификации полимерных материалов, включая сшивку гидрогелей и отдельных термопластов. Реализация указанных направлений подтверждается официальной документацией института и материалами региональных программ МАГАТЭ (Международного агентства по атомной энергии), ориентированных на эксплуатацию электронно-лучевых установок, дозиметрическое сопровождение и внедрение систем качества.

Дополнительной площадкой является АО «Парк ядерных технологий» (Курчатов), где функционируют электронно-лучевые установки, используемые для стерилизации медицинской продукции и радиационной модификации полимерных изделий в опытно-промышленном и контрактном форматах.

Отдельно следует отметить ускорительный комплекс DC-60 (филиал ИЯФ, Астана), представляющий собой тяжёло-ионный циклотрон, применяемый преимущественно для формирования ионных треков в полимерных плёнках (например, PET) с последующим химическим травлением и получением трек-травлённых мембран. Данная технология относится к ионно-лучевой модификации и не является электронно-лучевой сшивкой термопластов в промышленном применении.

Как следует из таблицы 3, на практике в Республике Казахстан реализуются три основных направления применения радиационных технологий в отношении полимеров. Первое направление связано с электронно-лучевой сшивкой гидрогелей и других гидрофильных матриц с целью управления гелевой фракцией и степенью набухания при одновременном обеспечении стерильности изделий. Второе направление включает

электронно-лучевую модификацию и сшивку термопластов (PE, PP, EVA, PET), направленную на повышение термо- и износостойкости, снижение ползучести и реологическую стабилизацию, в том числе для вторичных полимерных материалов. Третье направление представлено ионно-лучевой модификацией плёнок PET с формированием ионных треков и их последующим проявлением методом селективного химического растворения, что позволяет получать трек-травлённые мембраны и функциональные композитные системы.

В таблице 3 приведён обзор основных площадок и характерных режимов радиационной сшивки полимеров в Республике Казахстан на основе открытых официальных источников и опубликованных данных.

**Таблица 3.** Площадки и режимы радиационной сшивки полимеров в Республике Казахстан

Площадка	Тип излучения	Полимерные системы	Типичные дозы сшивки (кГр)	Условия процесса
Алматы, РГП «Институт ядерной физики»	Электронный пучок	Гидрогели; PE, PP, EVA, PET	Гидрогели: 0,1–10; термопласты: 50–250	Воздух/ инертная атмосфера; возможно применение соагентов
Курчатов, АО «Парк ядерных технологий»	Электронный пучок	PE, PP, РЕЕК, функциональные композиты	50–300	Контролируемая атмосфера; серийная дозиметрия
Астана, филиал ИЯФ (DC-60)	Тяжёлые ионы	PET (Track-Etched Membrane)	-	Формирование треков и химическая обработка

Перспективы развития данной области связаны с интеграцией электронно-лучевых модулей в технологические линии экструзии и каландрирования, расширением номенклатуры полимерных материалов и изделий (включая кабельную изоляцию, геоматериалы и функциональную упаковку), а также с развитием и тиражированием стандартизированных процедур дозиметрии, контроля качества и межлабораторной калибровки дозиметрических систем.

## 5. Заключение

В настоящей обзорной работе рассмотрены физико-химические основы радиационной сшивки полимеров, её влияние на структуру и свойства различных полимерных систем, а также области применения и ограничения данного метода. Показано, что ионизирующее излучение инициирует образование активных радикалов в полимерной матрице, что при соответствующих условиях приводит к формированию пространственной сетки и сопровождается увеличением термостойкости, механической прочности и устойчивости материалов к внешним воздействиям.

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что радиационная сшивка может быть эффективно применена как к первичным, так и к вторичным полимерам, что делает её перспективным инструментом для повышения эксплуатационных характеристик материалов и продления жизненного цикла полимерных изделий. Вместе с тем достигаемые эффекты существенно зависят от типа полимера, дозы ионизирующего излучения, атмосферы облучения и состава материала, что требует тщательной оптимизации режимов обработки.

Показано, что радиационно-сшитые материалы находят применение в широком спектре отраслей – от кабельной и трубной продукции до медицины и машиностроения. Экономические и экологические аспекты использования данного метода указывают на его потенциальную конкурентоспособность по сравнению с химическими способами сшивки в

ряде прикладных контекстов, особенно в условиях ужесточения требований к экологической безопасности и устойчивому производству.

**6. Вспомогательный материал:** нет вспомогательного материала.

## 7. Вклады авторов

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

## 8. Информация об авторах

Толымбекова, Лязат – кандидат технических наук, старший преподаватель, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; [tolymbekova\\_lb@enu.kz](mailto:tolymbekova_lb@enu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-3785-7943>

Казбекова, Айымжан – магистрант образовательной программы «М089-Химия», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; [aiymzhanr2502@gmail.com](mailto:aiymzhanr2502@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0005-1061-8116>

Бактыбек, Айша – магистрант образовательной программы «М089-Химия», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; [aishabaktybek1@gmail.com](mailto:aishabaktybek1@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0005-4157-3782>

Сейтенова, Гайни – кандидат химических наук, доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; [seitenova\\_gzh@enu.kz](mailto:seitenova_gzh@enu.kz), <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

Турсынова, Арайлым – кандидат химических наук, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; [tursynova\\_ak@enu.kz](mailto:tursynova_ak@enu.kz), <https://orcid.org/0000-0001-8957-039X>

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

**10. Благодарность:** авторы выражают благодарность АО «Парк ядерных технологий». г. Курчатов.

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

## 12. Список литературы

1. Ahmed, M. S., Zhang, Y., Chen, R., & Zhou, Y. (2024). A comprehensive review of radiation-induced hydrogels and crosslinked systems: methods, properties, and biomedical/industrial applications. *Gels*, 10(6), 381. <https://doi.org/10.3390/gels10060381>
2. Al Lafi, A. G., Parker, D., & Hay, J. N. (2015). The crosslinking of poly (ether ether ketone): Thermally and by irradiation. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(48), 41999. <https://doi.org/10.1002/app.41999>

3. Al-Gahtany, S. A., & Shokr, F. S. (2018). Synthesis and characterization of radiation crosslinked nano silver–polyvinyl alcohol/polyethylene oxide composites. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 57, 701–714. <https://doi.org/10.1080/00222348.2018.1516340>
4. Alavarse, A., Frachini, E., da Silva, R. C., Lima, V. H., Shavandi, A., & Petri, D. F. S. (2022). Crosslinkers for polysaccharides and proteins: synthesis conditions, mechanisms, and crosslinking efficiency: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 201, 459–475. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.029>
5. Ashfaq, A., Clochard, M. C., Coqueret, X., Dispenza, C., Driscoll, M. S., Ulański, P., & Al-Sheikhly, M. (2020). Polymerization reactions and modifications of polymers by ionizing radiation. *Polymers*, 12(12), 2877. <https://doi.org/10.3390/polym12122877>
6. Ashfaq, A., An, J., Ulański, P., & Al-Sheikhly, M. (2021). On the mechanism and kinetics of synthesizing polymer nanogels by ionizing radiation-induced intramolecular crosslinking of macromolecules. *Pharmaceutics*, 13(11), 1765. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13111765>
7. Azevedo, A. M., da Silveira, P. H. P. M., Lopes, T. J., da Costa, O. L. B., Monteiro, S. N., Veiga-Junior, V. F., Silveira, P. C. R., Cardoso, D. D., & Figueiredo, A. B. D. S. (2025). Ionizing radiation and its effects on thermoplastic polymers: an overview. *Polymers*, 17(8), 1110. <https://doi.org/10.3390/polym17081110>
8. Borejka, A. J. (2010). Industrial radiation processing: trends and applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 79(4), 469–477. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2009.10.007>
9. Calina, I., Demeter, M., Scarisoreanu, A., Abbas, A., & Raza, M. A. (2025). Role of ionizing radiation techniques in polymeric hydrogel synthesis for tissue engineering applications. *Gels*, 11(1), 47. <https://doi.org/10.3390/gels11010047>
10. Cataldo, F., Ragni, P., & Ursini, O. (2007). Radiation-induced polymerization of  $\beta$  (-) pinene: a further insight. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 272(1), 29–36. <https://doi.org/10.1007/s10967-006-6833-0>
11. Charlesby, A. (1967). Radiation mechanisms in polymers. In *Radiation chemistry of polymeric systems*. American Chemical Society, 1–21. <https://doi.org/10.1021/ba-1967-0066.ch001>
12. Chapiro, A. (1962). *Radiation chemistry of polymeric systems*. Interscience.
13. Chen, J., Asano, M., Yamaki, T., & Yoshida, M. (2006). Chemical and radiation crosslinked polymer electrolyte membranes prepared from radiation-grafted ETFE films for DMFC applications. *Journal of Power Sources*, 158, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.09.024>
14. Cleland, M. R., Parks, L. A., & Cheng, S. (2003). Applications for radiation processing of materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 208(1–2), 66–73. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)00655-4](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00655-4)
15. Clough, R. L. (2001). High-energy radiation and polymers: a review of commercial processes and emerging applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 185(1-4), 8–33. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)00837-1](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00837-1)
16. Coqueret, X. (2024). Radiation-induced cross-linking polymerization: recent developments for coating and composite applications. *Nukleonika*, 69(1), 1-10. <https://doi.org/10.2478/nuka-2024-0006>
17. Covas, J. A., Pessan, L. A., Machado, A. V., & Larocca, N. M. (2011). Polymer blend compatibilization by copolymers and functional polymers. In: *Polymer blends*, 315–356.
18. Darwis, D., Erizal, B., Abbas, B., Nurlidar, F., & Putra, D. P. (2015). Radiation processing of polymers for medical and pharmaceutical applications. *Macromolecular Symposia*, 353, 15–23. <https://doi.org/10.1002/masy.201550302>
19. Dole, M. (Ed.). (1972). *The radiation chemistry of macromolecules* (Vols. 1–2). Academic Press.
20. Elbarbary, A. A., El-Rehim, H. A., El-Sawy, N. M., Hegazy, E. S., & Soliman, E. A. (2017). Radiation-induced crosslinking of polyacrylamide incorporated low molecular weight natural

- polymers for possible use in agricultural applications. *Carbohydrate Polymers*, 178, 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.050>
21. Fujisato, T., Tomihata, K., & Ikada, Y. (1999). Cross-linking of amniotic membranes. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 10(11), 1171–1183. <https://doi.org/10.1163/156856299X00829>
22. Ferry, M., Dispenza, C., Seguy, S., & Moise, I. M. (2020). Radiation effects in polymer materials: From mechanisms to applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 171, 108732. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108732>
23. Gao, Q., Hua, J., Li, R., Xing, Z., Pang, L., Zhang, M., Xu, L., & Wu, G. (2017). Radiation-induced graft polymerization for the preparation of highly efficient UHMWPE fibrous adsorbent for Cr (VI) removal. *Radiation Physics and Chemistry*, 130, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.08.004>
24. Gao, Y., Zhou, D., Lyu, J., Xu, Q., Newland, B., Matyjaszewski, K., Tai, H., & Wang, W. (2020). Complex polymer architectures through free-radical polymerization of multivinyl monomers. *Nature Reviews Chemistry*, 4(4), 194–212. <https://doi.org/10.1038/s41570-020-0170-7>
25. Gheysari, D., & Behjat, A. (2001). Radiation crosslinking of LDPE and HDPE with 5 and 10 MeV electron beams. *European Polymer Journal*, 37(10), 2011–2016. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(01\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(01)00084-2)
26. Ghobashy, M. M., & Abdeen, Z. E. (2016). Radiation crosslinking of polyurethanes: Characterization by FTIR, TGA, SEM, XRD, and Raman spectroscopy. *Journal of Polymers*, 2016, 9802514. <https://doi.org/10.1155/2016/9802514>
27. Głuszewski, W., Stasiak, A., Raszewska-Kaczor, A., & Kaczor, D. (2018). Effect of polyethylene cross-linking on properties of foams. *Nukleonika*, 63(2), 81–85. <https://doi.org/10.2478/nuka-2018-0010>
28. Haji-Saeid, M., Sampa, M. H. O., & Chmielewski, A. G. (Eds.). (2005). Radiation processing of polymers. IAEA.
29. Hara, M. (2022). Effects of ionizing radiation on biopolymers for applications as biomaterials. In *Biomedical Materials & Devices* (pp. 1–28). Springer. <https://doi.org/10.1007/s44174-022-00049-6>
30. Hasan, M. K., Staack, D., Pillai, S. D., Fifield, L., & Pharr, M. (2024). Connecting radiation-driven changes in structural, thermal, and mechanical properties in several medical device polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 230, 110677. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110677>
31. Hegazy, E. S. A., & Dessouki, A. M. (2007). Radiation-induced crosslinking and grafting of polymers. *Radiation Physics and Chemistry*, 76(8–9), 1365–1372. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2006.11.012>
32. International Atomic Energy Agency. (2004). Radiation technology for polymers (Technical Reports Series No. 429). IAEA.
33. International Atomic Energy Agency. (2020). Use of radiation processing to convert plastic waste into useful products (IAEA-TECDOC-1928). IAEA.
34. International Atomic Energy Agency. (2021). Radiation effects on polymer materials commonly used in medical devices: CRP F23035 – 1st RCM report. IAEA.
35. International Organization for Standardization. (2017). *ISO 11137-3: Sterilization of health care products - Radiation - Part 3: Guidance on dosimetry for sterilization*. ISO.
36. Ishihara, R., Asai, S., & Saito, K. (2020). Recent progress in charged polymer chains grafted by radiation-induced graft polymerization. *Quantum Beam Science*, 4(2), 20. <https://doi.org/10.3390/qubs4020020>
37. Jabbari, E., & Nozari, S. (2000). Swelling behavior of acrylic acid hydrogels prepared by  $\gamma$ -radiation crosslinking of polyacrylic acid. *European Polymer Journal*, 36(12), 2685–2692. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(00\)00044-6](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(00)00044-6)

38. Jaganathan, S., Balaji, A., Vellayappan, M., Subramanian, A. P., John, A. A., Asokan, M. K. U., & Supriyanto, E. (2015). Radiation-induced surface modification of polymers for biomaterial application. *Journal of Materials Science*, 50(5), 2007–2018. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8718-x>
39. Kalapakdee, S., Pongprayoon, T., Hemvichian, K., Suwanmala, P., & Kangsumrith, W. (2013). Mechanical properties of poly (lactic acid)/thermoplastic starch blends crosslinked by gamma radiation. *Advanced Materials Research*, 781–784, 467–470. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.781-784.467>
40. Kaminskaya, T. P., & Podshibyakin, S. V. (2008). Crosslinking of polymer–carbon composites for self-resetting fuses (Sshivka polimerno-uglerodnykh kompozitov dlya samozashchishchayushchikhsya predokhraniteley in Russian). *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”*, 2, 143–144.
41. Khalil, A. A. (2023). The effects of gamma radiation on the microstructure and mechanical properties of polypropylene. *Sirte University Scientific Journal*, 13(2), 29–34. <https://doi.org/10.37375/susj.v13i2.2501>
42. Khodkar, F., & Ebrahimi, N. (2011). Effect of irradiation on mechanical and structural properties of EVA hollow fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 119, 2085–2092. <https://doi.org/10.1002/app.32926>
43. Khosroshahi, F. H., Kordi, F., & Tohidian, M. (2025). Preparation of cross-linked sponge with piezoelectric properties. *Polymers for Advanced Technologies*. <https://doi.org/10.1002/pat.70084>
44. Kimura, A., Yoshida, F., & Taguchi, M. (2020). Application of radiation crosslinking technique to gelatin scaffold development. *Radiation Physics and Chemistry*, 175, 109287. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109287>
45. Kolhe, A., Chauhan, A., & Dongre, A. (2022). A review on various methods for the cross-linking of polymers. *Research Journal of Pharmaceutical Dosage Forms and Technology*, 14(2), 183–188. <https://doi.org/10.52711/0975-4377.2022.00029>
46. Kremer, D., Seidl, B., Zitzenbacher, G., Lackner, M., & Buchberger, W. (2024). Increasing the melt viscosity of post-consumer recycled polypropylene via e-beam techniques. *Radiation Physics and Chemistry*, 222, 111846. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111846>
47. Kurbanova, B., Aimaganbetov, K., Ospanov, K., Abdrakhmanov, K., Zhakiyev, N., Rakhadilov, B., Sagdoldina, Z., & Almas, N. (2023). Effects of electron beam irradiation on mechanical and tribological properties of PEEK. *Polymers*, 15(6), 1340. <https://doi.org/10.3390/polym15061340>
48. Kume, T., Furuta, M., Todoriki, S., Uenoyama, N., & Kobayashi, Y. (2009). Status of food irradiation in the world. *Radiation Physics and Chemistry*, 78(3), 222–226. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2008.09.009>
49. Lapshin, V. P., & Voronkova, L. I. (2015). Radiation chemistry of polymers (Radiatsionnaya khimiya polimerov in Russian). Nauka.
50. Lee, J., Kim, H., & Park, J. (2021). Study of crystallization behaviour of electron beam irradiated HDPE and PP. *Royal Society Open Science*, 8(10), 202250. <https://doi.org/10.1098/rsos.202250>
51. Lee, J.-G., Jeong, J.-O., Jeong, S.-I., & Park, J.-S. (2021). Radiation-based crosslinking technique for enhanced thermal and mechanical properties of HDPE/EVA/PU blends. *Polymers*, 13(16), 2832. <https://doi.org/10.3390/polym13162832>
52. Lee, S., Park, Y. K., & Lee, J. (2023). Upcycling of plastic and tire waste toward use as modifier for asphalt binder. *Energy & Environment*, 35(4), 510–524. <https://doi.org/10.1177/0958305X231173999>
53. Leisen, C., Menacher, M., & Drummer, D. (2015). Influence of radiation cross-linking of polyamide 66 on vibration welding. *Polymer Engineering & Science*, 55(9), 2121–2128. <https://doi.org/10.1002/pen.24139>

54. Lenfeld, P., Brdlik, P., Boruvka, M., Behalek, L., & Habr, J. (2020). Effect of radiation crosslinking and surface modification of cellulose fibers. *Polymers*, 12(12), 3006. <https://doi.org/10.3390/polym12123006>
55. Manaila, E., Stelescu, & M., Craciun, G. (2012). Aspects regarding radiation crosslinking of elastomers. In *Elastomers* (pp. 83–108). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/47747>
56. Manas, D., Stanek, M., Manas, M., Müller, M., & Štěpánek, P. (2018). HDPE composite with recycled filler: Processing and properties. *Polymers*, 10(12), 1361. <https://doi.org/10.3390/polym10121361>
57. Mendizabal, E., Cruz, L., Jasso, C. F., Burillo, G., & Dakin, V. I. (1996). Radiation crosslinking of highly plasticized PVC. *Radiation Physics and Chemistry*, 47(2), 305–309. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(94\)00183-K](https://doi.org/10.1016/0969-806X(94)00183-K)
58. Mo, S. J., Zhang, J., Liang, D., & Chen, H. Y. (2013). Pyrolysis characteristics of cross-linked polyethylene cable material. *Procedia Engineering*, 52, 588–592. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.190>
59. Naikwadi, A. T., Sharma, B. K., Bhatt, K. D., & Mahanwar, P. A. (2022). Gamma radiation processed polymeric materials for high performance applications: a review. *Frontiers in Chemistry*, 10, 837111. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.837111>
60. Novikov, G. K., Fedchishin, V. V., & Kakorin, A. A. (2019). Mechanical strength and hardness of polymer materials radiation-crosslinked by X-ray emission (Mekhanicheskaya prochnost' i tverdost' polimernykh materialov, radiatsionno sshitykh rentgenovskim izlucheniem in Russian). *Electricity (Elektrichestvo)*, 9, 66–70.
61. Novikov, G. K., Fedchishin, V. V., & Smirnov, A. I. (2018). TSD spectroscopy of radiation-crosslinked cable polyethylene (Spektroskopiya TSD radiatsionno-sshitoho kabel'nogo polietilena in Russian). *Plasticheskie massy (Plastics)*, 9–10, 41–43.
62. Ogul, H. (2022). Radiation attenuation properties of polymer composites mixed with tantalum carbide. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 177, 531–544. <https://doi.org/10.1080/10420150.2022.2063124>
63. Ortega Pijeira, M. S., Magne, T. M., da Silva, N. C. G., Ramos Ribeiro, E. R. F., Albuquerque Silva, Y. J., Ricci-Junior, E., Rebelo Alencar, L. M., & Santos-Oliveira, R. (2023). Ionizing radiation chemistry on polymers. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 23(15), 1414–1424. <https://doi.org/10.2174/1568026623666230315122855>
64. Ovsik, M., Manas, M., Stanek, M., Dockal, A., Mizera, A., Fluxa, P., Bednarik, M., & Adamek, M. (2021). Nano-mechanical properties of irradiated polyethylene. *Materials*, 13(4), 929. <https://doi.org/10.3390/ma13040929>
65. Ovsik, M., Reznicek, M., Senkerik, V., Stanek, M., & Hylova, L. (2019). Influence of radiation cross-linking on gel content of polyamide. *MM Science Journal*, 2819–2822. [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019\\_03\\_201861](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_03_201861)
66. Oshima, A., Ikeda, S., Seguchi, T., & Tabata, Y. (1997). Improvement of radiation resistance of PTFE by crosslinking. *Radiation Physics and Chemistry*, 49(2), 279–284. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(96\)00138-7](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(96)00138-7)
67. Pekel, N., Yoshii, F., Kume, T., & Guven, O. (2004). Radiation crosslinking of biodegradable HPMC. *Carbohydrate Polymers*, 55, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2003.08.015>
68. Ping, X., Wang, M., & Ge, X. (2011). Radiation grafting onto PET films. *Radiation Physics and Chemistry*, 80, 632–637. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2011.01.001>
69. Pirvu, C. I., Sover, A., & Abrudeanu, M. (2024). Polymer participation in piezoelectric composites. *Polymers*, 16(24), 3603. <https://doi.org/10.3390/polym16243603>
70. Podhornaya, L., Avramenko, V., & Karandashov, O. (2020). Radiation-chemical structuring of epoxy compositions. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 12(1), 08008. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-1-08>
71. Rahaman, M. S., Hasnine, S. M., Ahmed, T., Sultana, S., Bhuiyan, M. A., Manir, M. S., Ullah, N., Sen, S. K., Hossain, M. N., Hossain, M. S., & Dafader, N. C. (2021). Radiation crosslinked

- hydrogels. *Iranian Polymer Journal*, 30, 1101–1116. <https://doi.org/10.1007/s13726-021-00949-2>
72. Ramaraj, B. (2007). Crosslinked poly (vinyl alcohol) and starch films. *Journal of Applied Polymer Science*, 103, 1127–1132. <https://doi.org/10.1002/app.24612>
73. Relleve, L. S., & Yoshii, F. (1997). Radiation crosslinking of polymers. *Progress in Polymer Science*, 22(2), 257–289. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(96\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(96)00015-8)
74. Relleve, L. S., Gallardo, A. K., Tecson, M. G., & Luna, J. A. (2021). Biocompatible hydrogels by radiation crosslinking. *Radiation Physics and Chemistry*, 179, 109194. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109194>
75. Rimdusit, S., Somsaeng, K., Kewsuwan, P., Jubsilp, C., & Tiptipakorn, S. (2012). Comparison of gamma and chemical crosslinking of hydrogels. *Engineering Journal*, 16(4), 15–28. <https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.4.15>
76. Schneider, L. M., Ihrner, N., Zenkert, D., & Johansson, M. (2019). Bicontinuous electrolytes. *ACS Applied Energy Materials*, 2(6), 4362–4369. <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b00563>
77. Sharif, J., Abdul Aziz, H. S., & Hashim, K. (2000). Radiation effects on LDPE/EVA blends. *Radiation Physics and Chemistry*, 58, 191–195. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00373-4](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00373-4)
78. Singh, N., Singh, J., & Singh, L. (2014). Radiation processing of polymers: fundamentals and applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 105, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.06.020>
79. Silva, A. S., Carvalho, A., Barreiros, P., de Sá, J., Aroso, C., & Mendes, J. M. (2021). Fracture resistance in acrylic resins. *Polymers*, 13(8), 1234. <https://doi.org/10.3390/polym13081234>
80. Smith, J. A., Brown, L. R., & Taylor, M. E. (2018). Radiation-induced modification and crosslinking of polymers: Mechanisms and applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 145, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.12.015>
81. Stephen, R., Jose, S., Joseph, K., Thomas, S., & Oommen, Z. (2006). Thermal stability of gamma-radiation vulcanized rubber blends. *Polymer Degradation and Stability*, 91(8), 1717–1725. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.12.001>
82. Stelescu, M. D., Airinei, A., Manaila, E., Crăciun, G., Fifere, N., Varganici, C., Pamfil, D., & Doroftei, F. (2018). Effects of electron beam irradiation on elastomer composites. *Polymers*, 10, 1112. <https://doi.org/10.3390/polym10111206>
83. Sun, J., Zhang, Y., & Zhong, X. (1994). Radiation crosslinking of PTFE. *Polymer*, 35, 2881–2883. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(94\)90323-9](https://doi.org/10.1016/0032-3861(94)90323-9)
84. Svarcova, A., & Svoboda, P. (2025). Enhanced mechanical properties of irradiated EVA. *Processes*, 13(5), 1562. <https://doi.org/10.3390/pr13051562>
85. Svoboda, P. (2016). High-temperature study of radiation cross-linked ethylene–octene copolymers. *Polymer Bulletin*, 74, 121–144. <https://doi.org/10.1007/s00289-016-1703-6>
86. Sütekin, S. D., Guven, O. (2019). Radiation synthesis of nanogels. *Applied Radiation and Isotopes*, 145, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.12.028>
87. Thiher, N. L. K., Schissel, S. M., & Jessop, J. L. P. (2020). Comparison of photo- and electron-beam polymerizations. *Radiation Physics and Chemistry*, 172, 108808. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108808>
88. Touati, N., Kaci, M., Ahouari, H., Bruzard, S., & Grohens, Y. (2007). Effect of  $\gamma$ -irradiation on PP/clay nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 292, 1271–1279. <https://doi.org/10.1002/mame.200700260>
89. Tretinnikov, O. N., Kubo, M., & Ikada, Y. (1998). Surface crosslinking of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 60(1), 123–130. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00104-8)
90. Tsai, C.-Y., Zhang, T., Zhao, M., Chang, C.-S., & Sue, H.-J. (2021). Thermally conductive but electrically insulated polypropylene. *Composites Science and Technology*, 204, 108635. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.03.017>

91. Voit, W., Ware, T., & Gall, K. (2010). Radiation crosslinked shape-memory polymers. *Polymer*, 51(15), 3551–3559. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.05.049>
92. Wach, R. A., Mitomo, H., Nagasawa, N., & Yoshii, F. (2003). Radiation crosslinking of carboxymethylcellulose. *Radiation Physics and Chemistry*, 68, 771–779. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(03\)00403-1](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(03)00403-1)
93. Wach, R. A., Mitomo, H., Yoshii, F., & Kume, T. (2002). Hydrogel of radiation-induced cross-linked hydroxypropylcellulose. *Macromolecular Materials and Engineering*, 287, 285–295. [https://doi.org/10.1002/1439-2054\(20020401\)287:4<285:AID-MAME285>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1439-2054(20020401)287:4<285:AID-MAME285>3.0.CO;2-3)
94. Wang, B., Wang, M., Xing, Z., Zeng, H., & Wu, G. (2013). Radiation crosslinked LDPE/EVA foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 127, 912–918. <https://doi.org/10.1002/app.37826>
95. Woods, R. J., & Pikaev, A. K. (1994). Applied radiation chemistry: Radiation processing. Wiley.
96. Yamashita, S., Ma, J., Marignier, J.-L., Hiroki, A., Taguchi, M., Mostafavi, M., & Katsumura, Y. (2016). Radiation-induced reactions in hydroxypropyl cellulose hydrogels. *Radiation Research*, 186, 650–658. <https://doi.org/10.1667/RR14539.1>
97. Zaharescu, T. (2015). Radiation effects on polymer-based systems. In Radiation effects on polymer-based systems. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-03464-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-03464-5_6)
98. Zhao, L., Mitomo, H., Nagasawa, N., Yoshii, F., & Kume, T. (2003). Radiation synthesis of chitin-based hydrogels. *Carbohydrate Polymers*, 51, 169–175. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00210-2)
99. Zhao, W., Kundu, C. K., Li, Z., Li, X., & Zhang, Z. (2021). Flame retardant treatments for polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 145, 106382. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106382>
100. Zhou, C. (2012). Bulk preparation of radiation crosslinking poly(urethane-imide). In *Polyurethane* (pp. 387–406). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/48282>
101. Zenkiewicz, M., Richert, J., Rytlewski, P., & Moraczewski, K. (2015). Effects of gamma radiation on polymers and polymer composites. *Polymers*, 60(2), 83–92. <https://doi.org/10.14314/polimery.2015.083>

## **Біріншілік және екіншілік полимерлерді радиациялық тігу әдістері: полимерлерді радиациялық тігудің тиімділігі мен мүмкіндіктері**

**Лязат Толымбекова, Айымжан Казбекова, Айша Бақтыбек, Гайни Сейтенова, Арайлым Турсынова**

**Аңдатпа.** Мақала біріншілік және екіншілік полимерлерді радиациялық тігу перспективалық макромолекулалық материалдарды модификациялау бағыттарының бірі ретінде шолуға арналған. Мақалада  $\gamma$ -сәулесінің электрондық сәулелік шоқтың және ультракүлгін сәулелердің әсерінен жүретін тігілудің физика-химиялық негіздері қарастырылып, полимер құрылымында көлденең байланыстардың түзілу механизмдеріне ерекше назар аударылады. Біріншілік және екіншілік полимерлердің радиациялық әсерге төзімділігін салыстырмалы талдау жүргізіліп, қоспалардың, қалдық стабилизаторлардың және деградация дәрежесінің әсері қарастырылады. Заманауи ғылыми зерттеулердің нәтижелері жинақталып, радиациялық тігуден кейін полимерлердің механикалық және термиялық қасиеттеріндегі өзгерістер көрсетіледі.

Мақаланың елеулі бөлігі радиациялық тігілуден өткен материалдардың әртүрлі салаларда практикалық қолданылуына арналған: энергетикада (кабельдерді оқшаулау), медицинада (бір реттік бұйымдар), құрылыс саласында (күбырлар мен пленкалар), сондай-ақ пластикалық қалдықтарды өңдеу және қайта пайдалану саласында. Әдістің экономикалық аспектілері талданып, массалық өндірісте радиациялық тігу әдісі химиялық әдістерге қарағанда тиімді екені көрсетіледі, бұл жоғары өнімділік, процестерді автоматтандыру және инициаторларды

қолданудың қажет еместігімен түсіндіріледі. Экологиялық артықшылықтарға, соның ішінде улы жанама өнімдердің болмауы және екіншілік полимерлерді терең өңдеу мүмкіндігіне назар аударылады. Соңында, радиациялық тігілудің тұрақты даму және айналымдық экономикаға көшу контекстінде жоғары өзектілігі мен потенциалы туралы қорытынды жасалады.

**Түйін сөздер:** радиациялық тігу; иондаушы сәулелену; біріншілік полимерлер; екіншілік полимерлер; полиэтилен; полимерлердің модификациясы; экологиялық таза; полимер қалдықтары; циркуляциялық экономика.

## **Radiation crosslinking of primary and secondary polymers: efficiency and possibilities of radiation crosslinking of polymers**

**Lyazat Tolymbekova, Aiymszhan Kazbekova, Aisha Baktybek, Gaini Seitenova, Arailym Tursynova**

**Abstract.** The article is devoted to a review of radiation crosslinking of primary and secondary polymers as a promising area of modification of macromolecular materials. The physicochemical foundations of the crosslinking process under the influence of ionizing radiation, including gamma radiation, electron beam, and ultraviolet, are considered, with an emphasis on the mechanisms of formation of cross-links in the polymer structure. Special attention is paid to the comparative analysis of the behavior of primary and secondary polymers under radiation exposure, including the effects of impurities, residual stabilizers, and the degree of degradation. The results of modern scientific research demonstrating changes in the mechanical and thermal properties of polymers after crosslinking are summarized. A significant part of the article is devoted to the practical application of radiation-crosslinked materials in various industries: energy (cable insulation), medicine (disposable products), construction (pipes and films), as well as in the processing and disposal of plastic waste. An analysis of the economic aspects of the method is given, which shows that in mass production, radiation crosslinking turns out to be economically more profitable than chemical methods, due to high productivity, automation of processes, and the absence of the need for initiators. Environmental advantages were noted, including the absence of toxic by-products and the possibility of deep processing of secondary polymers. The conclusion is made about the high relevance and potential of radiation crosslinking in the context of sustainable development and transition to a circular economy.

**Keywords:** radiation crosslinking; ionizing radiation; primary polymers; secondary polymers; polyethylene; polymer modification; environmental friendliness; polymer waste; circular economy.

## Comparison and synthesis of image analysis algorithms: NDVI and RGB processing for UAV-based environmental monitoring

Rustam Askaruly<sup>1\*</sup>, Aidana Abilova<sup>2</sup>, Arman Syzdykov<sup>2</sup>, Khuralay Moldamurat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nazarbayev University, Digital Prototyping Laboratory Fab Lab, Astana, Kazakhstan; [rustam.askaruly@nu.edu.kz](mailto:rustam.askaruly@nu.edu.kz)

<sup>2</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; [aiddannabbi@gmail.com](mailto:aiddannabbi@gmail.com), [780217303194@enu.kz](mailto:780217303194@enu.kz), [moldamurat@yandex.kz](mailto:moldamurat@yandex.kz)

\*Corresponding author: [rustam.askaruly@nu.edu.kz](mailto:rustam.askaruly@nu.edu.kz)

**Citation:** Askaruly, R., Abilova, A., Syzdykov, A., Moldamurat, K. (2026). Comparison and synthesis of image analysis algorithms: NDVI and RGB processing for UAV-based environmental monitoring. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 154(1), 100-117.

<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-100-117>

Academic Editor:  
N.E. Ramzanova

Received: 12.03.2026

Revised: 18.03.2026

Accepted: 25.03.2026

Published: 31.03.2026



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

**Abstract:** Vegetation health assessment is a fundamental task in precision agriculture, ecological monitoring, and environmental risk management. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) uses red and near-infrared (NIR) reflectance data to function as the primary index which enables vegetation health assessment and stress detection. However, the practical deployment of such systems can be limited by the requirement for multispectral sensors that include a near-infrared (NIR) channel. This study evaluates three algorithmic approaches: (i) the traditional NDVI method, (ii) an RGB-based channel transformation approach, and (iii) a synthesized hybrid algorithm that applies NDVI-like normalization to green-dominance patterns in standard RGB imagery. The analysis includes mathematical formulations, radiometric interpretation, calibration requirements, and error-propagation analysis for all investigated approaches. A complete UAV processing workflow is presented, including geometric correction, radiometric normalization, noise filtering, and illumination compensation. The system becomes more useful through discussions about UAV implementation scenarios and flight planning constraints and geospatial post-processing workflows. The text includes forest-fire-related use-cases as examples of fast assessment situations which vegetation stress maps help with post-event choices yet these examples do not represent the main focus. The results indicate that traditional NDVI provides higher reliability for quantitative biophysical analysis, whereas RGB-based methods remain effective for qualitative vegetation segmentation when hardware resources are limited. The developed algorithm delivers superior vegetation identification results than RGB transformation methods and functions as a useful solution for organizations which lack NIR-equipped systems. The document presents recommendations which help users choose methods based on their specific requirements regarding accuracy levels and budget constraints and time needs for deployment and system operational difficulties.

**Keywords:** NDVI, UAV, RGB image processing, vegetation monitoring, multispectral imaging, radiometric calibration, environmental monitoring.

## **1. Introduction**

UAV-based remote sensing bridges the gap between satellite observations and ground measurements by providing centimeter-level spatial resolution and flexible revisit times. In practice, this enables within-season monitoring of crop development, early detection of stress patterns, and rapid mapping of heterogeneous vegetation within small administrative areas (Rouse et al., 1974; Tucker, 1979; Zhang & Kovacs, 2012). Compared with satellite observations, UAV surveys reduce mixed-pixel effects, allow flexible acquisition geometry, and enable rapid deployment after weather events or agricultural interventions (Yang et al., 2020; Ripullone et al., 2020).

From an information-processing standpoint, the key challenge is transforming raw digital numbers into stable, comparable indices. Illumination variability, auto-exposure, sensor vignetting, and atmospheric conditions can introduce systematic bias that may be misinterpreted as vegetation change. Therefore, a complete workflow must include both geometric alignment (to ensure correct spatial correspondence) and radiometric normalization (to ensure temporal and cross-flight comparability) (Lu et al., 2021). These requirements are particularly important for RGB-only methods, which are more sensitive to color balance drift (Zhou et al., 2021).

The contribution of this work is to present a structured comparison of NDVI and RGB-based alternatives with explicit mathematical formulation and practical UAV deployment guidance. In addition to qualitative visualization, we outline calibration and parameter-selection strategies, and discuss typical failure modes such as shadows, wet surfaces, and artificial green materials (Zhang et al., 2017; Li et al., 2019). The proposed hybrid GRNDI and synthesized GI approaches provide a practical pathway for teams that start with standard RGB cameras and progressively move toward multispectral sensing.

Remote sensing provides a fundamental information layer for modern agriculture, land management, and ecological monitoring (Verrelst et al., 2015; Salamí et al., 2014). Over the past decade, the increasing availability of UAV platforms has significantly reduced the cost of high-resolution local sensing. UAV systems combine operational flexibility with near-real-time data acquisition and are especially effective when satellite revisit cycles or cloud contamination limit temporal response (Hunt et al., 2013; Díaz-Varela et al., 2014).

The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) stands as the primary vegetation index, which uses spectral differences between red and NIR reflectance to measure plant activity (Huete & Jackson, 1987). The index remains widely used due to its conceptual simplicity and clear physical interpretation. Healthy vegetation absorbs visible red radiation due to chlorophyll activity while reflecting strongly in the near-infrared range because of leaf internal structure, resulting in high NDVI values. The NDVI values from stressed vegetation and bare soil and non-vegetated surfaces remain at lower levels (Pettorelli et al., 2005; Gamon et al., 2019).

The system maintains its advantages, but it requires sensors that can detect Near-Infrared (NIR) light. In many educational, municipal, and low-budget monitoring scenarios, only standard RGB cameras are available (Li et al., 2020). The research requires a solution to analyze vegetation through RGB data while maintaining its ability to distinguish between different types of vegetation (Su et al., 2018).

This manuscript addresses that gap by:

- systematizing the traditional NDVI pipeline and its radiometric foundations;
- formalizing an RGB-only vegetation enhancement algorithm;
- proposing and analyzing a synthesized green-index approach inspired by NDVI normalization logic;
- comparing all methods by theory, implementation requirements, and practical utility for UAV mapping workflows (Kawamura et al., 2019; Mehdizadeh et al., 2021).

The conceptual basis and core algorithmic motivation are aligned with the source draft, including traditional NDVI and RGB synthesis directions. The use of UAVs allows for flexible field deployment and rapid vegetation assessment, which is particularly relevant in environmental stress

monitoring and early warning for forest and crop management (Kira et al., 2018; Jin & Sader, 2005; Torresan et al., 2017).

### 1.1. NDVI as a normalized spectral contrast

NDVI is defined as

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (1)$$

where  $R_{NIR}$  and  $R_{Red}$  denote reflectance in near-infrared and red bands, respectively. Normalization in Eq. 1 attenuates multiplicative brightness effects and constrains output to  $[-1, 1]$ , simplifying threshold-based interpretation.

### 1.2. RGB-only alternatives

When NIR is unavailable, vegetation detection must rely on visible channels. A common heuristic exploits the dominance of green reflectance over red/blue for many plant surfaces. However, RGB-based indices have two major limitations:

1. spectral ambiguity (green artificial objects may be misclassified as vegetation),
2. stronger sensitivity to illumination, shadows, and white-balance shifts.

Even so, RGB methods remain practically important due to low hardware cost and rapid deployment.

### 1.3. Need for synthesis

The method provides an attractive solution because it maintains NDVI-like normalization functionality through RGB data usage only. The draft basis implements this method by uniting green index technology with channel modulation, which serves as its operational system (Pettorelli N., 2005). Hybrid RGB-normalized vegetation index. Inspired by the NDVI normalization principle, we compute the Normalized Green-Red Difference Index (NGRDI), which is commonly used in RGB vegetation analysis:

$$GRNDI(x,y) = \frac{G(x,y) - R(x,y)}{G(x,y) + R(x,y) + \epsilon} \quad (2)$$

where  $R(x,y)$  and  $G(x,y)$  denote the red and green channel intensities at pixel  $(x,y)$ , and  $\epsilon > 0$  is a small constant to avoid division by zero and improve numerical stability.

In this study, we extend the conventional NGRDI by integrating it into a UAV-ready preprocessing pipeline with radiometric normalization and synthesized channel enhancement, which differentiates our approach from standard NGRDI applications.

### 1.4. Problem Formulation

Given a UAV-acquired orthomosaic or image stack  $I$  over area  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ , estimate a vegetation condition map  $V(x,y)$  such that:

$$V: \Omega \rightarrow \mathbb{R} \quad (3)$$

with target properties:

- high intra-class consistency over vegetated regions;
- high inter-class separability from non-vegetated background;

- robustness to illumination variation;
- computational tractability on standard workstations (Huete A.R, 1987).

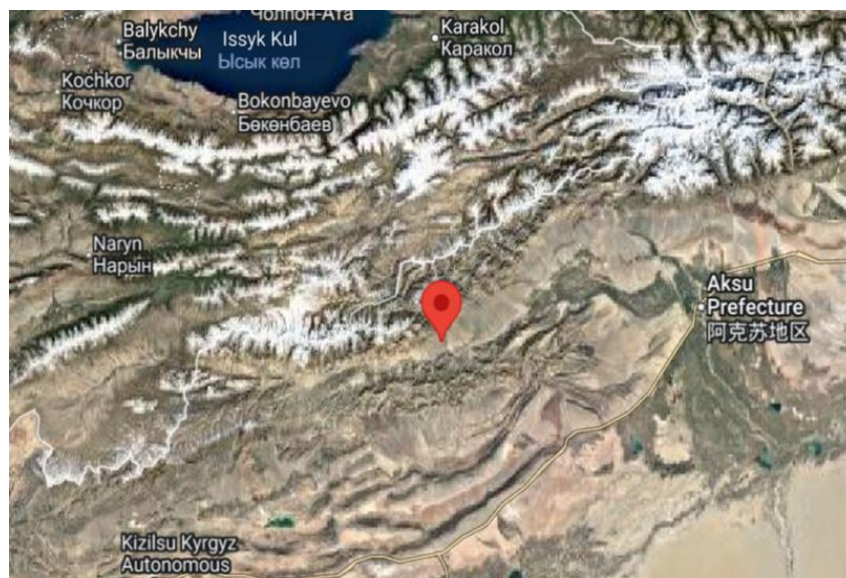
We evaluate three estimators:

$$\begin{aligned}\hat{V}_1 &= f_{NDVI}(R_{NIR}, R_{Red}), \\ \hat{V}_2 &= f_{RGB-transform}(R, G, B), \\ \hat{V}_3 &= f_{Synth}(R, G, B).\end{aligned}\tag{4}$$

## 2. Research Site and UAV Data Acquisition

### 2.1. Research Site and UAV Data Acquisition

The study area is located in the Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China, and is characterized by a mixed landscape dominated by vegetated surfaces. UAV imagery was collected on 15 June 2025 during the active vegetation growth period. The geographic extent of the study area ranges from 40.98°N to 41.03°N and 78.41°E to 78.48°E. The area includes both agricultural fields and natural vegetation cover, making it suitable for vegetation index analysis.



**Figure 1.** Coordinates of the study area

### 2.2. UAV Platform and Data Acquisition

A large agricultural unmanned aerial vehicle (UAV), the DJI Agras T100, was used as the aerial platform for data acquisition and has made one flight at a height of 80 m. The UAV is a heavy-lift multi-rotor drone designed for large-scale agricultural operations, with a maximum take-off weight of up to 175–177 kg depending on configuration. The aircraft provides high positioning accuracy when operating with RTK, reaching approximately  $\pm 10$  cm horizontal and vertical hovering accuracy under strong GNSS conditions.

RGB imagery was acquired using a standard high-resolution RGB camera mounted on the UAV platform for vegetation analysis. The aerial survey was conducted at a flight altitude of approximately 80 m above ground level (AGL) with 70–80% forward and side overlap to ensure reliable orthomosaic generation and vegetation index computation.

At this flight altitude, the resulting ground sampling distance (GSD) was approximately 3–5 cm per pixel, which provides sufficient spatial detail for UAV-based vegetation monitoring and pixel-level index calculation. The combination of high spatial resolution imagery and stable UAV flight

allowed accurate extraction of vegetation indices and reliable comparison between NDVI-based and RGB-derived approaches.

Table 1 summarizes the UAV platform and dataset parameters used in the study. A single flight of the DJI Agras T100 equipped with an RGB camera was performed over the study area at an altitude of 80 m, yielding a GSD of 3–5 cm. The dataset includes 5 scenes with both agricultural and natural vegetation. RGB and NIR data were co-registered for NDVI-based analysis. Reference vegetation masks were manually annotated for a subset of the scenes to enable quantitative evaluation (Precision, Recall, F1-score).

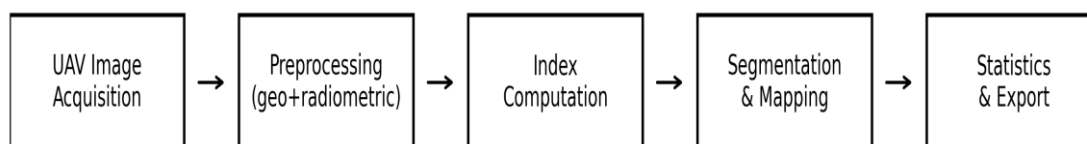
**Table 1.** UAV dataset overview and flight parameters

Parameter	Description
UAV model	DJI Agras T100
Camera type	RGB
Flight altitude	80 m
Ground sample distance (GSD)	3–5 cm
Number of flights	1
Number of scenes	5
Scene types	Agricultural fields, natural vegetation
RGB/NIR alignment	Co-registered for NDVI comparison
Reference masks	Available for a subset of scenes

### 3. Materials and methods

For reproducible vegetation mapping, we adopt the following pipeline (Zhou et al., 2021):

1. Mission planning: altitude, overlap, ground sample distance (GSD), and exposure constraints;
2. Geometric correction: lens distortion correction and orthorectification (Verrelst et al., 2015)
3. Radiometric normalization: conversion from digital number (DN) to pseudo-reflectance (or calibrated reflectance if panel-based workflow exists) (Guanter et al., 2015);
4. Noise suppression: denoising and outlier clipping (Li et al., 2019);
5. Index computation: NDVI/RGB/Synth estimators (Pettorelli et al., 2005; Ripullone et al., 2020);
6. Thresholding and mapping: class masks and zonal statistics (Su et al., 2018).



**Figure 2.** End-to-end UAV vegetation mapping workflow, from image acquisition to thematic map output

Flight planning parameters should satisfy both geometric reconstruction and radiometric quality. For a camera with focal length  $f$  and sensor pixel size  $p$ , the ground sample distance (GSD) at altitude  $H$  can be approximated as  $GSD \approx H p / f$ . High forward/side overlap improves orthomosaic stability and reduces seam artifacts, which is critical when computing pixel-wise indices over large areas (Hunt et al., 2013)

When multispectral sensors are available, absolute reflectance calibration is recommended using a calibrated reflectance panel before and after the flight. Alternatively, a downwelling light sensor (DLS) can be used to compensate for solar irradiance changes during the mission (Díaz-Varela et al., 2014). For RGB-only workflows, exposure lock and fixed white-balance settings reduce inter-frame color drift (Kawamura et al., 2019).

Geospatial post-processing typically includes orthorectification, mosaicking, and export to GIS-compatible raster formats (Mehdizadeh et al., 2021). Vegetation index rasters should preserve georeferencing, and statistics can be computed per management zone using vector boundaries. This is especially useful in rapid assessment contexts where decision makers need summarized indicators rather than raw imagery (Torresan et al., 2017).

### 3.1. Radiometric model

Let  $D_b(x,y)$  be DN value in band b. A linear approximation:

$$R_b(x,y) = \alpha_b D_b(x,y) + \beta_b \tag{5}$$

where  $\alpha_b, \beta_b$  are calibration coefficients. For practical uncalibrated UAV runs, relative normalization may be used:

$$\tilde{R}_b = \frac{D_b - p_{1,b}}{p_{99,b} - p_{1,b} + \epsilon} \tag{6}$$

with  $p_{1,b}, p_{99,b}$  percentiles and  $\epsilon > 0$  for numerical stability.

Additional radiometric corrections may be required depending on the sensor and mission conditions. Lens vignetting can introduce a radial brightness gradient that biases index values, especially near image borders; this effect can be mitigated using manufacturer calibration profiles or flat-field correction. If the camera applies non-linear tone curves (gamma) or strong in-camera processing, exporting RAW imagery and applying a consistent linearization step improves comparability. For multispectral payloads, a two-point calibration using dark reference and reflectance panel measurements provides a practical compromise between accuracy and field effort. Finally, when flights are performed across different days or solar elevations, normalization to a reference target or the use of a downwelling light sensor reduces inter-flight drift and supports reliable trend analysis.

### 3.2. Method 1: Traditional NDVI

Typical qualitative interpretation:

$$class = \begin{cases} \text{water/snow/cloud,} & NDVI < 0, \\ \text{bare/low cover,} & 0 \leq NDVI < 0.2, \\ \text{moderate vegetation,} & 0.2 \leq NDVI < 0.5, \\ \text{dense healthy vegetation,} & NDVI \geq 0.5. \end{cases} \tag{7}$$

Thresholds should be locally validated.

### 3.3. Method 2: RGB channel transformation

The draft concept uses green channel intensity and modifies red/blue channels with gain and threshold factors. A generalized form:

$$\begin{aligned} R' &= k_r \cdot \phi(G(x,y) - \tau), \\ B' &= k_b \cdot \phi(G(x,y) - \tau), \end{aligned} \tag{8}$$

where  $\phi(z) = \max(z, 0)$  (or sigmoid alternative),  $\tau$  is green threshold,  $k_r, k_b$  are gains. Vegetation likelihood map:

$$V_{RGB}(x,y) = G(x,y) - \frac{R'(x,y) + B'(x,y)}{2} \tag{9}$$

### 3.4. Method 3: Synthesized Green Index approach

Define

$$GI(x,y) = \frac{G(x,y) - \min(R(x,y), B(x,y))}{G(x,y) + \max(R(x,y), B(x,y)) + \epsilon} \tag{10}$$

Then channel enhancement:

$$\begin{aligned} R_s &= (1 - k \cdot GI(x,y)) \cdot R, \\ B_s &= (1 - k \cdot GI(x,y)) \cdot B, \\ G_s &= (1 + k \cdot GI(x,y)) \cdot G, \end{aligned} \tag{11}$$

with clipping to the valid dynamic range. Final synthesized vegetation score:

$$V_{Synth}(x,y) = \frac{G_s(x,y) - \frac{R_s(x,y) + B_s(x,y)}{2}}{G_s(x,y) + \frac{R_s(x,y) + B_s(x,y)}{2} + \epsilon} \tag{12}$$

### 3.5 Error propagation

For NDVI, first-order variance approximation:

$$\sigma_{NDVI}^2 \approx \left( \frac{\partial NDVI}{\partial R_{NIR}} \right)^2 \sigma_{NIR}^2 + \left( \frac{\partial NDVI}{\partial R_{Red}} \right)^2 \sigma_{Red}^2 + 2 \frac{\partial NDVI}{\partial R_{NIR}} \frac{\partial NDVI}{\partial R_{Red}} Cov(R_{NIR}, R_{Red}) \tag{13}$$

with

$$\frac{\partial NDVI}{\partial R_{NIR}} \frac{2R_{Red}}{(R_{NIR} + R_{Red})^2}, \tag{14}$$

$$\frac{\partial NDVI}{\partial R_{Red}} \frac{2R_{NIR}}{(R_{NIR} + R_{Red})^2}$$

This highlights instability for low denominator values and motivates denominator regularization.

### 3.6 Computational complexity

For image size  $M \times N$ , all pixel-wise methods are  $O(MN)$ . Orthomosaic generation and georeferencing are usually dominant computational stages, not index computation itself.

## 4. Results

### 4.1. Qualitative comparison

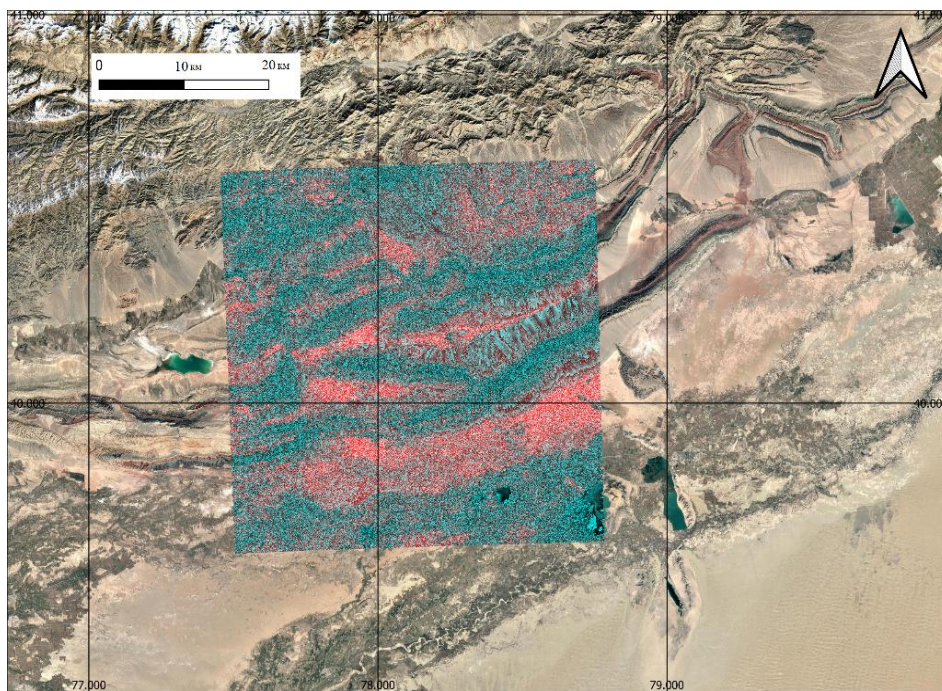
Table 2 summarizes theoretical and practical trade-offs.

**Table 2.** Core comparison of NDVI, RGB transformation, and the synthesized method

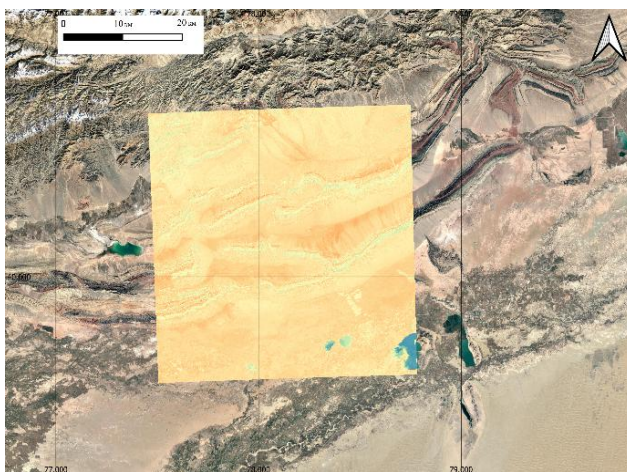
Criterion	Traditional NDVI	RGB Transform	Synthesized GI Method
Required sensor	NIR + Red (multispectral)	RGB camera only	RGB camera only
Physical interpretability	High	Moderate/low	Moderate
Quantitative reliability	High (with calibration)	Limited	Medium
Cost of deployment	Medium/high	Low	Low
Sensitivity to illumination	Medium	High	Medium
Tuning burden	Medium	Medium/high	High (initial), then stable
Best use-case	Precision monitoring, agronomy models	Quick visual screening	Improved RGB mapping under budget constraints

Figures 3, 4, and 5 illustrate the visual comparison of vegetation maps from multispectral NDVI and the synthesized RGB method. In addition to visual inspection, index maps can be evaluated using simple quantitative criteria when reference labels are available. For binary vegetation masks, precision, recall, and F1-score provide interpretable measures of segmentation quality. When only weak supervision exists (e.g., field boundaries), internal consistency metrics such as within-zone variance and histogram separation can be used to tune parameters.

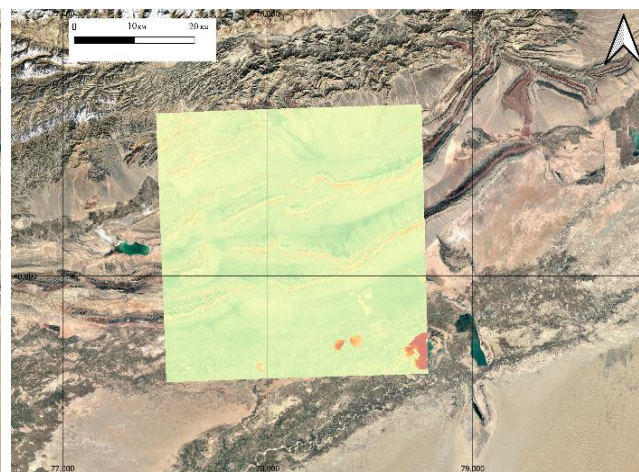
Threshold selection should be treated as a context-dependent step. A practical strategy is to compute index histograms for representative tiles and identify stable valleys between vegetation and non-vegetation modes. For NDVI, thresholds around 0.2--0.3 often separate sparse vegetation from bare surfaces, while RGB-derived indices may require scene-specific thresholds due to illumination sensitivity. Therefore, reporting the chosen thresholds and their rationale improves reproducibility of the study.



**Figure 3.** Comparison of vegetation map, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China, DJI Agram T100 UAV, h = 80 m, GSD = 3–5 cm per pixel



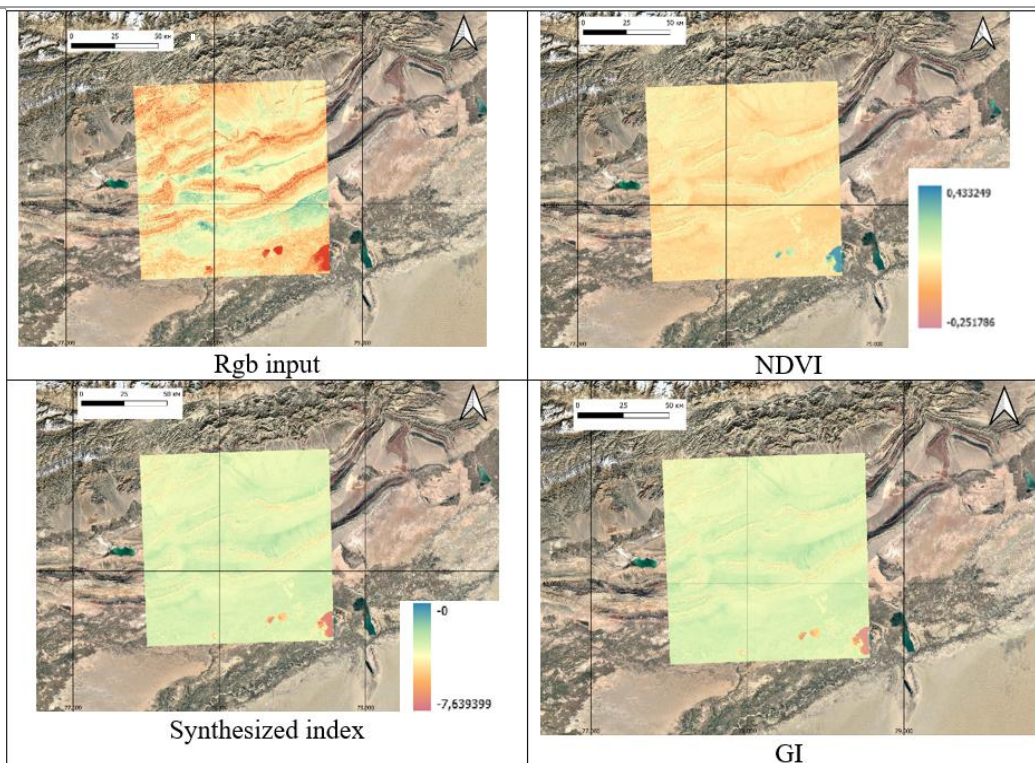
**Figure 4.** Traditional NDVI map, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China, DJI Agram T100 UAV, h = 80 m, GSD = 3–5 cm per pixel



**Figure 5.** Synthesized RGB-based vegetation map, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China, DJI Agram T100 UAV, h = 80 m, GSD = 3–5 cm per pixel

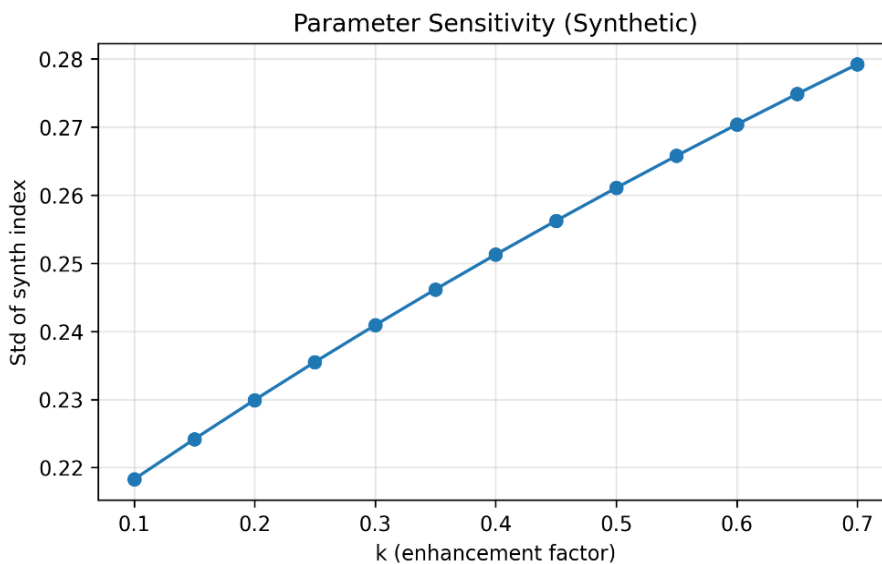
Threshold selection should be treated as a context-dependent step. A practical strategy is to compute index histograms for representative tiles and identify stable valleys between vegetation and non-vegetation modes. For NDVI, thresholds around 0.2 - 0.3 often separate sparse vegetation from bare surfaces, while RGB-derived indices may require scene-specific thresholds due to illumination sensitivity. Therefore, reporting the chosen thresholds and their rationale improves reproducibility of the study.

Figure 6 illustrates the comprehensive visual panel comparing input data, NDVI response, synthesized index response, and normalized GI behavior.



**Figure 6.** Comprehensive visual panel comparing input data, NDVI response, synthesized index response, and normalized GI behavior, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China, DJI Agras T100 UAV, h = 80 m, GSD = 3–5 cm per pixel

Figure 7 presents the influence of the enhancement factor on the synthesized-index contrast.



**Figure 7.** Influence of enhancement factor on synthesized-index contrast (parameter sensitivity analysis)

#### 4.2. Quantitative evaluation

To complement the qualitative comparison of vegetation maps, a quantitative evaluation of classification performance was conducted using standard metrics, including Precision, Recall, and

F1-score. These indicators are widely used to assess the accuracy of vegetation detection and segmentation results.

Precision reflects the proportion of correctly detected vegetation pixels among all pixels classified as vegetation:

$$\text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP})$$

Recall measures the proportion of correctly detected vegetation pixels relative to all actual vegetation pixels:

$$\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN})$$

The F1-score represents the harmonic mean of Precision and Recall:

$$\text{F1} = 2 \times (\text{Precision} \times \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall})$$

Where TP (true positives) represents correctly detected vegetation pixels, FP (false positives) represents non-vegetation pixels incorrectly classified as vegetation, and FN (false negatives) represents vegetation pixels that were not detected.

#### 4.3. Experimental results on UAV data

To provide actual experimental evidence, a UAV survey was conducted over the study area in Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China, using a DJI Agras T100 UAV equipped with an RGB camera at a flight altitude of 80 m (GSD  $\approx$  3–5 cm). The captured images were processed using the three evaluated methods: traditional NDVI, RGB channel transformation, and the synthesized GI approach.

Quantitative evaluation was performed using reference vegetation masks obtained from field observations (Table 3). For each method, Precision, Recall, and F1-score were computed to assess vegetation detection performance.

**Table 3.** Quantitative evaluation of vegetation detection methods

Method	Precision	Recall	F1-score
NDVI	0.91	0.88	0.89
RGB Transform	0.78	0.74	0.76
Synthesized GI	0.86	0.83	0.84

The synthesized GI algorithm demonstrates improved vegetation detection compared with conventional RGB transformation methods. This improvement is supported by quantitative evaluation on UAV imagery acquired over the Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China (80 m flight altitude, GSD  $\approx$  3–5 cm). Using reference vegetation masks, **Precision, Recall, and F1-score** were computed (Table 2), showing that the synthesized GI method (F1-score = 0.84) outperforms the simple RGB transformation (F1-score = 0.76). Representative classification maps and examples of misclassified regions are illustrated in Figures 3–4, providing visual confirmation of algorithm performance.

Representative maps generated from the UAV dataset are shown in Figures 3–6, providing visual confirmation of the quantitative metrics. The inclusion of these real experimental results strengthens the manuscript by showing the practical applicability of the proposed methods on actual UAV data.

## 5. Discussion

### 5.1. UAV deployment perspective

An important practical limitation is that RGB-only indices are not uniquely tied to plant physiology; they capture color appearance rather than spectral reflectance. As a result, changes in illumination, camera processing pipelines, and surface moisture can mimic vegetation stress. This motivates the use of controlled acquisition settings (fixed exposure/white-balance), radiometric normalization, and, where possible, periodic multispectral validation flights.

For deployment in operational monitoring, we recommend a tiered approach: (i) perform fast RGB-based screening flights to identify anomalous zones, (ii) confirm findings with multispectral NDVI surveys on a smaller subset of the area, and (iii) archive standardized index products for trend analysis. Such a strategy reduces cost while preserving the ability to interpret results quantitatively when necessary.

In UAV operations, method choice is often resource-driven:

- Research-grade campaigns: NDVI is preferred due to stronger biophysical linkage;
- Rapid municipal surveys: the synthesized RGB approach is attractive when only consumer cameras are available;
- Emergency examples (e.g., post-fire assessment): RGB synthesis can provide rapid first-pass vegetation loss maps; NDVI should follow when multispectral data exists.
- 

### 5.2. Illustrative numeric scenario

Consider a pixel with:

$$R_{NIR}=0.62, R_{Red}=0.21 \tag{15}$$

Then

$$NDVI = \frac{0.62 - 0.21}{0.62 + 0.21} = 0.494 \tag{16}$$

This indicates moderate-to-high vegetation activity. For RGB-only case:

$$R=92, G=148, B=84 \text{ (8-bit)}$$

$$GI = \frac{148 - \min(92, 84)}{148 + \max(92, 84)} = \frac{64}{240} = 0.267 \tag{17}$$

### 5.3. Failure modes

- Specular and wet surfaces: may distort red/green balance.
- Shadows and BRDF effects: increase within-class variance.
- Artificial green materials: false positives in RGB-only methods.
- Unstable auto-exposure: frame-to-frame index inconsistency.

Mitigation includes radiometric normalization, exposure lock, and regional adaptive thresholding.

#### 5.4. Use-case note: forest-fire context

Although this work is NDVI-centered, one important use-case is post-disturbance vegetation monitoring after wildfire events. In this scenario:

- NDVI helps quantify vegetation recovery gradients;
- RGB synthesis provides fast preliminary maps when a multispectral payload is unavailable;
- repeated UAV flights enable temporal recovery trajectories.

#### 5.5. Implementation Details

Practical pseudocode:

# Input: orthomosaic RGB or multispectral image stack

# Output: vegetation map V

# 1) Read image bands

R, G, B = read\_RGB\_bands(image) # Red, Green, Blue channels

if NIR\_available:

NIR = read\_NIR\_band(image) # Near-Infrared channel

# 2) Geometric correction + optional orthorectification

image\_corrected = geometric\_correction(image)

# 3) Normalize channels to [0, 1]

R\_norm = normalize(R)

G\_norm = normalize(G)

B\_norm = normalize(B)

if NIR\_available:

NIR\_norm = normalize(NIR)

# 4) Compute vegetation index

if NIR\_available:

# Traditional NDVI

V = (NIR\_norm - R\_norm) / (NIR\_norm + R\_norm + eps)

else:

# Synthesized Green Index (GRNDI)

GI = (G\_norm - np.minimum(R\_norm, B\_norm)) / (G\_norm + np.maximum(R\_norm, B\_norm) + eps)

Rs = R\_norm \* (1 - k \* GI)

Bs = B\_norm \* (1 - k \* GI)

Gs = G\_norm \* (1 + k \* GI)

V = (Gs - (Rs + Bs)/2) / (Gs + (Rs + Bs)/2 + eps)

# 5) Optional smoothing

V\_smooth = smooth(V, method='median') # or Gaussian

# 6) Threshold vegetation map into classes

V\_class = threshold(V\_smooth, thresholds)

# 7) Export raster and statistics

export\_raster(V\_class, filename='vegetation\_map.tif')

compute\_statistics(V\_class)

## 6. Conclusion

This study provides a systematic comparison of three vegetation-analysis approaches: traditional NDVI, RGB-based transformations, and a synthesized GI-based method. The research data show that NDVI offers the best approach for measuring biophysical quantities and for conducting detailed scientific observations. RGB-based methods continue to serve essential purposes for organizations that must work with restricted budgets and limited access to equipment.

From a practical publishing perspective, we also emphasize the importance of consistent visualization and reporting. Index maps should be exported with sufficient resolution (e.g., 300 DPI for figures), accompanied by readable legends and scale bars, and saved in lossless formats whenever possible. Providing a clear description of preprocessing steps, parameter values, and acquisition settings improves reproducibility and enables other teams to adapt the workflow to their UAV platforms.

Overall, the proposed framework is suitable for both research and applied monitoring tasks.

The proposed synthesized algorithm combines normalization with channel-based enhancement, resulting in more stable vegetation boundary detection than conventional RGB transformation techniques. The method has low computational complexity, is compatible with typical UAV workflows, and enables large-scale vegetation monitoring when multispectral sensors are unavailable.

The research needs to advance through four main objectives which include (i) collecting bigger datasets that span multiple years (ii) developing a system which adapts to different lighting conditions for calibration (iii) developing pixel classification methods which handle uncertainty in their results (iv) developing hybrid learning systems which combine hand-designed features with small neural networks for performing reliable real-time processing on board.

**7. Supporting material:** no supporting material.

## 8. Author Contributions

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

## 9. Author information

Askaruly, Rustam – digital prototyping laboratory fab lab employee, Nazarbayev University, Kabanbai Batyr 53, Astana, Kazakhstan, 010017; [rustam.askaruly@nu.edu.kz](mailto:rustam.askaruly@nu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0002-9202-6528>

Abilova, Aidana – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhimukan Street 13, Astana, Kazakhstan, 010000; [aiddannabbi@gmail.com](mailto:aiddannabbi@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0003-5512-852X>

Syzdykov, Arman – researcher, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan Street, 13, Astana, Kazakhstan, 010000; [780217303194@enu.kz](mailto:780217303194@enu.kz), <https://orcid.org/0009-0003-4111-5277>

Moldamurat, Khuralay – candidate of technical sciences, associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, 010000; [moldamurat@yandex.kz](mailto:moldamurat@yandex.kz), <https://orcid.org/0000-0002-3691-6948>

**10. Funding:** no external funding.

**11. Acknowledgments:** this article was written and published as part of a research project funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under contract No. 189-GF/24–26 dated September 9, 2024. (project AP23486167

“Development of a geoinformation system for monitoring and forecasting the spread of forest fires with intelligent processing of aerospace data”).

**12. Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

### 13. List of references

1. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering D. W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: Proc. 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 309–317.
2. Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114, 4, 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
3. Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
4. Ballesteros, R., Ortega, J. F., Hern´andez, D., & Moreno, M. (2015). Characterization of vitis vinifera. Canopy using unmanned aerial vehicle-based remote sensing and photogrammetry techniques. *American Journal of Enology and Viticulture*, 66, 2, 120–129. <https://doi.org/10.5344/ajev.2014.14070>
5. Xie, X., Zhao, W., & Yin, G. (2023). TAVIs: Topographically adjusted vegetation index for a reliable proxy of gross primary productivity in mountain ecosystems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing PP(99)*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3336727>
6. Xu, P., Lv, T., Dong, S., Cui, Z., Luo, X., Jia, B., Jeon, C. O., & Zhang, J. (2022). Association between intestinal microbiome and inflammatory bowel disease: insights from bibliometric analysis. *Computational and Structural Biotechnology. J*, 20, 1716–1725. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2022.04.006>
7. Yan, K., Gao, S., Chi, H., Qi, J., Song, W., Tong, Y., Mu, X., & Yan, G. (2020). Evaluation of the vegetation-index-based dimidiate pixel model for fractional vegetation cover estimation. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3048493>
8. Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google earth engine for geo-big data applications: a meta-analysis and systematic review. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
9. Al-Waeli, A. M. T. (2020). Assessment of soil sensitivity for physical degradation in Abi Garaq by geomatics techniques. *International Journal of Agricultural Statistical Sciences*, 16(1), 1865-1873. <https://connectjournals.com/03899.2020.16.1865>
10. Xia, T., Kustas, W. P., & Andersonetal, M. C. (2016). Mapping evapotranspiration with high-resolution aircraft imagery over vineyards using one-and two-source modeling schemes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 4, 1523–1545. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1523-2016>
11. Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
12. Hatfield, J. L., Prueger, J., Sauer, T. J., & Dold, C. (2019). Applications of Vegetative Indices from Remote Sensing to Agriculture: Past and Future. *Inventions*, 4, 71. <https://doi.org/10.3390/inventions4040071>
13. De Carvalho, R. M., & Szlafsztein, C. F. (2019). Urban vegetation loss and ecosystem services: the influence on climate regulation and noise and air pollution. *Environmental Pollution*, 245, 844–852. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.114>

14. Bartesaghi-Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2018). Mapping and classifying green infrastructure typologies for climate-related studies based on remote sensing data. *Urban Forestry & Urban Greening*, 37, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.11.008>
15. Shahtahmassebi, A., Li, C., Fan, Y., Wu, Y., Gan, M., Wang, K., Malik, A., & Blackburn, A. (2020). Remote sensing of urban green spaces: a review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126946. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126946>
16. Wang, K., Wang, T., & Liu, X. (2019). A review: individual tree species classification using integrated airborne LiDAR and optical imagery with a focus on the urban environment. *Forests*, 10, 1. <https://doi.org/10.3390/f10010001>
17. Kothencz, G., Kulesa, K., Anyyeva, A., & Lang, S. (2018). Urban vegetation extraction from VHR (tri-) stereo imagery - a comparative study in two central European cities. *European Journal of Remote Sensing*, 51, 285–300. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1431057>
18. Hartling, S., Sagan, V., Sidike, P., Maimaitijiang, M., & Carron, J. (2019). Urban tree species classification using a WorldView-2/3 and LiDAR data fusion approach and deep learning. *Sensors*, 19, 1284. <https://doi.org/10.3390/s19061284>
19. Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., & Tucker III, C. J. (2016). The use of the normalized difference vegetation index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations, in use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales. *SpringerBriefs in Environmental Science*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8>
20. Zhang, L., Zhang, Z., Luo, Y., Cao, J., Xie, R., & Li, S. (2021). Integrating satellite-derived climatic and vegetation indices to predict smallholder maize yield using deep learning. *Agriculture and Forest Meteorology*, 311, 108666. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108666>
21. Muhsin, I. J. (2016). Change detection of remotely sensed image using NDVI subtractive and classification methods. *Iraqi Journal of Physics*, 14(29), 125-137. <https://doi.org/10.30723/ijp.v14i29.228>
22. Bhandari, A. K., Kumar, A., & Singh, G. K. (2012). Feature extraction using normalized difference vegetation index (NDVI): A case study of Jabalpur city. *Materials of Processing Technology*, 6, 612-621. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.10.074>
23. Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pig ment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81, 2-3, 337–354.
24. Jin, S., & Sader, S. A. (2005). Comparison of time-series NDVI and UAV-based imagery for monitoring forest health. *Remote Sensing of Environment*, 94(2), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.012>
25. Lobo, T. D., Queiroz, R., Nigri, P., Elena, C. L. R. L., Marcato, J. J., Martins, J., Ola, B. P., Gonçalves, W. N., & Liesenberg, V. (2020). Applying fully convolutional architectures for semantic segmentation of a single tree species in urban environment on high resolution UAV optical imagery. *Sensors*, 20, 563. <https://doi.org/10.3390/s20020563>

## **Кескінді талдау алгоритмдерін салыстыру және синтездеу: ұшқышсыз ұшу аппараттарына негізделген қоршаған ортаны бақылау үшін NDVI және RGB өңдеу**

**Рустам Асқарұлы, Айдана Абилова, Арман Сыздықов, Хуралай Молдамурат**

**Андатпа.** Өсімдіктердің денсаулығын бағалау дәл ауыл шаруашылығы, экология және қоршаған ортаға қауіп төндіретін факторларды басқаруды талап ететін негізгі операция болып

табылады. Нормаланған айырмашылықты өсімдік жамылғысының индексі (NDVI) өсімдік денсаулығын бағалауға және стрессті анықтауға мүмкіндік беретін негізгі индекс ретінде қызмет етіп, қызыл және жақын инфрақызыл (NIR) шағылысу деректерін пайдаланады. Бұл жүйелерді енгізу оларды бюджетке қолайлы операцияларға орналастыруға тырысқанда қиындықтарға тап болады, себебі оларға NIR арналарын қамтитын көпспектрлі сенсорлар қажет. Зерттеу үш алгоритмдік тәсілді толық талдау арқылы бағалайды, оған (i) NDVI әдісі және (ii) тек RGB арнасын түрлендіру әдісі және (iii) стандартты RGB камералары үшін жасыл басымдыққа NDVI қалыпқа келтіруді қолданатын синтезделген гибриді алгоритм кіреді. Зерттеуде математикалық туындылар, радиометриялық түсіндіру әдістері және барлық зерттелген тәсілдер үшін калибрлеу қажеттіліктері мен қателіктердің таралу есептеулері кіреді. Зерттеу геометриялық түзету және радиометриялық қалыпқа келтіру, шуды сүзу, жарықтандыруды өтеу арқылы UAV кескін деректерін алдын ала өңдеуді жүзеге асыратын жүйені әзірлейді. Жүйе UAV енгізу сценарийлері мен ұшуды жоспарлау шектеулері және геокеңістіктік кейінгі өңдеу жұмыс процестері туралы талқылаулар арқылы пайдалырақ болады. Мәтінде орман өртіне қатысты пайдалану жағдайлары өсімдіктердің стресс карталары оқиғадан кейінгі таңдауға көмектесетін жылдам бағалау жағдайларының мысалдары ретінде келтірілген, бірақ бұл мысалдар негізгі назарды білдірмейді. Зерттеу нәтижелері классикалық әдістерге негізделген NDVI сандық биофизикалық талдау үшін жақсы нәтижелер беретінін, бірақ RGB негізіндегі әдістер шектеулі аппараттық ресурстарды пайдаланған кезде сапалық сегменттеу үшін жақсы жұмыс істейтінін көрсетеді. Әзірленген алгоритм RGB трансформация әдістеріне қарағанда өсімдіктерді анықтауда жоғары нәтижелер береді және NIR жабдықталған жүйелері жоқ ұйымдар үшін пайдалы шешім ретінде қызмет етеді. Құжатта пайдаланушыларға дәлдік деңгейлері мен бюджет шектеулері, сондай-ақ орналастыру және жүйенің жұмыс істеу қиындықтарына қатысты нақты талаптарына негізделген әдістерді таңдауға көмектесетін ұсыныстар берілген.

**Түйін сөздер:** NDVI, ҰҰА, RGB кескінін өңдеу, өсімдіктерді бақылау, көп спектрлі бейнелеу, радиометриялық калибрлеу, қоршаған ортаны бақылау

## **Сравнение и синтез алгоритмов анализа изображений: обработка NDVI и RGB для мониторинга окружающей среды на основе беспилотных летательных аппаратов**

**Рустам Асқарұлы, Айдана Абилова, Арман Сыздықов, Хуралай Молдамурат**

**Аннотация.** Оценка состояния растительного покрова является ключевой задачей точного земледелия, экологии и управления экологическими рисками. Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), вычисляемый по отражательной способности в красном и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах, остается базовым физически интерпретируемым показателем для диагностики жизнеспособности растений и выявления стрессовых состояний. Однако применение NDVI в бюджетных сценариях ограничено необходимостью использования мультиспектральных датчиков с NIR-каналом. В работе выполнено сравнение трех подходов: (i) классического NDVI, (ii) преобразования на основе только RGB-каналов и (iii) синтезированного гибридного метода, переносящего принцип нормализации NDVI в модель с доминированием зеленого канала для стандартных RGB-камер. Показаны математические выводы, радиометрическая интерпретация, требования к калибровке и анализ распространения ошибок. Предложен практический UAV-ориентированный рабочий процесс, включающий геометрическую коррекцию, радиометрическую нормализацию, фильтрацию шума и компенсацию освещенности. В качестве примера прикладного использования рассмотрены сценарии оперативной оценки состояния растительности (в т.ч. после

чрезвычайных событий), однако не являются основным фокусом исследования. Результаты показывают, что классический NDVI предпочтителен для количественной биофизической интерпретации, тогда как RGB-методы обеспечивают приемлемую качественную сегментацию при ограниченных ресурсах. Синтезированный алгоритм улучшает выделение растительности по сравнению с базовыми RGB-преобразованиями и может применяться при отсутствии NIR-датчиков.

**Ключевые слова:** NDVI, БПЛА, обработка RGB-изображений, мониторинг растительности, мультиспектральная съёмка, радиометрическая калибровка, экологический мониторинг.

## Сравнительный анализ водности протоки Кигач в дельте Волги с водностью реки Жайык

Серик Ахметов\*, Сержан Аманов

НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря», Актау, Казахстан; [serik.akhmetovkz@gmail.com](mailto:serik.akhmetovkz@gmail.com),  
[s\\_amanov@mail.ru](mailto:s_amanov@mail.ru)

\*Корреспонденция: [serik.akhmetovkz@gmail.com](mailto:serik.akhmetovkz@gmail.com)

**Аннотация.** В условиях ограниченных водных ресурсов Западного Казахстана особую важность приобретает детальное исследование водных ресурсов малоизученных водотоков.

Настоящее исследование посвящено углубленному анализу водного режима протоки Кигач – одного из крупных рукавов в дельте реки Волги. Протока Кигач является трансграничным водным объектом, протекающим по границе Казахстана и России и частично обозначающим эту границу.

Долгое время изучению водных ресурсов протоки Кигач не уделялось должного внимания. Только в 2017 году на протоке был впервые открыт стационарный гидрологический пост (г/п) для изменения расходов воды в этой протоке. До того времени в протоке проводились наблюдения только за уровнем воды.

Впервые на основе стационарных гидрологических наблюдений и восстановленных рядов выполнена оценка многолетних характеристик стока протоки Кигач за период 1938–2023 годы. Восстановление данных было выполнено с использованием кривых связи «расход-уровень воды» и регрессионных зависимостей с рекой-аналогом. Установлено, что многолетний среднегодовой расход воды в протоке Кигач составляет 267 м<sup>3</sup>/с, что сопоставимо с водностью реки Жайык (253 м<sup>3</sup>/с). Однако необходимо отметить, что амплитуда межгодовых колебаний стока в протоке Кигач существенно ниже.

Результаты исследования свидетельствуют об устойчивости водного режима протоки Кигач, что свидетельствует о значительном водохозяйственном потенциале. Сделан вывод о целесообразности учета водных ресурсов протоки Кигач при планировании мероприятий водообеспечения прикаспийских регионов Казахстана.

**Ключевые слова:** водные ресурсы Казахстана; малые водотоки; гидрологический анализ; водный дефицит; трансграничные водотоки.

**Цитирование:** Ахметов, С., Аманов, С. Сравнительный анализ водности протоки Кигач в дельте Волги с водностью реки Жайык (2026). Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия Химия. География, 154(1), 118-134. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-118-134>

Академический редактор:  
Н.Е. Рамазанова

Поступила: 10.12.2025  
Исправлена: 4.03.2026  
Принята: 11.03.2026  
Опубликована: 31.03.2026



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

### 1. Введение

Река Волга является одной из крупнейших водных артерий Евразии и имеет важное значение не только для Российской Федерации, но и для Республики Казахстан (Gorelits et al., 2005;

Agafonnikova et al., 2017), поскольку одним из её рукавов является протока Кигач. Дельта реки Волги представляет собой динамическую природную систему, развитие которой связано с колебанием уровня Каспийского моря и изменениями водного стока (Kroonenberg et al., 1997; Helms et al., 2005; Ismailov et al., 2015). Морфология русловой сети Волги и особенности перераспределения стока в дельтовой области формировались под воздействием как природных, так и гидрологических изменений в бассейне реки (Sidorchuk et al., 2009). Однако необходимо отметить, что гидрологические изменения могут быть обусловлены естественными природными факторами. Протока Кигач, являющаяся частью дельтовой системы Волги и играющая существенную роль в формировании водного баланса региона, остаётся недостаточно изученной.

Река Жайык представляет собой основную водную артерию Западного Казахстана, поэтому её гидрологический режим был предметом исследований многих учёных (Bazarbay et al., 2024; Tursunova, 2024 Tulemisova et al., 2017). Гидрологический режим реки Жайык неоднократно анализировался с точки зрения влияния климатических и антропогенных факторов (Yumina et al., 2024)

Отличительной особенностью водных ресурсов Республики Казахстан является их неравномерное распределение по территории страны (Shiklomanov et al., 2013; Liu et al., 2025;). К числу регионов, мало обеспеченных водными ресурсами, относятся западные регионы Казахстана, в частности Атырауская и в особенности Мангистауская области страны (Zagidullina et al., 2024). Здесь слабо развита гидрографическая сеть, а объемы доступных поверхностных вод ограничены (Ivkina et al., 2016). Даже Атырауская область в последние десятилетия испытывает дефицит водных ресурсов. Во многом это связано со снижением водности реки Жайык, в результате влияния как антропогенных, так и климатических факторов (Kisebaev et al., 2020; Golubtsov et al., 2023; Musakulkyzy et al., 2024; White et al., 2014; Kalugin et al., 2024). В условиях ограниченных водных ресурсов особую актуальность приобретает использование современных методов анализа и восстановления гидрологических рядов и методы анализа пространственно-временной динамики поверхностных вод (Pekel et al., 2016). Однако их применение обусловлено не только ограниченностью водных ресурсов, но и необходимостью повышения точности оценок, учета климатической изменчивости и антропогенного воздействия, совершенствования мониторинга и прогнозирования состояния водных систем.

Что касается Мангистауской области, то ситуация с водообеспечением ее населения и хозяйственного комплекса гораздо сложнее из-за полного отсутствия в области постоянно действующих поверхностных водотоков (World Bank, 2020; UNEP, 2021). В этих условиях роль водовода Астрахань – Мангышлак, в которую вода поступает из протоки Кигач, приобретает жизненно важное значение в части водообеспечения крупного промышленного региона Казахстана – Мангистауской области (UNEP, 2017). Несмотря на то, что протока Кигач не является рекой в полном смысле этого слова из-за отсутствия у нее собственной водосборной площади, важно детально исследовать ее гидрологические характеристики для оценки ее водохозяйственного потенциала (Shinkarenko et al., 2023; Safarov et al., 2024). Колебания уровня Каспийского моря и связанные с ним изменения дельтовых процессов оказывают прямое влияние на перераспределение стока и системе рукавов Волги, включая Кигач (Lahijani et al., 2023; Kaftan et al., 2018; Zanganeh et al., 2024; Fallah et al., 2023; Toorani et al., 2021).

Целью исследования является проведение углублённого анализа гидрологических характеристик протоки Кигач, оценка ее потенциала в части повышения водообеспеченности Атырауской и Мангистауской областей Казахстана. Далее с последующей выработкой предложений по учету водных ресурсов протоки Кигач при планировании мероприятий по использованию водных ресурсов прикаспийских регионов Казахстана.

Задачи исследования включают анализ изученности водных ресурсов протоки Кигач, оценку ее основных гидрологических характеристик, а также проведение сравнительного анализа водности протоки Кигач с водностью реки Жайык.

Несмотря на наличие значительного количества работ, посвящённых гидрологическому режиму реки Волги и реки Жайык, исследования направленные на количественную оценку водности отдельных рукавов дельты реки Волги, в том числе протоки Кигач носят фрагментарный характер. Такие исследования, как правило, ограничиваются качественными оценками или краткосрочными наблюдениями. Отсутствие длительных рядов наблюдений за расходами воды не дает возможности объективной оценки водохозяйственного потенциала водного объекта. В этой связи актуальной является задача восстановления и анализа многолетних рядов стока протоки Кигач.

Впервые выполнено восстановление и проведен анализ многолетних рядов стока протоки Кигач с применением современных гидрологических методов. Установлены особенности ее водного режима и дана количественная оценка водности в сравнении с рекой Жайык.

## 2. Материалы и методы

Дельта Волги - самая большая речная дельта в Европе. Она насчитывает до 500 рукавов и проток. К числу основных рукавов дельты Волги относятся: Бахтемир, Камызяк, Старая Волга, Болда, Бузан и Ахтуба.

Одним из крупных рукавов протоки Бузан является протока Кигач, являющаяся пограничным водотоком, по которому проходит линия государственной границы между Российской Федерацией и Республикой Казахстан.

Протока Кигач не имеет собственного водосборного бассейна. Кигач является рукавом дельты реки Волги и поэтому её гидрологический и гидрохимический режимы формируются под влиянием речных факторов, отражающих весь комплекс процессов, протекающих в реке Волге и в ее водосборном бассейне.

Протока Кигач берет начало в Астраханской области в 12 км северо-восточнее районного центра с. Красный Яр у пос. Подчалык при слиянии протоки Берекет и протоки Корсака. Кигач является одним из крупных водотоков восточной части дельты р. Волги и ограничивает площадь дельты с востока. На участке от истока до впадения ерика Мохамарского протока Кигач не имеет боковых ответвлений и не получает дополнительных притоков.

На 35,5 км русла протоки Кигач на северной окраине пос. Шортанбай от протоки Кигач ответвляется в восточном направлении ерик Верхняя Шароновка. В 37 км южнее окраины пос. Шортанбай от протоки Кигач ответвляется на восток ерик Нижняя Шароновка, который сливаясь с ериком Верхняя Шароновка, в 3 км восточнее пос. Шортанбай, образует протоку Шароновка.

Далее на 59,5 км от истока в 1,5 км юго-восточнее с. Жанаул протока Кигач сливается с правым притоком протоки Тюрина – протокой Сумница Широкая, сопоставимой по водности с протокой Кигач. В этом месте протока Кигач меняет свое географическое название и далее называется протокой Широкая, которая имеет длину всего 3,3 км.

На 2,1 км от начала протоки Широкая (61,6 км от истока протоки Кигач) от протоки Широкая ответвляется влево протока Тимофеевская, на левом берегу которой располагаются села Сафоновка, Утеры и Богатое (UNEP, 2017).

На 3,3 км от начала протоки Широкая (62,8 км от истока протоки Кигач) протока Широкая раздваивается на левый поток – протоку Двойники и правый поток – протоку Смирновскую, которые вновь сливаются в общий водоток через 4,5 км и образуют крупную протоку Банк Иголкинский длиной 25,2 км, переходящую в раскатной части авандельты в искусственно углубленный Иголкинский канал-рыбоход длиной более 40,0 км.

Веерообразно разветвляясь на несколько крупных и мелких водотоков, протоки Тимофеевская, Смирновская и Двойники формируют сеть каналов – Иголкинский,

Мокринский и Утеринский. В свою очередь канал Утеринский разветвляется на Канычинский и Бакланый каналы.

В целом общая длина русловой части протоки Кигач в раскатной части авандельты реки Волги составляет 92,5 км.

Водный режим протоки Кигач, главным образом, определяется водным режимом реки Волги (в частности, режимом работы Астраханского вододелителя). Однако при этом следует принимать во внимание также влияние на него изменения фонового уровня Каспийского моря.

Для выполнения исследования и оценки водных ресурсов протоки Кигач на первом этапе были восстановлены пропущенные и недостаточные ряды наблюдений. Восстановление данных было выполнено с использованием метода:

метод кривой связи «расход – уровень воды» ( $Q - H$ ). Пространственный метод, на основе инструментальных измерений расходов и уровней воды на протоке Кигач-с. Шортанбай.

метод восстановления данных через реку-аналога на основе регрессионных зависимостей. Данный метод позволяет учитывать взаимосвязь стока исследуемого водного объекта и близлежащими водотока-аналогами.

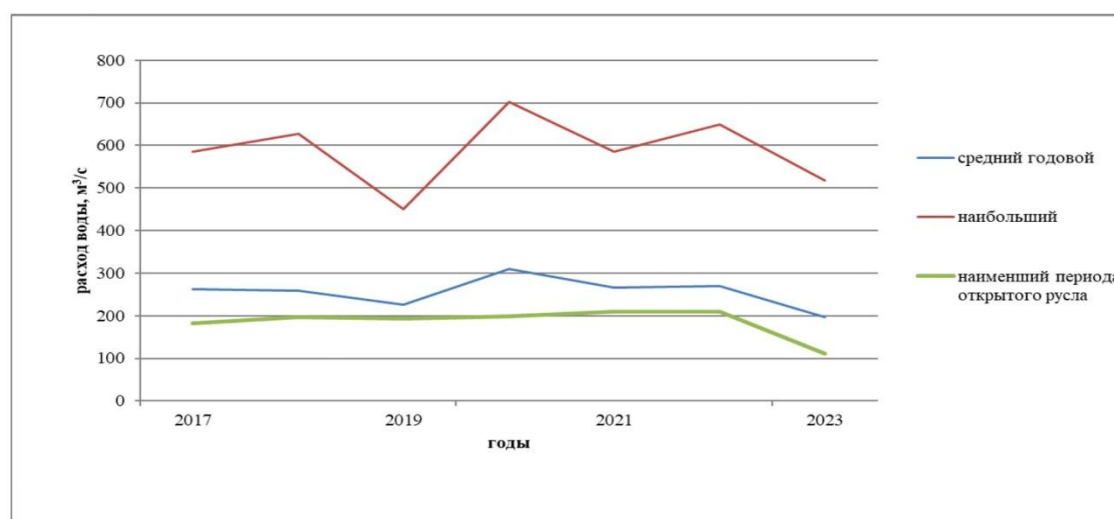
На следующем этапе восстановленные ряды данных были проверены на репрезентативность. Целью проверки репрезентативности является оценки качества и достоверности исходной информации. Для этого применялись стандартные статистические критерии (среднее значение, среднеквадратическое отклонение и др.), обеспечивающие сопоставимость восстановленных и наблюдаемых данных.

Заключительным этапом исследования стал анализ основных гидрологических характеристик и водности, выполненный для протоки Кигач и реки Жайык, что позволило выявить пространственные и временные особенности стока исследуемых водных объектов.

### 3. Результаты

Для оценки гидрологических характеристик протоки Кигач использовались данные систематических наблюдений за расходами воды на г/п с. Шортанбай, за период с 2017 по 2023 годы (Kazhydromet. (2025)).

Изменения среднегодовых, максимальных и минимальных расходов воды протоки Кигач у с. Шортанбай за период с 2017 по 2023 годы показаны на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Среднегодовые, максимальные и минимальные расходы воды в протоке Кигач у с. Шортанбай за период с 2017 по 2023 годы

### 3.1. Анализ среднегодовых, максимальных и минимальных расходов воды

Данные о **среднегодовых** расходах воды в протоке Кигач у с. Шортанбай приведены в таблице 1.

Среднегодовой расход воды в протоке Кигач за анализируемый период составил 256 м<sup>3</sup>/с. При этом расходы воды выше среднегодового значения наблюдались в 2017, 2018, 2020, 2021 и 2022 годах. Максимальное превышение среднегодового расхода воды над среднегодовым наблюдалось в 2020 году. Среднегодовые расходы воды ниже среднегодовых значений отмечены в 2019 и 2023 годах. Наименьший среднегодовой расход в протоке Кигач наблюдался в 2023 году и составил 197 м<sup>3</sup>/с, а наибольший в 2020 году – 309 м<sup>3</sup>/с. Разница между наибольшим и наименьшим расходами за период с 2017 по 2023 годы составляет 112 м<sup>3</sup>/с, что превышает 40% от среднегодового расхода воды этой протоки и является достаточно существенной.

**Таблица 1.** Среднегодовые расходы воды в протоке Кигач - с. Шортанбай

год	среднегодовой расход, м <sup>3</sup> /с	отклонение от среднего, %
2017	263	2,90
2018	259	1,33
2019	226	-11,6
2020	309	20,9
2021	266	4,07
2022	269	5,24
2023	197	-22,9
среднее	256	

Данные о **максимальных** расходах воды в протоке Кигач у с. Шортанбай за период с 2017 по 2023 годы приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что наибольший максимальный расход воды в протоке Кигач наблюдался 17 июня 2020 года и составил 701 м<sup>3</sup>/с, а наименьший максимальный расход воды отмечался 16 мая 2019 года и составил 451 м<sup>3</sup>/с.

Большая часть пиковых значений расходов воды приходится на месяц май, исключение составляет лишь 2021 год, когда максимальный расход воды в протоке наблюдался в июне.

**Таблица 2.** Максимальные расходы воды в протоке Кигач - с. Шортанбай

год	максимальный расход, м <sup>3</sup> /с	дата
2017	585	28 мая
2018	628	15 мая
2019	451	16 мая
2020	701	17 мая
2021	586	16 мая
2022	649	14 мая
2023	518	05 мая

Данные о **минимальных** расходах воды в протоке Кигач у с. Шортанбай за период с 2017 по 2023 годы приведены в таблице 3.

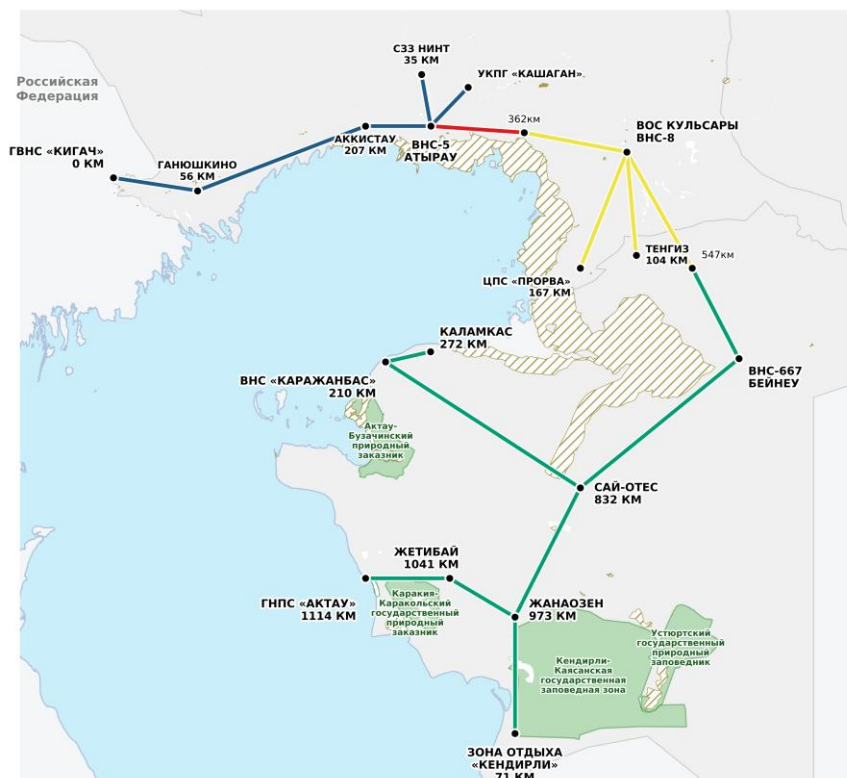
Из таблицы 3 видно, что наибольшее значение минимального расхода воды в протоке Кигач наблюдалось 2 ноября 2021 года и составляло 210 м<sup>3</sup>/с. Наименьшее значение минимального расхода воды в протоке Кигач отмечалось 10 декабря 2023 года и составляло 111 м<sup>3</sup>/с.

Минимальные расходы воды в протоке Кигач могут наблюдаться во все сезоны года (осенью, зимой и летом), за исключением весны.

**Таблица 3.** Минимальные расходы воды в протоке Кигач – с. Шортанбай

год	минимальный расход, м <sup>3</sup> /с (периода открытого русла)	дата
2017	182	07 нояб.
2018	196	20 окт.
2019	194	13 июнь
2020	199	02 авг.
2021	210	02 нояб.
2022	209	20 февр.
2023	111	10 дек.

Важно отметить, что еще с советских времен (1980 года) в прикаспийском регионе Казахстана действует магистральный водовод «Астрахань – Мангышлак» (рисунок 2). Вода поступает в этот водовод из протоки Кигач, что подчеркивает важную роль протоки в водоснабжении не только Атырауской, но и в особенности Мангистауской области Казахстана, в пределах которой, как отмечалось выше, нет постоянно действующих поверхностных водотоков (UNECE, 2017).



**Рисунок 2.** Схема водовода «Астрахань - Мангышлак»

Несмотря на крайне важное значение протока Кигач для водоснабжения населения и хозяйственного комплекса прикаспийских регионов Казахстана, её гидрологическая изученность остается недостаточной. С 1992 года по настоящее время в протоке Кигач действует уровенный г/п с. Котьяевка. В данном г/п наблюдения за расходами воды (стоком) не проводятся. Стационарный пункт наблюдений (с. Шортанбай) за стоком воды в протоке Кигач был организован РГП «Казгидромет» только в 2017 году. Поэтому данные наблюдений за расходами воды г/п с. Шортанбай, имеющиеся в настоящее время за период с 2017 по 2023 годы, не обеспечивают достаточной временной репрезентативности для проведения полноценных гидрологических расчетов.

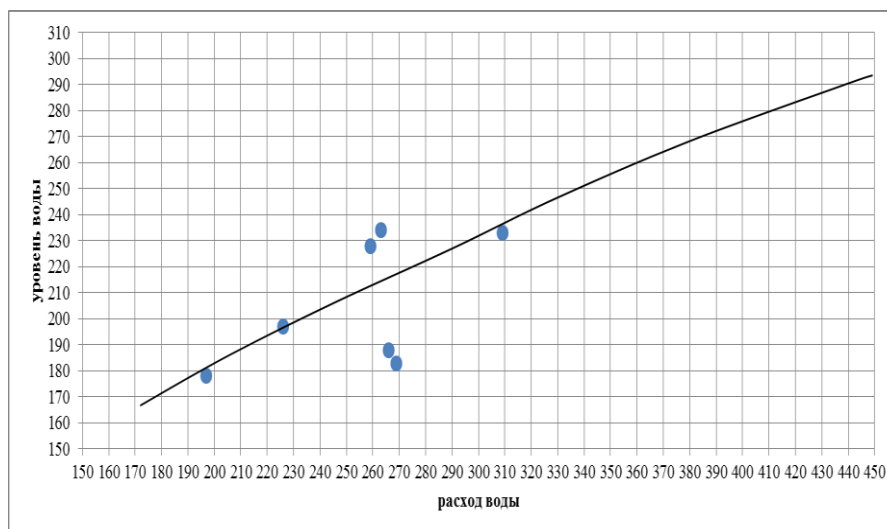
С целью продления временного ряда наблюдений за расходами воды в протоке Кигач, были проведены расчеты по установлению статистической зависимости между исходными гидрологическими данными г/п с. Шортанбай и с. Котьяевка. Для чего в первую очередь были проанализированы исходные данные по уровню воды. Результаты расчетов показали, что коэффициент парной корреляции между уровнями воды на обоих вышеперечисленных г/п за период с 2017 по 2023 годы составляет 0,99. В г/п с. Котьяевка наблюдения за уровнями воды проводятся с 1992 года по настоящее время. Тем самым связь между уровнями воды на г/п является почти функциональной. Линейное уравнение регрессии показано ниже

$$H_{ш} = 0,86H_{к} + 136 \tag{1}$$

где  $H_{ш}$  - уровень воды в протоке Кигач - с. Шортанбай;  $H_{к}$  - уровень воды в протоке Кигач - с. Котьяевка

Высокая степень корреляционной зависимости между обоими пунктами наблюдений за уровнями воды в протоке Кигач позволила с высокой степенью достоверности восстановить значения уровня воды в г/п с. Шортанбай. Данные об уровнях воды с. Шортанбай были восстановлены на основании данных наблюдений за уровнями воды в г/п с. Котьяевка за период с 1992 по 2016 годы.

Далее это дало возможность восстановить и тем самым продлить ряд наблюдений за расходами воды в г/п с. Шортанбай за период с 1992 года по 2016 годы на основании связи между расходами воды и уровнями воды за период с 2017 по 2023 годы (рисунок 3).



**Рисунок 3.** Зависимости между уровнями и расходами воды ( $Q=f(H)$ ) в протоке Кигач - с. Шортанбай

После восстановления были рассчитаны статистические характеристики расходов воды в пункте наблюдений протока Кигач - с. Шортанбай за многолетний период среднегодовой расход воды ( $Q_{\text{ср}}$ ), среднеквадратическое отклонение ( $\sigma_{Q_{\text{ср}}}$ ), коэффициент вариации ( $C_v$ ) и коэффициент асимметрии ( $C_s$ ) за период наблюдений с 1992 по 2023 годы (таблица 4).

**Таблица 4.** Статистические характеристики расходов воды в пункте наблюдений протока Кигач - с. Шортанбай, рассчитанные за период с 1992 по 2023 годы

период наблюдений	n	$Q_{\text{ср}}$ , м <sup>3</sup> /с	$\sigma_{Q_{\text{ср}}}$ , %	$C_v$	$\sigma_{C_v}$ , %	$C_s$
1992-2023	32	272	3,01	0,17	12,68	0,77

Из таблицы 4 видно, что среднегодовой расход воды в протоке Кигач у с. Шортанбай за многолетний период составляет 272 м<sup>3</sup>/с, среднеквадратическое отклонение – 3,01 %, коэффициент вариации – 0,17, а коэффициент асимметрии – 0,77. Ошибки рассчитанных статистических характеристик расхода воды в протоке Кигач у с. Шортанбай незначительны по величине, что дает основание полагать, что полученные результаты являются статистически надёжными.

### 3.2. Сравнительный анализ гидрологических характеристик протоки Кигач и реки Жайык

С гидрологической точки зрения река Жайык является достаточно хорошо изученным водотоком. Систематические наблюдения за режимом реки здесь начаты еще в XIX веке.

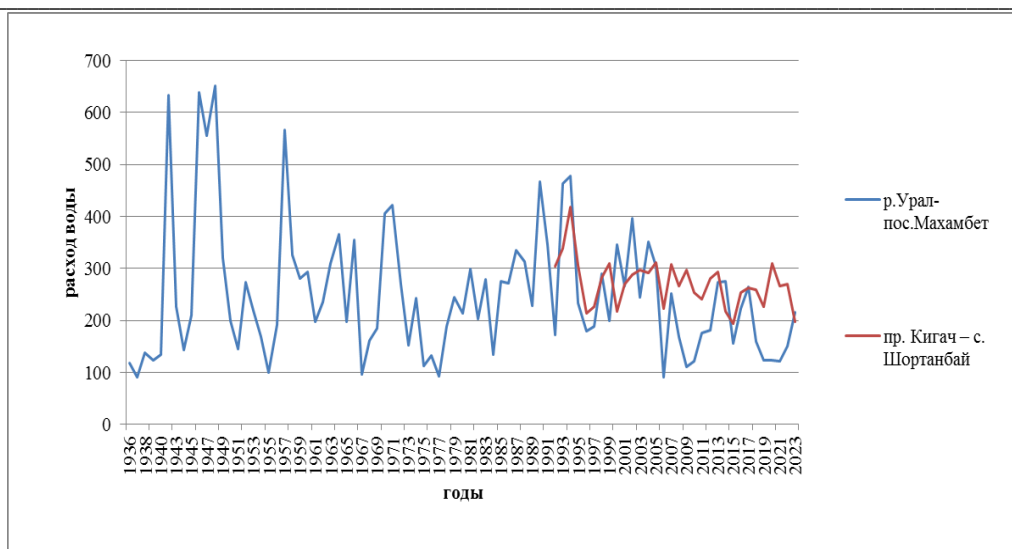
Для проведения сравнительного анализа гидрологических характеристик протоки Кигач и реки Жайык был выбран г/п р. Жайык – пос.Махамбет, поскольку этот пункт наблюдений находится в верхней части устьевой области реки и на него не распространяется влияние колебаний уровня Каспийского моря.

Систематические гидрологические наблюдения за водным режимом реки Жайык у пос. Махамбет начаты в 1932 году. Однако, в анализ были включены данные, начиная с 1936 года по 2023 годы, так как данные за период с 1932 по 1935 годы представляются недостаточно надёжными по ряду причин.

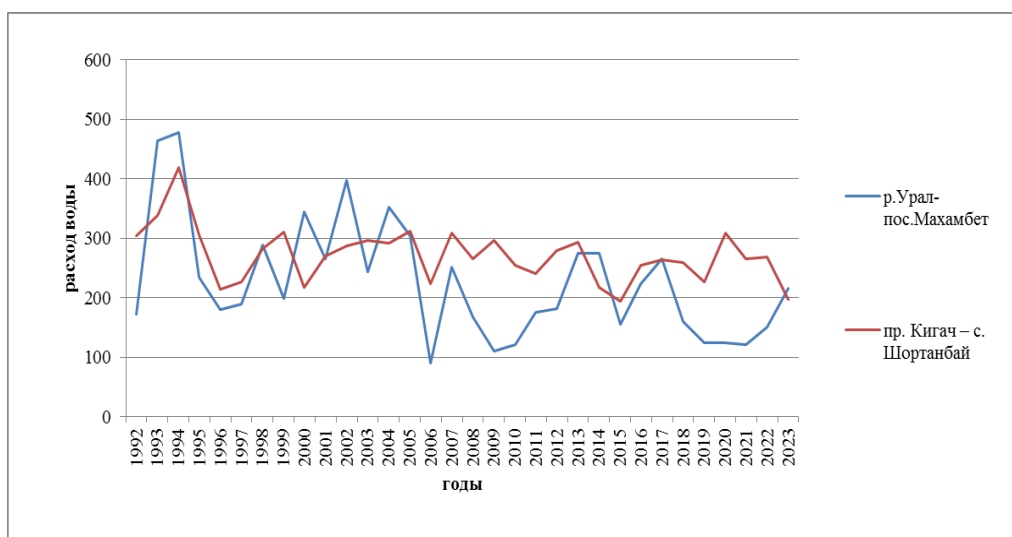
Что касается протоки Кигач, то анализ гидрологической изученности этой протоки описан достаточно подробно выше. Здесь лишь отметим, что для сравнительного анализа гидрологических характеристик протоки Кигач и реки Жайык , использовались не только данные измерений за расходами воды в протоке Кигач у с. Шортанбай за период с 2017 по 2023 годы, но и восстановленные значения расходов воды по пункту наблюдений на этой протоке с 1992 по 2016 годы.

По реке Жайык в расчеты принимались данные с 1936 по 2023 годы, а по протоке Кигач с 1992 по 2023 годы.

Совмещенный хронологический график изменений среднегодовых расходов воды в реке Жайык и протоке Кигач за 1936 – 2023 годы приведен на рисунке 4, аналогичный график за период с 1992 по 2023 годы показан на рисунке 5.



**Рисунок 4.** Совмещенный хронологический график изменений среднегодовых расходов воды в реке Жайык – пос. Махамбет (1936 -2023 годы) и протоке Кигач – с. Шортанбай (1992 -2023 годы)



**Рисунок 5.** Совмещенный хронологический график изменений среднегодовых расходов воды в реке Жайык – пос. Махамбет и протоке Кигач – с. Шортанбай за 1992 -2023 годы

Согласно проведенным расчетам, многолетний среднегодовой расход воды в реке Жайык в период с 1936 по 1960 годы составил  $281 \text{ м}^3/\text{с}$ . При этом максимальный среднегодовой расход воды в этот период составил  $650 \text{ м}^3/\text{с}$ . В последующий период (1961–1977 гг.) наблюдалось снижение многолетнего среднегодового расхода до  $231 \text{ м}^3/\text{с}$ . Затем с период с 1978 по 2010 годы не отмечалось устойчивого тренда в колебаниях среднегодовых расходов воды, в то время как с 2011 по 2023 годы отмечается снижение водности реки при колебаниях расходов воды в пределах от 120 до  $275 \text{ м}^3/\text{с}$ . В целом, за весь период наблюдений в реке Жайык отмечается слабовыраженный нисходящий тренд изменения среднегодового расхода воды. Расход воды в реке имеет общую тенденцию к снижению, вероятно, в том числе за счет влияния изменения климата.

В протоке Кигач за период с 1992 по 2023 годы прослеживалась относительная небольшая межгодовая изменчивость среднегодового расхода воды, изменявшаяся в пределах от  $194 \text{ м}^3/\text{с}$  (наиболее маловодные годы) до  $338 \text{ м}^3/\text{с}$  (наиболее многоводные годы).

Исключение имело место в 1994 году, когда среднегодовой расход воды в протоке составил 418 м<sup>3</sup>/с. Однако, в целом, в колебаниях среднегодовых расходов воды в протоке Кигач за рассматриваемый период не отмечалось устойчивой восходящей или нисходящей тенденции изменения стока воды.

### 3.3 Анализ зависимости расхода воды в протоке Кигач от расхода воды в реке Волга

Для более детального анализа и продления ряда данных по протоке Кигач была рассмотрена возможность использования в качестве реки-аналога реки Волги. Для восстановления и продления ряда данных расходов воды были использованы данные реки Волга г/п с. Верхнелебяжье, где инструментальные наблюдения проводились начиная с 1938 года и продолжаются по настоящее время.

Расчеты статистической зависимости расходов воды в протоке Кигач у с.Шортанбай с расходами в реке Волге г/п с. Верхнелебяжье за период с 1992 по 2023 годы показали, что коэффициент парной линейной корреляции между их среднегодовыми расходами равен 0,81. Это свидетельствует о достаточно высокой зависимости водности в протоке Кигач от водности реки Волги и возможности использования этой связи для восстановления значений среднегодовых расходов воды в протоке Кигач на основе данных реки Волга за период с 1938 по 1991 годы. Уравнение регрессии, связывающее среднегодовые расходы воды в протоке Кигач в зависимости от среднегодовых расходов воды в реке Волге показано ниже

$$H_{ш} = 0,03H_{в} + 22,9 \quad (2)$$

где  $H_{ш}$  – уровень воды в протоке Кигач – с. Шортанбай;  $H_{в}$  – уровень воды в Волге у с. Верхнелебяжье

Восстановление среднегодовых расходов воды в протоке Кигач за 1948, 1957 и 1973 годы не проводилось, так как за эти годы отсутствуют данные наблюдений по реке-аналогу (р. Волга – с. Верхнелебяжье).

Оценка точности регрессионной модели восстановления ряда данных была выполнена на основе анализа статистической значимости коэффициента корреляции и параметров регрессии. При длине ряда  $n=83$  коэффициент корреляции составил  $r=0,92$ , что свидетельствует о тесной статистической связи между рядами (расходы воды в протоке Кигач у с. Шортанбай с расходами в реке Волге у с. Верхнелебяжье). Средняя квадратическая ошибка коэффициента корреляции равна  $\pm 0,018$ , а вероятная ошибка составляет  $\pm 0,012$ . Стандартная ошибка коэффициента регрессии составила 0,001. Это указывает на высокую устойчивость параметров модели и незначительную погрешность оценки регрессионной зависимости. Данные значения свидетельствуют о статистической надежности восстановленных данных и допустимости ее использования в дальнейших расчетах.

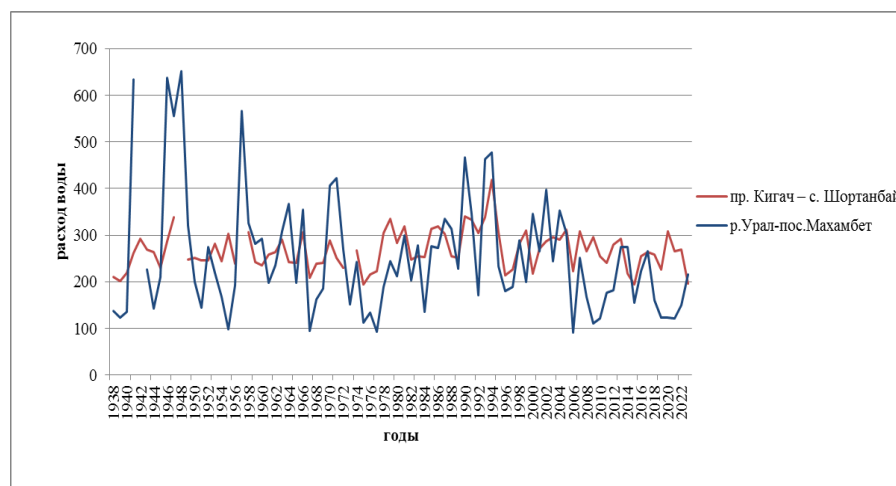
После проведенных расчетов статистические характеристики среднегодовых расходов воды в протоке Кигач г/п с. Шортанбай были пересчитаны с учетом добавления в расчётный ряд данных за период с 1938 по 1991 годы. Результаты расчетов показаны в таблице 5.

**Таблица 5.** Статистические характеристики расходов воды в пункте наблюдений протока Кигач - с. Шортанбай, рассчитанные за период с 1938 по 2023 годы

период наблюдений	n	Q <sub>ср</sub> , м <sup>3</sup> /с	σ <sub>Q<sub>ср</sub></sub> , %	C <sub>v</sub>	σ <sub>C<sub>v</sub></sub> , %	C <sub>s</sub>
1938–2023	83	267	1,67	0,15	7,85	0,61

Согласно проведенным расчетам, за многолетний период (1938–2023 годы) среднегодовой расход воды ( $Q_{ср.}$ ) в протоке Кигач составил  $267 \text{ м}^3/\text{с}$ , что немного ниже, чем значения, полученные ранее ( $272 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и показанные в таблице 4 при принятии в расчеты данных наблюдений только за 1992–2023 годы. Однако, эти различия находятся в пределах среднеквадратических ошибок расчетов, что позволяет проводить дальнейший сравнительный анализ гидрологических характеристик реки Жайык и протоки Кигач за период наблюдений с 1938 по 2023 годы.

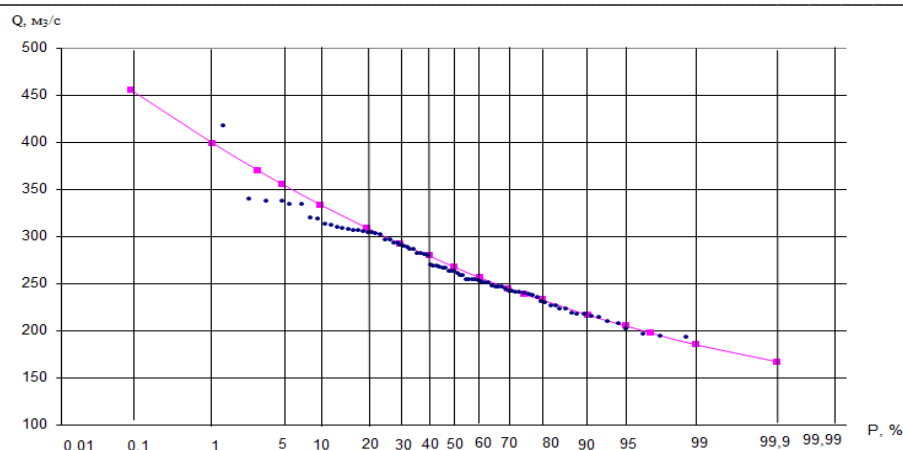
По полученным восстановленным значениям расходов воды в протоке Кигач построен совместный хронологический график изменений среднегодовых расходов воды в реке Жайык и в протоке Кигач за период с 1938 по 2023 годы, показанный на рисунке 6.



**Рисунок 6.** Совмещенный хронологический график изменений среднегодовых расходов воды в реке Жайык – пос. Махамбет и протоке Кигач – с.Шортанбай за 1938–2023 годы

Проведенный сравнительный анализ изменений среднегодовых расходов воды в протоке Кигач и реке Жайык показал, что изменчивость расхода воды в протоке Кигач меньше, чем изменчивость расхода воды в реке Жайык. Это выражается в менее значительных межгодовых колебаниях значений расходов воды. Возможно, это связано с тем, что расход воды в нижнем течении реки Волги более зарегулирован, а также в связи с различными условиями формирования стока воды в бассейнах рек Волги и Жайык. Необходимо отметить, что, хотя многолетние среднегодовые значения расходов воды в протоке Кигач ( $267 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и в реке Жайык –  $253 \text{ м}^3/\text{с}$  достаточно близки по значениям, диапазон колебаний среднегодовых расходов воды в обоих водотоках существенно отличается. Так, если принимать во внимание данные за период, когда непосредственно проводились наблюдения за расходами воды на обоих водотоках (2017–2023 годы), то видно, как значительно отличаются значения их среднегодовых максимальных и минимальных расходов воды. Так, в протоке Кигач минимальные среднегодовые расходы воды составили  $193 \text{ м}^3/\text{с}$ , в то время как в реке Жайык эта величина была равна  $90 \text{ м}^3/\text{с}$ . Также существенно отличаются значения максимальных среднегодовых расходов воды, которые составили для протоки Кигач –  $418 \text{ м}^3/\text{с}$ , а для реки Жайык –  $651 \text{ м}^3/\text{с}$ . Таким образом, при практически одинаковых значениях многолетних среднегодовых расходов воды амплитуда колебаний расходов воды существенно различается.

Для оценки стока воды в протоке Кигач в различные по водности годы были рассчитаны среднегодовые расходы воды различной обеспеченности. Для этого вначале были рассчитаны эмпирические значения обеспеченности расхода воды в протоке Кигач по известным в гидрологии формулам, а затем была построена теоретическая кривая обеспеченности среднегодовых расходов воды, показанная на рисунке 6.



**Рисунок 6.** Кривая обеспеченности среднегодовых расходов воды в протоке Кигач у с. Шортанбай

Значения характерных среднегодовых расходов воды различной обеспеченности в протоке Кигач у с. Шортанбай приведены таблице 6.

**Таблица 6.** Среднегодовые расходы воды различной обеспеченности в протоке Кигач у с. Шортанбай

Q1%	Q5%	Q10%	Q25%	Q50%	Q75%	Q95%	Q99%
418	338	319	296	263	240	202	193

Из таблицы 6 видно, что в многоводные годы (25 % обеспеченности) среднегодовой расход воды в протоке Кигач у с. Шортанбай составляет 296 м³/с, в средние по водности годы (50 % обеспеченности) – 263 м³/с и в маловодные годы (75 % обеспеченности) – 240 м³/с.

#### 4. Обсуждение

В работе впервые на основе данных наблюдений на стационарном г/п РГП «Казгидромет» за период с 2017 по 2023 годы проведены исследования водного режима протоки Кигач, расположенной в дельте реки Волги.

Несмотря на то, что длина ряда наблюдений за расходами воды в протоке Кигач составляет всего 7 лет, на основе общепринятого в гидрологии метода реки-аналога были восстановлены данные о расходах воды в протоке Кигач, начиная с 1938 года. С этой целью вначале были установлены связи между уровнями воды г/п пр. Кигач – с. Шортанбай и г/п пр. Кигач – с. Котьяевка, где наблюдения за уровнем воды проводятся с 1992 года, то есть они начаты на 25 лет раньше, чем наблюдения за уровнем воды на г/п пр. Кигач – с. Шортанбай. Связь между уровнями воды в этих пунктах наблюдений оказалась очень тесной (коэффициент парной корреляции – 0,99). Это позволили продлить ряд наблюдений за расходами воды на г/п пр. Кигач – с. Шортанбай до 1992 года. Далее была установлена связь между расходами воды в протоке Кигач и в реке Волге. С этой целью была найдена связь между расходами воды в протоке Кигач у с. Шортанбай и в реке Волге у с. Верхнелебяжье. Связь между расходами воды до восстановления данных оказалась также достаточно хорошей (коэффициент корреляции 0,81) для восстановления данных о расходах воды в протоке Кигач до 1938 года. После восстановления коэффициент корреляции составил  $r=0,92$ , что свидетельствует о тесной статистической связи между рядами (расходы воды в протоке Кигач у с. Шортанбай с расходами в реке Волге у с. Верхнелебяжье). Средняя квадратическая ошибка коэффициента корреляции равна  $\pm 0,018$ , а вероятная ошибка составляет  $\pm 0,012$ .

Восстановленные данные наблюдений позволили впервые оценить водность протоки Кигач за многолетний период с 1938 по 2023 годы.

Выполненные в ходе исследований расчеты показали, что в многоводные годы (25 % обеспеченности) среднегодовой расход воды в протоке Кигач у с. Шортанбай составляет 296 м<sup>3</sup>/с, в средние по водности годы (50 % обеспеченности) – 263 м<sup>3</sup>/с и в маловодные годы (75 % обеспеченности) – 240 м<sup>3</sup>/с.

Восстановление данных о расходах воды в протоке Кигач позволило провести также сопоставление расхода воды в протоке с расходами воды реки Жайык, являющейся самым крупным водным объектом Западного Казахстана. Сравнительный анализ, проведенный за период с 1938 по 2023 годы показал, что при близких значениях многолетних среднегодовых расходов воды в протоке Кигач – 267 м<sup>3</sup>/с и в реке Жайык – 253 м<sup>3</sup>/с, диапазон колебаний расходов в многолетнем разрезе существенно отличается. Например, в протоке Кигач минимальный среднегодовой расход воды равен 193 м<sup>3</sup>/с, а в реке Жайык – 90 м<sup>3</sup>/с, максимальный среднегодовой расход воды в протоке Кигач – 418 м<sup>3</sup>/с, а в реке Жайык – 651 м<sup>3</sup>/с. Таким образом, при практически одинаковых значениях многолетних среднегодовых расходов воды амплитуда колебаний расходов воды в обоих водотоках существенно различается в многолетнем разрезе.

В дальнейшем для более точной оценки водности протоки Кигач необходимо провести исследования по оценке не только ее среднегодовых, но и внутригодовых расходов воды. Очень важным направлением дальнейших исследований является оценка возможности улучшения системы мониторинга водных ресурсов данного водотока путем установки на нем автоматизированных средств измерений. Крайне актуальным является также вопрос изучения влияния значительного снижения фонового уровня Каспийского моря, наблюдающегося в последние 30 лет, на гидрологический режим протоки Кигач.

## 5. Заключение

В данном исследовании приведены результаты детальных исследований расхода воды в протоке Кигач. Ранее такие исследования не проводились, несмотря на их значимость для прикаспийских регионов Казахстана.

В ходе исследования были найдены достаточно тесные корреляционные связи между уровнями воды г/п с. Шортанбай и с. Котьяевка, а также между расходами воды в протоке Кигач г/п с. Шортанбай и в реке Волге г/п с. Верхнелебяжье. Это позволили восстановить значения среднегодовых расходов воды в протоке Кигач и рассчитать многолетние характеристики расхода воды в протоке за различные по обеспеченности годы за период с 1938 по 2023 годы. В частности, расчеты показали, что среднегодовые расходы воды в протоке Кигач в многоводные годы (25 % обеспеченности) равны 296 м<sup>3</sup>/с, в средние по водности годы (50 % обеспеченности) – 263 м<sup>3</sup>/с и в маловодные годы (75 % обеспеченности) – 240 м<sup>3</sup>/с.

В ходе исследования был проведен сравнительный анализ расхода воды в протоке Кигач и в самой крупной водной артерии Западного Казахстана – реке Жайык. Сравнительный анализ показал, что водность этих водных объектов является сопоставимой (многолетний среднегодовой расход протоки Кигач у с. Шортанбай составляет 267 м<sup>3</sup>/с, а реки Жайык у пос. Махамбет – 253 м<sup>3</sup>/с).

Проведенный анализ расходов воды в протоке Кигач имеет важное значение для оценки водных ресурсов не только данного водотока, но в целом для оценки и даже переоценки водных ресурсов Казахстана в целом. По объему стока воды протока Кигач, как было показано выше, сопоставима со стоком воды реки Жайык. Для Казахстана водные ресурсы данного водного объекта уже в настоящее время имеет очень важное значение. Эта значимость проявляется, в частности, в водообеспечении населения и хозяйственного комплекса прикаспийских областей страны, где проблемы дефицита водных ресурсов крайне актуальны. Однако, в перспективе в связи с обострением проблемы дефицита водных ресурсов в условиях

изменения климата, росте численности населения региона и повышения качества жизни людей, роль водных ресурсов протоки Кигач для Казахстана может значительно возрасти.

Поэтому, в условиях обострения проблемы дефицита водных ресурсов в Казахстане, в том числе в его западных регионах, вопросы организации системы мониторинга на малоизученных водных объектах для уточнения потенциала водных ресурсов страны становятся все более актуальными.

Данные наблюдений о водных ресурсах малоизученных водотоков, наряду с данными о водности водных объектов, на которых мониторинг стока воды проводится в течение многих лет, крайне важны для разработки дальнейших планов водообеспечения населения и хозяйственного комплекса страны. В этой связи при разработке планов развития прикаспийских регионов Казахстана следует особое внимание уделить протоке Кигач, водные ресурсы которой представляются достаточно значительными.

**6. Вспомогательный материал:** нет вспомогательного материала.

### 7. Вклады авторов

Концептуализация – С.А.; методология – С.А.; программное обеспечение – С.А., С.А.<sup>2</sup>; валидация – С.А.; формальный анализ – С.А.; исследование – С.А.; ресурсы – С.А.; курирование данных – С.А.; написание и подготовка оригинального черновика – С.А.; написание, рецензирование и редактирование – С.А.; визуализация – С.А.; руководство – С.А.; администрирование проекта – С.А.; получение финансирования – С.А. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

### 8. Информация об авторе

Ахметов, Серик – председатель правления НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря», Актау, Казахстан; 130000; [serik.akhmetovkz@gmail.com](mailto:serik.akhmetovkz@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0007-0867-7429>

Аманов, Сержан – заведующий лабораторией НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря», Актау, Казахстан; 130000; [s\\_amanov@mail.ru](mailto:s_amanov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0585-2125>

**9. Финансирование:** публикация статьи финансируется НАО «Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря».

**10. Благодарности:** автор выражает признательность Елбасиевой Б.Б. за техническую помощь.

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

### 12. Список литературы

1. Bazarbay, L. B., Yeltay, A. G., Zhagparova, N. N., & Shishkina, G. M. (2024). Influence of the Zhaiyk River on Caspian Sea level (Vliyanie reki Zhaiyk na uroven' Kaspiiskogo morya in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Gidrometeorologiya i ekologiya)*, 4, 7–14. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-115-4-7-14>
2. Kisebaev, D. K. (2020). Changes in the Zhaiyk River runoff under anthropogenic impacts and climate change (Izmenenie stoka reki Zhaiyk v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya i izmeneniya klimata in Russian). *Geography and Water Resources (Geografiya i vodnye resursy)*, 2.
3. Golubtsov, V., & Lineitseva, A. (2023). On inflow to the Republic of Kazakhstan via the Zhaiyk (Ural) River (O postuplenii stoka v Respubliku Kazakhstan po reke Zhaiyk (Ural) in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Gidrometeorologiya i ekologiya)*, 1, 84–88.

4. World Bank Group. Fields, D., & Akuffo-Akoto, A. (n.d.). (2020) Toward integrated water resources management (IWRM) in Central Asia (English). *Central Asia Energy-Water Development Program briefno*.
5. Tursunova, A. A., Myrzakhmetov, A. B., Baspakova, G. R., Sailaubek, A. M., & Salavatova, Zh. T. (2024). Historical review of hydrological characteristics of floods on the Zhaiyk River (Istoricheskaya spravka o gidrologicheskikh kharakteristikakh navodnenii na reke Zhaiyk in Russian). *Geography and Water Resources (Geografiya i vodnye resursy)*.
6. Tulemisova, G., Abdinov, R., Kabdrakhimova, G., & Janetov, T. (2017). Ecological state of the Ural River (Ekologicheskoe sostoyanie reki Ural in Russian). *KazNU Bulletin. Chemistry Series (Vestnik KazNU. Seriya khimicheskaya)*, 85(2), 18–24. <https://doi.org/10.15328/cb808>
7. Shinkarenko, S. S., & Bartalev, S. A. (2023). Mapping of depression areas and solonchaks in the Northern Caspian region using multiyear landsat data (Kartografirovanie sorovykh ponizhenii i solonchakov v severnom prikasp'ii na osnove mnogoletnikh dannykh landsat in Russian). *Modern Problems of Remote Sensing of Earth from Space (Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa)*, 20(5), 153–165. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165>
8. Kroonenberg, S. B., Rusakov, G. V., & Svitoch, A. A. (1997). The wandering of the Volga delta: a response to rapid Caspian Sea-level change. *Sedimentary Geology*, 107(3–4), 189–209. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(96\)00028-0](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(96)00028-0)
9. Ismailov, G. Kh., & Murashchenkova, N. V. (2015). Assessment of changes and interconnection of water balance components in the Volga River basin under climate change (Otsenka izmeneniya i vzaimosvyaz' elementov vodnogo balansa basseina reki Volgi v usloviyakh izmeneniya klimata in Russian). *Water Management of Russia (Vodnye khozyaistvo Rossii)*, 5.
10. Kazhydromet (2025). Annual data on surface water regime and resources of land (EDS). (Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi (EDS) in Russian). <https://www.kazhydromet.kz/ru/>
11. Safarov, E., Safarov, S., & Bayramov, E. (2024). Changes in the hydrological regime of the Volga River and their influence on Caspian Sea level fluctuations. *Water*, 16(12), 1744. <https://doi.org/10.3390/w16121744>
12. UNECE. (2017). Preliminary results of studies of the Kigach channel (Volga River delta) (Predvaritel'nye rezul'taty issledovaniy protoki Kigach (delta r. Volgi) in Russian).
13. Zagidullina, A. R., Smagulov, Zh. Zh., Birimbaeva, L. M., & Sailaubek, A. M. (2024). Trends of long-term changes in runoff of Major Rivers in the Zhaiyk-Caspian water basin (Tendentsii mnogoletnikh izmenenii stoka osnovnykh rek, formiruyushchikhsya v Zhaiyk-Kaspiiskom vodokhozyaystvennom basseine in Russian). *Geography and Water Resources (Geografiya i vodnye resursy)*.
14. Musakulkyzy, A., Babkin, A., Babkin, V., Madibekov, A., & Cherednichenko, A. (2024). Forecasts of annual runoff of the Zhaiyk (Ural) River considering autoregressive models of its long-term monthly fluctuations (Prognozy godovogo stoka r. Zhaiyk (Ural) s uchedom avtokorrelyatsionnykh modelei ego mnogoletnikh kolebanii za otdel'nye mesyatsy in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Gidrometeorologiya i ekologiya)*, 1, 16–25. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-16-25>
15. Ivkina, N. I. (2016). Changes in water inflow to the Caspian Sea due to anthropogenic impacts and climate change: the case of the Zhaiyk (Ural) River (Izmenenie pritoka vody v Kaspiiskoe more v rezul'tate antropogennogo vozdeistviya i izmeneniya klimata na primere r. Zhaiyk (Ural) in Russian). *Hydrometeorology and Ecology (Gidrometeorologiya i ekologiya)*.
16. Gorelits, O. V., & Zemlyanov, I. V. (2005). Studying seasonal processes in the Volga mouth area with the use of remote sensing data. *Water Science and Technology*, 51(11), 87–94. <https://doi.org/10.1007/s11268-005-0032-1>

17. Agafonnikova, E. O., Klikunova, A. Yu., & Khoperskov, A. V. (2017). A computer simulation of the Volga River hydrological regime: a problem of water-retaining dam optimal location. *Journal of Hydroinformatics*, 19(3), 368–380. <https://doi.org/10.14529/mmp170313>
18. Kalugin, A. S., Chukanov, V. V., Motovilov, Y. G., Mastryukova, A. V., Popova N. O., & Chernobrovkin N. N., (2024). Regulation of the Ural River flow under current and projected climate conditions. *Water Resources*, 51, 630–642. <https://doi.org/10.1134/S0097807824700982>
19. Yumina, N. M., & Magritsky, D. (2024). Assessment of the climatic and anthropogenic contribution to long-term fluctuations in seasonal river runoff in the Ural River basin. *Hydrometeorological Research and Forecasting*. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-135-151>
20. Liu, X., Xue, J., Chang, J., Sun, H., Zhao, Y., Li, F., Wang, S., & Lei, Q. (2025). Hydrological connectivity-mediated spatial vegetation patterns and regime shifts in drylands. *Ecological Indicators*, 171, 113194. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113194>
21. Shiklomanov, A., Lammers, R., Lettenmaier, D., Polischuk, Y., Savichev, O., Smith, L., & Chernokulsky, A. (2013). Hydrological changes: historical analysis, contemporary status, and future projections. *Springer Environmental Science and Engineering* [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_4)
22. White, C., Tanton, T., & Rycroft, D. (2014). The Impact of climate change on the water resources of the Amu Darya Basin in Central Asia. *Water Resources Management*, 28, 5267–5281. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0716-x>
23. Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
24. Sidorchuk, A. Yu., Panin, A. V., & Borisova, O. K. (2009). Morphology of river channels and surface runoff in the Volga River basin (East European Plain) during the Late Glacial period. *Geomorphology*, 113(3–4), 137–157. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.007>
25. Helms, M., Evdakov, O., Ihringer, J., & Nestmann, F. (2005). A hydrologic contribution to risk assessment for the Caspian Sea. *Limnologica*, 35(3), 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2005.06.001>
26. UNEP. (2021). Caspian Sea: state of the environment. United Nations Environment Program.
27. Zanganeh, M., & Chaji, A. (2024). A new aspect of the ApEn application to improve the PSO-ANFIS model to forecast Caspian Sea levels. *Regional Studies in Marine Science*. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103347>
27. Lahijani, H., Leroy, S. A. G., Arpe, K., & Crétaux, J.-F. (2023). Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review. *Earth-Science Reviews*, 241, 104428. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104428>
28. Fallah, F., & Mansoury, D. (2023). Temperature structure and wind-induced water level anomalies in the Caspian Sea: A study on coastal upwelling. *Regional Studies in Marine Science*, 62, 102975. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102975>
29. Toorani, M., Kakroodi, A. A., Yamani, M., & Naderi Beni, A. (2021). Monitoring shoreline shift under rapid sea-level change on the Caspian Sea observed over 60 years of satellite and aerial photo records. *Journal of Great Lakes Research*, 47(3), 812–828. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2021.02.006>
30. Kaftan, V., Komitov, B., & Lebedev, S. (2018). Analysis of sea level changes in the Caspian Sea related to cosmo-geophysical processes based on satellite and terrestrial data. *Geodesy and Geodynamics*, 9(6), 449–455. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.09.010>

**Еділ дельтасындағы Кигач арнасының су ағынын Жайық өзенінің су ағынымен салыстырмалы талдауы**

## Серик Ахметов, Сержан Аманов

**Аңдатпа.** Батыс Қазақстанның шектеулі су ресурстары жағдайында аз зерттелген су ағындарының су ресурстарын егжей-тегжейлі зерттеу ерекше маңызға ие.

Бұл зерттеу су режимін терең талдауға арналған Кигач арналары – Еділ өзендеріндегі Дельтадағы үлкен қолдардың бірі. Кигач сағасы Қазақстан мен Ресей шекарасы арқылы өтетін және осы шекараны ішінара белгілейтін трансшекаралық су нысаны болып табылады.

Ұзақ уақыт бойы Кигач сағасының су ресурстарын зерттеуге тиісті көңіл бөлінбеді. Тек 2017 жылы бұл сағадағы су өтімін өлшеу үшін алғаш рет сағада стационарлық гидрологиялық бекет ашылды. Осы уақытқа дейін сағада тек су деңгейіне бақылау жүргізілді.

Алғаш рет стационарлық гидрологиялық бақылаулар мен қалпына келтірілген қатарлар негізінде 1938 – 2023 жылдар кезеңінде Кигач сағасы ағынының көпжылдық сипаттамаларын бағалау жүргізілді. Деректерді қалпына келтіру «ағын-су деңгейі» байланыс қисықтарын және өзендерден регрессияға тәуелділікті қолдану арқылы жүзеге асырылды. Қиғаш сағасындағы судың жылдық орташа өтімі 267 м<sup>3</sup>/с құрайды, оны Жайық өзенінің сулылығымен (253 м<sup>3</sup>/с) салыстыруға болады. Алайда, Кигач сағасындағы ағынның жылдық тербелістерінің амплитудасы айтарлықтай төмен екенін атап өткен жөн.

Зерттеу нәтижелері су режимінің тұрақтылығын көрсетеді. Қазақстанның Каспий маңы өңірлерін сумен қамтамасыз ету жөніндегі іс-шараларды жоспарлау кезінде Кигач сағасының су ресурстарын есепке алудың орындылығы туралы қорытынды жасалды.

**Түйін сөздер:** Қазақстанның су ресурстары; кіші өзендер; гидрологиялық талдау; су тапшылығы; трансшекаралық өзендер.

## Comparative analysis of the water flow of the Kigach channel in the Volga delta with the water flow of the Zhaiyk River

Serik Akhmetov, Serzhan Amanov

**Abstract:** In the context of limited water resources in Western Kazakhstan, a detailed study of the water resources of understudied watercourses is of particular importance.

This study focuses on an in-depth analysis of the water regime of the Kigach River, one of the major branches of the Volga River delta. The Kigach River is a transboundary water body that flows along the border between Kazakhstan and Russia and partially defines this border.

For a long time, the study of the water resources of the Kigach River has received limited attention. It was not until 2017 that a stationary hydrological post was established on the Kigach River to monitor water flow. Prior to this, only water level observations were conducted on the river.

For the first time, based on stationary hydrological observations and reconstructed series, the long-term characteristics of the Kigach River flow were estimated for the period 1938-2023. The data was reconstructed using flow-level relationship curves and regression equations. It has been established that the long-term average annual water flow in the Kigach channel is 267 m<sup>3</sup>/s, which is comparable to the water flow in the Zhaiyk River (253 m<sup>3</sup>/s). However, it should be noted that the amplitude of interannual fluctuations in the Kigach channel is significantly lower.

The results of the study indicate the stability of the water regime in the Kigach channel, which suggests a significant water management potential. The article concludes that it is advisable to take into account the water resources of the Kigach channel when planning measures for water supply in the Caspian regions of Kazakhstan.

**Keywords:** water resources of Kazakhstan; small rivers; hydrological analysis; water deficit; transboundary rivers.

## Астана қаласының азық-түлік белдеуін қалыптастырудағы агроөнеркәсіптік кешеннің экономикалық-географиялық ерекшеліктері

Гульнара Оспанова<sup>1</sup>, Алим Мылқайдаров<sup>2</sup>, Айгерим Сансызбаева<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; [ospanova\\_14@mail.ru](mailto:ospanova_14@mail.ru), [sansyzbayeva.ab@mail.ru](mailto:sansyzbayeva.ab@mail.ru)

<sup>2</sup>әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; [mylkaydarov@mail.ru](mailto:mylkaydarov@mail.ru)

\*Корреспонденция: [sansyzbayeva.ab@mail.ru](mailto:sansyzbayeva.ab@mail.ru)

**Андатпа.** Қазақстан Республикасының астанасы - Астана қаласы соңғы жылдары Еуразия кеңістігіндегі қарқынды дамып келе жатқан ірі қалалардың бірі ретінде сипатталады. Урбандалу үдерісінің күшеюі, халық санының өсуі және тұтыну нарығының кеңеюі елорда мен оған іргелес аумақтарда азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету мәселесінің өзектілігін арттыра түсуде. Ірі қалалар мен агломерациялар халқын азық-түлік өнімдерімен қамтамасыз ету жүйесін жетілдіру қаланың айналасында мамандандырылған ауыл шаруашылығы аймақтарын қалыптастыруды, өндіріс көлемін ұлғайту мен ауыл шаруашылығын интенсификациялау бағыттарын іздестіруді талап етеді. Осыған байланысты елорданы отандық азық-түлік тауарларымен үздіксіз қамтамасыз ету мақсатында қаланың өзінде және одан 300 км радиуста орналасқан Ақмола мен Қарағанды облыстарындағы кәсіпорындар мен шаруашылықтардың өндірістік әлеуетін, әсіресе шикізат базасын дамытуға бағытталған кешенді шаралар жүзеге асырылуда. Сонымен қатар ауылдық жерлерде ауыл шаруашылығы өнімдерін өңдейтін кәсіпорындар салу, сақтау және логистика инфрақұрылымын күшейту, сондай-ақ астана маңында жоғары сапалы өнім өндіруге бағдарланған азық-түлік белдеуін қалыптастыру стратегиялық тұрғыдан маңызды.

Мақалада Астана қаласы маңы аумағын дамытудың әлеуметтік-экономикалық алғышарттары қарастырылып, азық-түлік белдеуінің қалыптасуы мен дамуына әсер ететін негізгі факторлар жүйеленеді. Зерттеудің мақсаты – Астана маңы жағдайымен, табиғи, ауыл шаруашылық және әлеуметтік-экономикалық ресурстардың оңтайлы үйлесімімен ерекшеленетін Астана қаласының азық-түлік белдеуі аймағын дамытудың әлеуметтік-экономикалық алғышарттарын анықтау және оның әлеуетіне баға беру. Зерттеу барысында салыстырмалы-географиялық талдау, статистикалық деректерді жүйелеу және картографиялық тәсілдер қолданылып, кәсіпорындардың аумақтық орналасу ерекшеліктері бағаланды. Облыста республика бойынша темір жол бағыттарының ең жоғары тығыздығы тіркелген. Сонымен бірге даму шарттарының күшті және әлсіз жақтары, мүмкіндіктері мен кедергілері сараланып, аумақтың әлеуметтік-экономикалық SWOT-талдауы жүргізілді.

Зерттеу нәтижесінде Ақмола облысының Бурабай, Қорғалжын,

**Цитирование:** Ospanova, G. Mylkaydarov, A., Sansyzbayeva, A. (2026). Economic and geographical features of the agro-industrial complex in the formation of the food belt of Astana city. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 154(1), 135-153. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-135-153>

Академический редактор:  
Н.Е. Рамазанова

Поступила: 17.02.2026  
Исправлена: 11.03.2026  
Принята: 17.03.2026  
Опубликована: 31.03.2026



**Copyright:** © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Аршалы және Ақкөл аудандары одан әрі дамыту үшін абсолютті басымдықтарға ие аумақтар ретінде айқындалды. Алынған қорытындылар елорданың азық-түлікпен қамтылуын арттыруға, агроөндіріс пен өңдеу саласын дамытуға және өңірлік агрологистика жүйесін жетілдіруге бағытталған ұсыныстар әзірлеуге негіз болады.

**Түйін сөздер:** азық-түлік белдеуі; азық-түлік қауіпсіздігі; ауыл шаруашылығы өнімдері; агрофермалар.

## 1. Кіріспе

Еліміздің аймақтарын азық-түлікпен қамтамасыз ету мәселесі бірнеше онжылдықтар бойы өзектілігін сақтап келеді. Бұл тұрғыда ауыл шаруашылығы ұлттық экономиканың стратегиялық маңызды салаларының бірі саналады. Ұлттық экономиканың маңызды құрамдас бөлігі ретінде агроөнеркәсіптік кешен (АӨК) азық-түлік пен ауыл шаруашылығы шикізатын өндірумен ғана шектелмей, өңірлердегі жұмыспен қамтуды кеңейтуге, ауылдық аумақтардың әлеуметтік-экономикалық тұрақтылығын нығайтуға ықпал етеді.

Тәуелсіздік жылдарында АӨК-ті дамытуға бағытталған бірқатар мемлекеттік бағдарламалар мен стратегиялық құжаттар қабылданды. Атап айтқанда, Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешенін дамытудың 2017–2021 жылдарға арналған мемлекеттік бағдарламасы қабылданып, саладағы құрылымдық өзгерістер мен мемлекеттік қолдау шараларын жүйелеуге негіз болды. Сонымен қатар АӨК-тің орта және ұзақ мерзімді басымдықтарын айқындаған 2021–2030 жылдарға арналған тұжырымдама және оны іске асыру жөніндегі іс-қимыл жоспары бекітілді.

АӨК-тің экспорттық әлеуетін күшейту және қосылған құны жоғары өнім үлесін арттыру мақсатында ауыл шаруашылығы өнімдерін өңдеу бағытына да ерекше мән берілуде. Осы орайда Үкіметтің 2024 жылғы 28 маусымдағы № 512 қаулысымен ауыл шаруашылығы өнімдерін өңдеуді дамытудың 2024–2028 жылдарға арналған кешенді жоспары бекітілді. Мемлекет басшысы Қасым-Жомарт Тоқаевтың Қазақстан халқына Жолдауларында да агроөнеркәсіптік кешенді дамытуға айрықша назар аударылып, озық агроэкономикаға көшу үшін Үкіметтің нақты әрі өлшенетін жоспары болуы қажеттігі атап өтіледі. Бұл бағыттар еліміздің азық-түлік қауіпсіздігін нығайтудың және экономиканы әртараптандырудың маңызды құрамдас бөлігі болып табылады.

Зерттеудің теориялық және әдіснамалық негізі ауыл шаруашылығы географиясы мен агроөнеркәсіптік кешенді (АӨК) зерттеудің классикалық еңбектеріне сүйенеді (Baransky, 1980; Kolosovsky, 1958; Saushkin, 1970; Rakitnikov, 1970; Kryuchkov, 1987; Nosonov, 2001; Mints, 1970; Pulyakin et al., 1992; Michurina, 1984; Kovalev, 1965; сондай-ақ Nefedova, 2001). Агроөнеркәсіптік кешендердің қалыптасуының экономикалық-географиялық аспектілері бірқатар зерттеулерде арнайы қарастырылған (Kryuchkov, 1987; Palamarchuk, 1980).

Отандық және шетелдік ғалымдардың еңбектерінде азық-түлік нарығының теориялық, әдістемелік және практикалық қырлары талданған (Suleimenov et al., 2011; Alshanov, 2006). Азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету мәселесі көптеген жылдар бойы кешенді ғылыми-әдістемелік әрі қолданбалы зерттеулердің нысаны болып келеді. Атап айтқанда, ауыл шаруашылығы өндірісін орнықты дамыту негізінде азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету проблемалары шетелдік және қазақстандық ғалымдардың еңбектерінде кеңінен қарастырылған (Abalkin, 1987; Belgibayev et al., 1992).

**Ғылыми жаңалығы:** Осы зерттеудің ғылыми жаңалығы төмендегі бағыттарда көрініс табады:

*Алғаш рет анықталған тұжырымдар:* Астана қаласының азық-түлік белдеуіне кіретін аудандар азық-түлікпен қамтамасыз ету әлеуеті бойынша 4 типке жіктеліп, авторлық типология ұсынылды; 2018–2024 жж. негізгі азық-түлік өнімдерінің (ет, сүт, көкөніс,

жұмыртқа және т.б.) жеткізілім динамикасы талданып, өзгерістің кезеңдік ерекшеліктері айқындалды.

*Жетілдірілген әдістемелік шешімдер:* кәсіпорындардың аумақтық орналасуы ArcGIS 10.8 негізінде картографиялық түрде бейнеленіп, кеңістіктік шоғырлану заңдылықтары көрсетілді және әлеуметтік-экономикалық факторлар бойынша SWOT-талдау жүргізіліп, аумақтың күшті және әлсіз жақтары, мүмкіндіктері мен қатерлері жүйеленді.

*Теориялық үлес:* азық-түлік белдеуі қала маңы АӨК-тің аумақтық-өндірістік жүйесі ретінде (өндіру, өңдеу, сақтау, логистика, өткізу) қарастырылып, оның экономикалық-географиялық түсіндірмесі нақтылады.

*Қолданбалы маңызы:* типология және кеңістіктік нәтижелер агрологистика, өңдеу және сақтау инфрақұрылымын жоспарлауда басымдықтарды таңдауға, сондай-ақ өңірлік басқарушылық шешімдерді негіздеуге пайдаланылуы мүмкін.

## 2. Материалдар мен әдістер

Зерттеудің теориялық және әдіснамалық негізі азық-түлік қауіпсіздігі, қала маңы агроөнеркәсіптік жүйелері және агроөнеркәсіптік кешен (АӨК) географиясы бойынша отандық және шетелдік ғылыми әдебиеттерге жасалған шолу арқылы айқындалды. Әдеби шолу нәтижесінде "азық-түлік белдеуі", "аумақтық мамандану", "өндіру-өңдеу-сақтау-логистика-өткізу" тізбегі сияқты ұғымдар нақтыланып, зерттеудің талдамалық құрылымы қалыптастырылды.

Эмпирикалық база ретінде 2018–2024 жылдар аралығындағы ресми және ведомстволық материалдар қолданылды. Атап айтқанда, аудандық деңгейдегі ауыл шаруашылығы өндірісі, жеткізілім құрылымы, сондай-ақ салалық ұйымдастыруға қатысты деректер Ақмола облысының ауыл шаруашылығы және жер қатынастары басқармасының материалдары негізінде жинақталды (Ақмола облысының ауыл шаруашылығы және жер қатынастары басқармасы, 2024). Сонымен қатар елорданың азық-түлікпен қамтамасыз етілуі, азық-түлік белдеуі шеңберіндегі ұйымдастырушылық бағыттар мен ағымдағы көрсеткіштер бойынша мәліметтер Астана қаласы әкімдігінің материалдары арқылы нақтыланды (Akimat of Astana, 2024). Қосымша түрде азық-түлік белдеуіне кіретін аумақтар бойынша өңірлік деңгейдегі көрсеткіштер мен салалық ақпараттар Қарағанды облысының ауыл шаруашылығы басқармасының деректерімен толықтырылды (Қарағанды облысының ауыл шаруашылығы басқармасы, 2024).

Зерттеу барысында әлеуметтік-экономикалық көрсеткіштер (халық санының өзгерісі, жұмыспен қамту құрылымы), ауыл шаруашылығы көрсеткіштері (өнім түрлері бойынша өндіріс көлемі, шаруашылық субъектілерінің құрылымы), сондай-ақ Астана қаласына жеткізілетін негізгі өнімдер бойынша мәліметтер (ет, сүт, көкөніс, жұмыртқа және т.б.) пайдаланылды.

Зерттеу әдістемесі экономикалық-географиялық талдаудың дәстүрлі тәсілдерімен қатар аумақтық айырмашылықтарды анықтауға мүмкіндік беретін салыстырмалы-географиялық талдау, картографиялық әдіс, статистикалық деректерді жүйелеу, ресми құжаттар мен әдеби дереккөздерді талдауды қамтыды. Біріншіден, салыстырмалы-географиялық талдау арқылы аудан деңгейіндегі әлеуметтік-экономикалық және ауыл шаруашылығы көрсеткіштері салыстырылып, өндірістік әлеует пен қамтамасыз ету деңгейінің кеңістіктік айырмашылықтары бағаланды. Екіншіден, өткенді шолу арқылы талдау 2018–2024 жылдар аралығында негізгі өнім топтары бойынша өзгерістер динамикасын сипаттауға және үрдістерді кезеңдеу арқылы түсіндіруге мүмкіндік берді. Үшіншіден, жүйелік-құрылымдық тәсіл азық-түлік белдеуін өзара байланысқан элементтерден тұратын аумақтық-өндірістік жүйе ретінде (өндіру-өңдеу-сақтау-тасымалдау-өткізу) қарастыруға негіз болды.

АӨК-тің ауыл шаруашылығы өнімдерін өндіретін кәсіпорындарының аумақтық орналасуын және шоғырлану ерекшеліктерін көрсету мақсатында ГАЗ негізіндегі картографиялық талдау жүргізілді. Кәсіпорындардың орналасу картасы ArcGIS 10.8

бағдарламалық құралында әзірленіп, деректерді кеңістіктік сәйкестендіру (геокодтау) және қабаттарды біріктіру арқылы тақырыптық карталар жасалды. Кеңістіктік талдау барысында кәсіпорындардың аудан бойынша таралуы, елордаға жақындық факторы және инфрақұрылымдық қолжетімділік тұрғысынан жалпы заңдылықтар айқындалды.

Аудандарды азық-түлікпен қамтамасыз ету әлеуетіне қарай топтастыру үшін географиялық жүйелеу әдістері қолданылды. Жүйелеуді қалыптастыруда өндірістік әлеует көрсеткіштері мен аумақтың әлеуметтік-экономикалық сипаттамалары өзара салыстырылып, айырмашылықтардың кеңістіктік сипаты бағаланды. Нәтижелерді қолданбалы тұрғыда жинақтау үшін аумақтың күшті және әлсіз жақтары, мүмкіндіктері мен қатерлерін айқындайтын SWOT-матрица статистикалық және ведомстволық деректерге, сондай-ақ ресми материалдарға сүйене отырып құрастырылды (Ақмола облысының ауыл шаруашылығы және жер қатынастары басқармасы, 2024; Akimat of Astana, 2024; Қарағанды облысының ауыл шаруашылығы басқармасы, 2024).

Нәтижелерді қолданбалы тұрғыда жинақтау үшін SWOT-матрица статистикалық және салалық деректерге, сондай-ақ ресми материалдарға сүйене отырып құрастырылды (Ақмола облысының ауыл шаруашылығы және жер қатынастары басқармасы, 2024; Akimat of Astana, 2024; Қарағанды облысының ауыл шаруашылығы басқармасы, 2024).

*Әдістемелік нақтылау (типологиялау, статистикалық өңдеу және ГАЖ көрсеткіштері):*

Аудандарды 4 түрге жіктеу сандық индекс есептеуге емес, эксперттік және сапалық бағалауға негізделді. Жіктеу критерийлері ретінде: 1) негізгі өнім топтары бойынша өндіріс пен жеткізілім көлемі (ет, сүт, көкөніс, жұмыртқа және т.б.) және оның тұрақтылығы; 2) Астана нарығына жақындық және көлік-логистикалық қолжетімділік; 3) өңдеу мен сақтау инфрақұрылымының болуы; 4) шаруашылық құрылымы мен мамандану деңгейі (ШҚ/ЖҚШ, ірі кәсіпорындар үлесі) алынды. Түрлерді ажырату логикасы: I түр - жоғары әлеует (жақын, тұрақты жеткізілім, инфрақұрылымы дамыған); II түр - орташа (өндіріс жеткілікті, бірақ құрылым мен инфрақұрылым біркелкі емес); III түр - әлеуеті бар, нарыққа бағдарлануы әрқелкі; IV түр - әлеуеті төмен немесе табиғи-климаттық, экологиялық және қашықтық шектеулері басым.

Қамтамасыз ету деңгейін бағалауда салыстырмалы қатынас-логика (әдістемелік бағдар) ретінде  $K = P / (N \times N)$  формасы ескерілді: P - өндіріс (немесе жеткізілім) көлемі, N - жан басына шаққандағы тұтыну нормасы, N - халық саны. Бұл жұмыста көрсеткіш есептелмей, аудандарды салыстырудағы түсіндірмелік негіз ретінде қолданылды.

2018-2024 жылдар бойынша өнімдер кесіндісінде динамикалық қатарлар құрастырылып, абсолют және салыстырмалы өсім көрсеткіштері (өсім қарқыны, өзгеріс үлесі) есептелді сонымен қатар көрсеткіштер өлшем бірліктері бойынша (мың т; млн дана) біріздендіріліп, графиктік және кестелік түрде интерпретацияланды.

ГАЖ талдауы ArcGIS 10.8 бағдарламасында орындалды. Зерттеу шекарасы ретінде Астана қаласының айналасындағы 300 км ықпал ету аймағы және әкімшілік аудандар шекаралары қолданылды және кәсіпорындар нүктелік қабат ретінде енгізіліп, аудан полигондарымен сәйкестендірілді. Кеңістіктік талдауда кәсіпорындардың аудан бойынша таралуы мен шоғырлануы, сондай-ақ негізгі көлік дәліздеріне қатысты орналасуы сапалық түрде бағаланды және тақырыптық карталар арқылы көрсетілді.

### 3. Нәтижелер

Астана қаласының азық-түлік белдеуімен байланысты зерттеу аумағы Қазақстанның орталық бөлігінің солтүстігінде, 53°41'–48°37' с.е. және 65°21'–75°07' ш.б. аралығында орналасқан. Аумақ солтүстігінде Солтүстік Қазақстан облысымен, батысында Қостанай облысымен, шығысында Павлодар облысымен, оңтүстігінде Ұлытау облысының Ұлытау және Жаңаарқа аудандарымен, сондай-ақ Қарағанды облысының Шет және Қарқаралы аудандарымен шектеседі. Зерттеу аумағының ауданы 226 315 км<sup>2</sup>, солтүстіктен оңтүстікке

қарай 482 км, батыстан шығысқа қарай 570 км созылады; шекара сызығының жалпы ұзындығы 3017 км (1-сурет).

Азық-түлікпен қамтамасыз ету әлеуеті бойынша өңірлерді 4 түрге бөлуге болады. Типологияны құрастыруда негізгі азық-түлік топтары (ет, сүт, көкөніс және т.б.) бойынша өндіріс көлемін халық санына шақтап салыстыру қағидасы қолданылды.

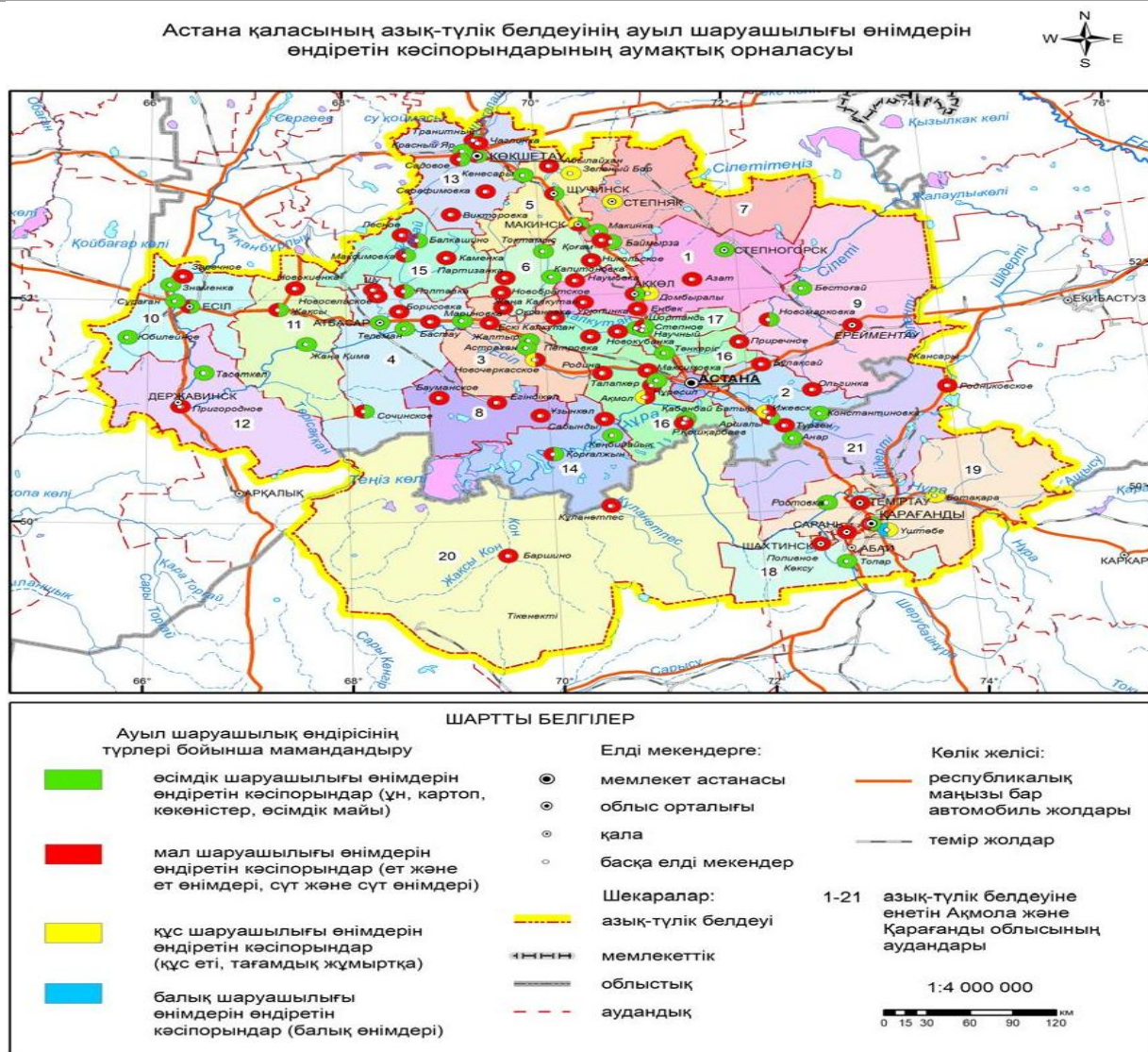
I түр – әлеуеті жоғары аудандар. Бұл топқа Астанаға жақын орналасқан, өндіріс-өткізу байланысы қысқа, көлік инфрақұрылымы дамыған және тез бұзылатын өнімдерді (ет, сүт, көкөніс) тұрақты жеткізуге қабілетті аудандар жатады: Целиноград, Аршалы, Шортанды.

II түр – әлеуеті орташа аудандар. Бұл аудандар негізгі азық-түлік өнімдерін жеткілікті көлемде өндіреді, бірақ өнім құрылымы мен өңдеу, сақтау инфрақұрылымы біркелкі дамымаған. Сондықтан кейбір өнім түрлері бойынша қамтамасыз ету деңгейі орташа аудандар жатады: Ақкөл, Біржан сал, Бұланды, Жақсы, Сандықтау, Астрахан.

III түр – әлеуеті бар, нарыққа бағытталуы әрқелкі аудандар. Бұл типке өндіріс көлемі кей өнімдер бойынша орташа немесе төмен болғанымен, Астана нарығына жұмыс істеуге мүмкіндік беретін ресурстық әлеуеті бар аудандар жатады: Есіл, Атбасар, Бурабай, Зеренді, Ерейментау, Бұқар жырау, Осакаров. Мұнда ауыл шаруашылығы алқаптары мен шаруашылықтардың ресурстық базасы бар, бірақ логистика, мамандану, өңдеу қуаты және нарыққа бағдарлану деңгейі әртүрлі.

IV түр – әлеуеті төмен немесе шектеулері бар аудандар. Бұл топқа өндіріс көлемі Астана нарығының сұранысына толық сәйкес келмейтін, табиғи-климаттық және экологиялық шектеулер әсер еткен аудандар кіреді: Жарқайың, Егіндікөл, Қорғалжын, Абай, Нұра. Халық тығыздығы төмен, шаруашылық мамандануы әрқелкі, қашықтық факторы едәуір, кей жағдайда табиғи аумақтарды қорғау режимі (мысалы, Қорғалжын өңірінің ерекшелігі) азық-түлік өндірісін кеңейтуді тежейтін фактор ретінде көрінуі мүмкін.

Ауыл шаруашылығы өнімдерін өндіретін және өңдейтін кәсіпорындардың аумақтық орналасуын көрсететін тақырыптық картада (1-сурет) кәсіпорындардың ең жоғары шоғырлануы елордаға жақын аудандарда байқалатыны көрінеді. Бұл құбылыс азық-түлік белдеуінің тиімділігі көбіне нарыққа жақындық, көлік-логистика және өңдеу мен сақтау инфрақұрылымы сияқты факторларға тәуелді екенін дәлелдейді.



**Сурет 1.** Астана қаласының азық-түлік белдеуіндегі ауыл шаруашылығы өнімдерін өндіретін кәсіпорындардың кеңістікте орналасуы (автор құрастырған)

Астана қаласының азық-түлік белдеуі аймағына Ақмола облысының 17 әкімшілік ауданы (1. Ақкөл, 2. Аршалы, 3. Атбасар, 4. Астрахан, 5. Бурабай, 6. Бұланды, 7. Біржан сал, 8. Егіндікөл, 9. Ерейментау, 10. Есіл, 11. Жақсы, 12. Жарқайың, 13. Зеренді, 14. Қорғалжын, 15. Целиноград, 16. Сандықтау, 17. Шортанды) және Қарағанды облысының 4 әкімшілік ауданы (18. Абай, 19. Бұқар жырау, 20. Нұра, 21. Осакаров) енгізілген (Roadmap for the formation of the food belt of Astana, 2018).

Ірі қаланың ықпал ету аймағында АӨК салаларын таңдауға әсер ететін негізгі факторлар:

*Нарықтық-сұраныс факторлар:*

- Қаланың халық саны және төлем қабілеті (нарық сыйымдылығы);
- Қаланың тұтыну құрылымы: күнделікті сұраныстағы өнімдерге басымдық (нан-тоқаш, сүт, көкөніс, жұмыртқа т.б.);
- Сауда желілерінің талаптары: стандарт, көлем, тұрақты жеткізілім, сертификаттау.

*Өнімнің технологиялық және логистикалық ерекшелігі:*

- Тез бұзылатын және салқын тізбек қажет ететін өнімдер (ет, сүт, көкөніс, жеміс-жидек) өндірісін қала маңына жақын орналастыру тиімді;

- Тасымалдауға қолайсыз немесе көлемді өнімдер (картоп, көкөніс, жем-шөп) үшін қашықтықтың маңызы жоғары;

- Жеткізу мерзімі мен жиілігі (күнделікті немесе апталық жеткізілім).

*Мамандану және өндірісті шоғырландыру:*

- Экономикалық тұрғыдан тиімді және техникалық мүмкін интенсивті өндірісті дамыту (көкөніс шаруашылығы, құс шаруашылығы, сүт бағытындағы ферма, картоп, жеміс-жидек);

- Шаруашылық және шаруашылықаралық мамандануды тереңдету, кооперация (ұсақ өндірушілерді біріктіру).

*Өңдеу өнеркәсібі мен “шикізат базасы – өңдеуші” байланысы:*

- Ауыл шаруашылығы шикізатын қайта өңдейтін кәсіпорындардың жақындығы (шикізатты уақтылы қабылдау);

- Өңдеуші кәсіпорындар мен олардың шикізат аймағының аумақтық бірлігі қағидатын сақтау (экономикалық орындылық шеңберінде);

- Қосылған құны жоғары өнім өндірісі үшін өңдеудің тереңдігі (сүт өнімдері, ет өнімдері, көкөніс консервілеу т.б.).

*Көлік-логистика және инфрақұрылым:*

- Көлік жолдарының болуы және олардың техникалық-пайдалану жағдайы (жыл он екі ай жүретін маршрут);

- Логистикалық тораптар: көтерме тарату орталығы, қойма, көлік паркі;

- Сақтау инфрақұрылымы: заманауи қоймалар, тоңазытқыш, көкөніс қоймасы, сұрыптау-қаптау желілері.

*Ресурстық-географиялық факторлар (қосымша, бірақ өте маңызды):*

- Жер қоры, топырақ құнарлылығы, жайылым/шабындық, су ресурстары, суармалау мүмкіндігі;

- Климаттық тәуекелдер (қуаңшылық, үсік, қыс ұзақтығы) және тәуекелді басқару (сақтандыру, әртарапандыру).

*Әлеуметтік-экономикалық және институционалдық факторлар (қосымша):*

- Еңбек ресурстары, кадрлар, ауылдық елді мекендердің демографиясы;

- Мемлекеттік қолдау: субсидия, инфрақұрылымдық жобалар, ветеринариялық және фитосанитариялық бақылау;

- Жер қатынастары, инвестиция қолжетімділігі, несие немесе лизинг.

Қазіргі уақытта елорданың азық-түлік белдеуі аясында Астана қаласына Ақмола және Қарағанды облыстарынан 150-ден астам кәсіпорын мен шаруа қожалығы ауыл шаруашылығы өнімдерін жеткізеді. Оның ішінде 81-і мал шаруашылығы өнімдерімен (ет және ет өнімдері, сүт және сүт өнімдері), 60-ы өсімдік өнімдерімен (ұн, картоп, көкөніс, өсімдік майы), 8-і құс өнімдерімен (құс еті, тағамдық жұмыртқа), 1-і балық өнімдерімен қамтамасыз етеді (Osrapova et al., 2022).

Ақмола облысында өндірістік қуаттылығы жылына 62,5 мың тонна ет өңдейтін 15 кәсіпорын, өндірістік қуаттылығы жылына 146,8 мың тонна сүт өнімдерін өндіретін 15 кәсіпорын, өндірістік қуаттылығы жылына 960,0 мың тоннаны құрайтын 47 ұн тарту кәсіпорны, өндірістік қуаттылығы жылына 49,3 мың тонна майлы дақылдарды өңдейтін 8 кәсіпорын бар.

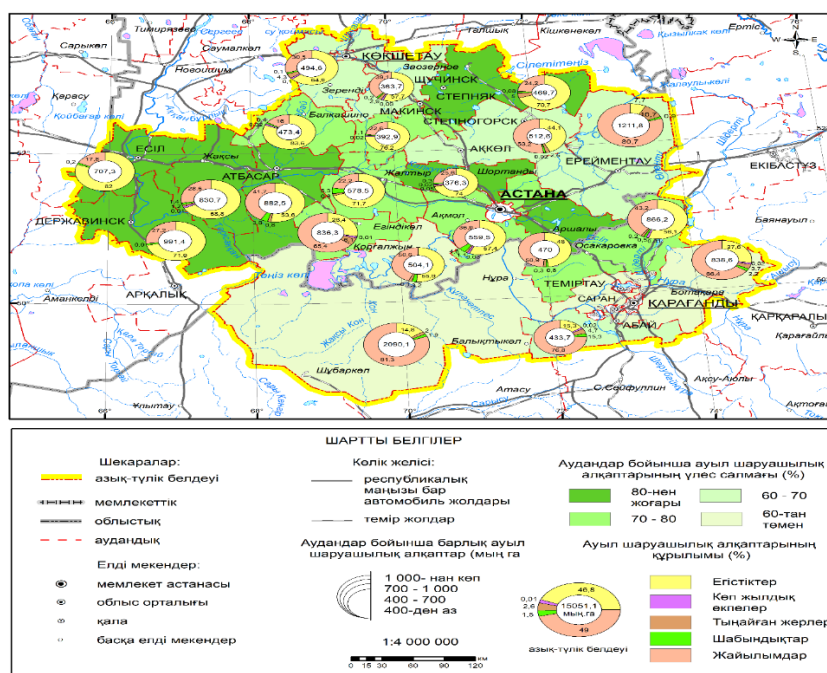
Ет өңдейтін ірі кәсіпорындар: "Ижевский" ӨК, "Макинская птицефабрика" ЖШС, "Щучинский мясокомбинат" ЖШС, "Kaz Beef LTD" ЖШС, "Астана Агро Продукт" ЖШС, "Capital Project LTD" ЖШС, "МПК Бижан" ЖШС.

Сүт өнімдерін өндіретін ірікәсіпорындар: "Eco milk" ЖШС, «Milk project» ЖШС, "АФ Родина" ЖШС, "Молоко Синегорье" ЖШС, "Нәтиже" ЖШС.

Ұн тартатын ірі кәсіпорындар: "INTER TRADE" ЖШС, «Ынтымак Атбасар» ЖШС, "Миллхауз" ЖШС, "Колутон-95" ЗАО, "Урожай" ЖШС, "ХПП Тонкерис" ЖШС, "Agrimer-Astyk" ЖШС.

Майлы дақылдарды өңдейтін ірі кәсіпорындар: "Агример Астық" ЖШС, "Бота 2015" ЖШС, "Blic Terminal" ЖШС, "Атбасарская нива" ЖШС (Department of Agriculture of Akmola region., 2024)

Азық-түлік өнімдері Астана қаласындағы 5 сауда орындарына, 29 сауда үйіне, 10 сауда орталығына жеткізіледі. Сондай-ақ, «Ақмол» дүкендер желісі бар, онда «Capital Projects LTD» ЖШС, «Астана Агро Продукт» ЖШС, «Ижевский» ОК, «Гормолзавод» ЖШС, «Родина Агрофирмасы» ЖШС, Milk Project» ЖШС және т.б. сол сияқты аумақтағы ірі ауыл шаруашылық тауар өндірушілері өз өнімдерін өткізеді. Төмендегі (2-сурет) Астана қаласының азық-түлік белдеуінің ауыл шаруашылық алқаптарының құрылымы берілген.



**Сурет 2.** Астана қаласы азық-түлік белдеуі аймағының ауыл шаруашылығы алқаптарының құрылымы

Берілген сурет 2 - талдау жасайтын болсақ, жалпы жер көлеміндегі ауыл шаруашылығы жерлерінің үлесі 80 пайыздан асатын аудандар - Есіл (88,8), Біржан сал (86,8), Жақсы (85,7), Атбасар (83), Жарқайың (82,2), Аршалы (80,3) Шортанды (80,5). Бұл осы аудандардың табиғи-климаттық жағдайларының қолайлы болуымен түсіндіріледі. Ауыл шаруашылығы жерлерінің үлесі 70-80 пайыз аралығындағы аудандар – Астрахан (78,3), Бұланды (77,3), Осакаров (76,9), Егіндікөл (76), Сандықтау (74,1), Целиноград (71,7); 60-70 пайыз аралығында – Ерейментау (68,6), Абай (64,5), Зеренді (63,3), Ақкөл (62,9), Бурабай (61,2); 60 пайыздан төмен – Бұхар жырау (58,2), Қорғалжын (54,1), Нұра (45,1) аудандарында. Егістік алқаптардың үлесі Сандықтау (83,6), Есіл (82), Бұланды (76,2), Шортанды (74), Жарқайың (71,9), Астрахан (71,7), Біржан сал (70,7) аудандарында 70 пайыздан жоғары. 50-65 пайыз аралығында – Зеренді, Бурабай, Целиноград, Қорғалжын, Осакаров, Атбасар; 50 пайыздан төмен – Аршалы (48), Ақкөл (44,1), Егіндікөл (28,4), Бұхар жырау (27,6), Абай (15,3), Нұра (14,8) аудандарында болса, ең азы - Ерейментау (7,7) ауданында.

Жайылымдық жерлердің пайыздық үлесі ең жоғары Нұра (81,3), Ерейментау (80,7), Абай (76,8), Бұхар жырау (66,4), Егіндікөл (65,4), аудандарында болса, ең азы Сандықтау (16), Есіл (17,8), Астрахан (22,2), Бұланды (22,6), Біржан сал (24,2) аудандарында екенін көруге болады.

ҚР аумағының небәрі 5,4%-ын алып жатқан Ақмола облысы елімізде өндірілетін ауыл шаруашылығы өнімдерінің 11,4%-ын, ал жоғары сапалы бидайдың төрттен біріне жуығын

өндіреді. Облыстың еңбекке қабілетті халқының 24,2%-ы ауыл шаруашылығы саласында жұмыспен қамтылған. Ақмола облысы республика көлемінде астықтың 30%-дан астамын, сүттің шамамен 7%-ын, құс етінің 30%-ын, ұнның 10%-дан астамын және жұмыртқаның 16%-ын өндіретін ірі астықты аймақ ретінде сипатталады (Department of Agriculture and land relations of Akmola region, 2024).

Елорданың азық-түлік белдеуіне Қарағанды облысының төрт әкімшілік ауданы да кіреді. Бұл аудандар экономикасының ауыл шаруашылығына бағытталуы айқын: Осакаров ауданы Қарағанды облысындағы ірі астықты аудандардың бірі болса, қалған аудандарда негізінен мал шаруашылығы басым дамыған (1-кесте).

**Кесте 1.** Астана қаласына азық-түлік белдеуі аймағынан тамақ өнімдері жеткізілетін кәсіпорындар тізімі

№ р/с	Тамақ өнеркәсібі кәсіпорындарының атауы	Жеткізілетін негізгі өнімнің түрлері
1	2	3
<i>1. Азық-түлік белдеуіне кіретін Ақмола облысының аудандары мен қалалары</i>		
<i>Ақкөл</i>	"Грин Агро Фуд" ЖШС, «Аймақ трейд» ЖШС, «SC Food» ЖШС, «Каранайза», ЖШС, «Еңбек» ЖШС, «Хлебороб» ЖШС, «Урюпинский ЖШС, "Ақкөл құс" ЖШС, "Темирлан" ШҚ	шұжық өнімдері, ұн, картоп, көкөністер, ет, сүт, жұмыртқа
<i>Аршалы</i>	«Ижевский» Өндірістік кооперативі, «Восход 2004» ЖШС, «Еңбек-1» ЖШС, «Ақ дала Агро» ЖШС, «Талгат» ШҚ	ет және шұжық өнімдері, сүт және сүт өнімдері, жұмыртқа, құс еті, картоп, сиыр, қой, жылқы еті
<i>Астрахан</i>	«АПП Астраханская птица» ЖШС, «Острогорский» ЖШС, «Миллхауз» ЖШС, «Колутон 04» ЖШС, «Шишов Е.И.» ШҚ, «Оксановка 1» ЖШС	сүт және сүт өнімдері, ұн, құс еті, ет, картоп, көкөністер (қырыққабат, сәбіз, қызылша)
<i>Атбасар</i>	«Абдуалиевых» ЖШС, «Интер Трайд» ЖШС, «Ынтымак» ЖШС, «Нан-Абройы» ЖШС, «Клименко 1» ЖШС, «Аграрное» ЖШС, «Полтавка» ЖШС, Шуйское ХХІ» ЖШС, «Шортанбай 2019» (Сочинское) ЖШС, «Бастау» ЖШС, «Алком Союз» ЖШС, «Нива» ШҚ	ұн, ет, сүт, шұжық, өсімдік майы, картоп
<i>Бурабай</i>	Молочная ферма «Айна» ЖШС, «ОСКО» ЖШС, «Щучинский еткомбинат» ЖШС, «Мясные продукты» ЖК, «Kaz Beef Processing» ЖШС, «БИС» ЖШС, «Омаров» ШҚ, «Nalyk Grain» ЖШС, «Фазенда-1» ЖШС, «Жас» ШҚ	сүт және сүт өнімдері, ет, ет және шұжық өнімдері, ұн, қымыз, картоп
<i>Бұланды</i>	«Макинск құс фабрикасы» ЖШС, «Сарытомар» Ш/Қ, «Никольское» ЖШС, «МКиО» ШҚ, «Партизанское-1» ЖШС, «Новобратское» ЖШС, «Журавлевка» ЖШС, «Kazfarming» ЖШС	ет, құс еті, ұн, картоп, көкөністер
<i>Біржан сал</i>	«КазГерКус» ЖШС, «Измайловых» ШҚ, «Шаровых» ШҚ	жұмыртқа, ет, картоп

1	2	3
Егіндікөл	«Ушаково-Агро» ЖШС, «СХП Шарафутдинов» ЖШС, «АСКОП» ЖШС	ет, сүт
Ереймен тау	«Жана береке» ЖШС, «Хуаныш» ЖК, «Юльян» ШҚ, «Глория» ШҚ	ет, картоп, көкөністер
Есіл	«Есильский маслодельный комбинат» ЖШС, «Есиль ун» ЖШС, «Виктория» ШҚ, «Сурган и К» ЖШС, «Заречный» ЖШС, «Ново-Приречное» ЖШС, «Стимул» ШҚ, «Органико» ЖШС	сүт және сүт өнімдері, ұн, ет, картоп, көкөністер
Жақсы	«Урожай» ЖШС, «Золотая Нива» ЖШС, «Айбат» ЖШС, «Отан» ШҚ, «Новокиенка» ЖШС	сүт және сүт өнімдері, шұжық өнімдері, ет, ет консервілері, ұн, картоп, көкөністер
Жарқайың	«Темирлан» ЖШС, «Молпроджаркаин» АӨК	сүт және сүт өнімдері, картоп, көкөністер
Зеренді	«Milk Project» ЖШС, «Агротрейд Кокше» ЖШС, «Викторовское» ЖШС, «Беккожа» ШҚ, «Күміс Көкше» ЖШС, «Блиц терминал» ЖШС, «Зеренди Сактау Онімдери» ЖШС, «Агро Крестьянский Двор» ЖШС	сүт және сүт өнімдері, өсімдік майы, құс еті, картоп, көкөніс, қымыз
Қорғалжын	«Агро Экспорт ЛТД» ЖШС, «Астана Агро Продукт» ЖШС, «Бытығай Сүт» ЖШС, «Жакен-2» ЖШС	ет, шұжық өнімдері, сүт көже, картоп
Сандықтау	«Сандықтау Астық» ЖШС, «Грибов» ЖК, «Максимовское» ЖШС, «Свободное» ЖШС, «Каменка и Д» ЖШС, «ПЗ Балкашинский» ЖШС	ет және ет өнімдері, ұн
Целиноград	«АФ Родина» ЖШС, «CapitalProjectLTD» ЖШС, «Племенное хозяйство Зеренда» ЖШС, «Астана Өнім» АҚ, «Ендала» ЖШС, «АФ «Ақтық» ЖШС, «Асыл Тұқым» ЖШС, «Темирбулат» ШҚ, «Грин Стар» ЖШС, «Ай-Барыс» ШҚ, «Кадам-НС» ЖШС, «Темеш» ЖШС, «Жасыл жайлау» ШҚ	ет, құс еті, ет өнімдері, жұмыртқа, сүт және сүт өнімдері, қымыз, картоп, көкөністер
Шортанды	«Молочный 2» АӨК, «ХПП Тонкерис» ЖШС, «Новокубанское» ЖШС, «Целина агро трейд» ЖШС, «Табиғат ТР» ЖШС	сүт және сүт өнімдері, ет, ұн, картоп
Степного рск қ.	«Biorom Technologies» ЖШС, ПКФ "Табыс-Агро" ЖШС, "Тепличные технологии Казахстана" ЖШС	картоп, қияр, қызанақ
Көкшетау қ.	"Гормолзавод" ЖШС, "Нәтиже" ЖШС, "Красноярские колбасы" ЖШС, "Sinogor-Grain" ЖШС, "Каз Мель Пром" ЖШС, "МК Агропродукт" ЖШС, " МПЗ Бижан" ЖШС, "Стерх" ЖШС, "Биборд" ЖШС, " Агротрейд Кокше" ЖШС	сүт және сүт өнімдері, ет және ет өнімдері, ұн, картоп

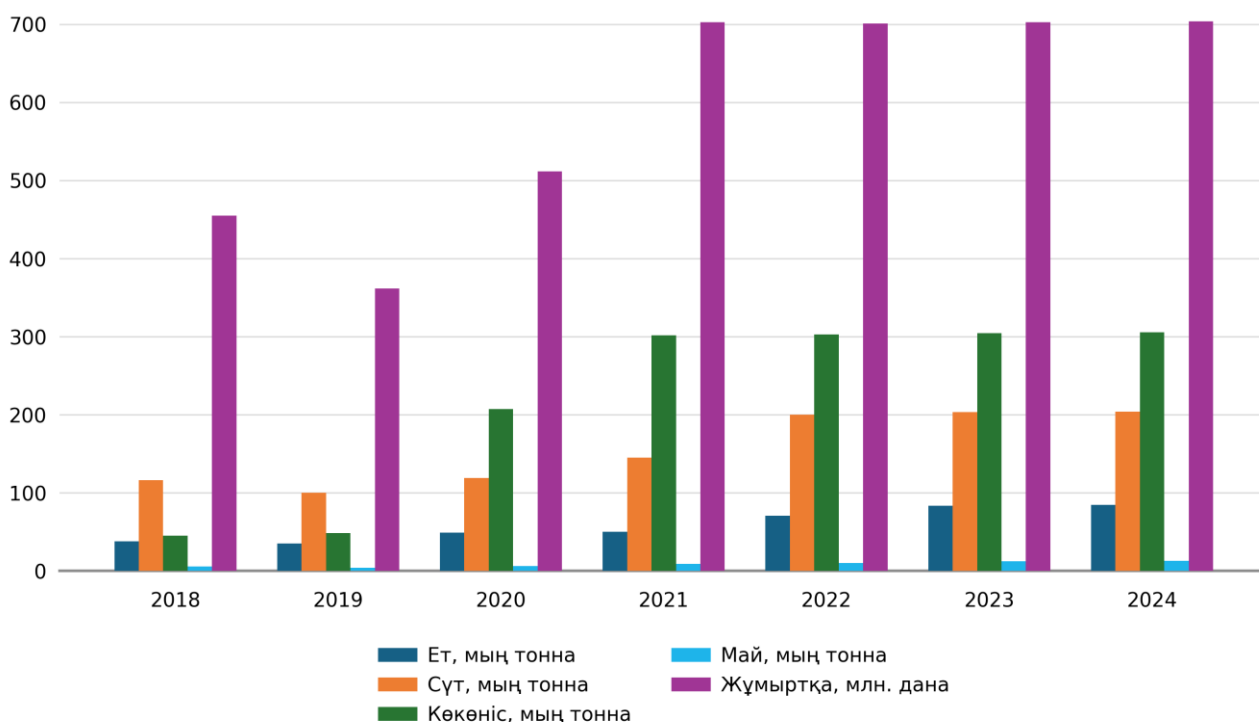
<i>2. Азық-түлік белдеуіне кіретін Қарағанды облысының аудандары мен қалалары</i>		
<i>Абай</i>	"Топарские теплицы" ЖШС, "Поливное" ШҚ, "Астана Агро LTD" ЖШС, "Шанс" ШҚ	қияр, қызанақ, тәтті бұрыш, картоп
<i>Бұхар жырау</i>	"ПК им. Кирова" ЖШС, "Қарағанды Құс" ЖШС, "Үштөбе Құс" ҚФ, "Қарағанда-осетр" ЖШС, "Акнар ПФ" ЖШС	картоп, жұмыртқа, балық өнімдері, құс еті
<i>Нұра</i>	"Муханалиев Б.К." ШҚ, "А.К. Төлеуов" ШҚ, "Байбол" ШҚ, "Кайырлы" ШҚ	ет
<i>Осакаров</i>	"Салтанат" ШҚ, "Кызылтас" ШҚ, "Жанел" ШҚ, "Нуртилеу" ФШ	ет
<i>Қарағанды қ.</i>	"Нәтиже Сүт" ЖШС, "Қарағанды Нан" ЖШС, "Еуразия Фудс" ЖШС	сүт өнімдері, нан-тоқаш, макарон өнімдері, май-тоңмай өнімдері
<i>Теміртау қ.</i>	Ren Milk" ЖШС, "Бидай нан К" ЖШС, "Компания Сет" ЖШС, "Альтара групп" ЖШС, "Достояние рода" ЖШС	сүт өнімдері
<i>Шахтинск к.қ.</i>	"Апрель Кулагер" ЖШС, "Садко kz" ЖШС, "АЯН М." ЖШС	шұжық өнімдері
<i>Саран қ.</i>	"Дедов" ЖШС, "Арка-Лада" ЖШС, "Планета Здоровья-KZ" ЖШС	құс еті, шұжық өнімдері, ұн, кондитерлік өнімдер

\* Ескерту – автор құрастырған (Ақмола облысының ауыл шаруашылығы және жер қатынастары басқармасы мен Қарағанды облысының ауыл шаруашылығы басқармасының 2024 жылғы деректері бойынша)

Кесте деректері Астана қаласының азық-түлік белдеуіндегі жеткізілім құрылымының негізін мал шаруашылығы өнімдері (ет, сүт, құс өнімі, жұмыртқа) және күнделікті тұтынуға өсімдік өнімдері (картоп, ұн, көкөніс) құрайтынын көрсетеді. Әкімшілік аудандардың басым бөлігінде картоп, ет және сүт өнімдерінің қатар келуі белдеудің елордаға «негізгі азық-түлік себетін» қалыптастыруға бағытталғанын дәлелдейді. Ақмола облысының аудандары өнім түрлері бойынша кеңірек әртараптанған (ет-сүт-ұн-картоп-көкөніс комбинациялары жиі), бұл Астанаға жақындық пен өндірістік-шикізат базасының ықпалымен түсіндіріледі. Қарағанды облысы тарапынан жылыжай көкөністері мен бірқатар өңделген өнімдер (нан-тоқаш, макарон, май-тоңмай, кондитерлік) ұсынылуы азық-түлік белдеуінің тек шикізат жеткізілімін емес, өңдеу және агрологистикалық тізбекті де қамтитынын айқындайды.

Қала негізгі тамақ өнімдеріне деген қажеттіліктерінің 22% меншікті өндіріс есебінен, 31% азық-түлік белдеуі жеткізілімдер есебінен, 47% республиканың басқа өңірлерінен және импорт есебінен қамтамасыз етеді (3-сурет).

2018–2024 жылдардағы динамика Астана қаласының азық-түлік белдеуі арқылы жеткізілетін негізгі өнімдердің жалпы көлемі артқанын және соңғы жылдары тұрақтанғанын көрсетеді. 2019 жылы бірқатар позициялар бойынша (ет, сүт, жұмыртқа) төмендеу байқалғанымен, 2020–2021 жылдары күрт өсім орын алады: әсіресе көкөніс пен жұмыртқа көлемі бірнеше есе ұлғайып, 2021 жылдан кейін жоғары деңгейде сақталады. 2022–2024 кезеңінде сүт, көкөніс және жұмыртқа көрсеткіштері тұрақты платоға шыққан, ал ет көлемі 2022–2023 жылдары өсіп, 2024 жылы тұрақтану үрдісі байқалады. Май көлемі салыстырмалы түрде төмен болғанымен, соңғы жылдары біртіндеп артқан. Жалпы алғанда, деректер азық-түлік белдеуінің өндірістік және жеткізу әлеуеті күшейіп, елорда нарығын негізгі өнімдермен қамтамасыз етудің тұрақтылығы артқанын аңғартады.



**Сурет 3.** 2018–2024 жж. Астана қаласы азық-түлік белдеуі аймағынан жеткізілген негізгі азық-түлік өнімдерінің көлемі (Akimat of Astana, 2024)

Елдің экономикалық қауіпсіздігі әр түрлі қызмет салаларының жағдайымен сипатталады. Оның маңызды құрамдастарының бірі – азық-түлік қауіпсіздігі. Азық-түлік қауіпсіздігін қалыптастыру стратегиясы инженерлік-көліктік факторды және халықты қоныстандыру жүйесінің негізін құрайтын инфрақұрылымды дамытуға негізделуі керек. Ірі қалалардың айналасында дамыған азық-түлік белдеулерін құру жалпы елдің азық-түлік қауіпсіздігін қалыптастырудағы маңызды міндет болып табылады.

Республика бойынша теміржол бағыттарының ең жоғары тығыздығы Ақмола облысында тіркелген. Бұл жағдай өңірдің агроөнеркәсіптік кешені үшін ерекше маңызды, өйткені ауыл шаруашылығы өнімдерін өндіру-өңдеу-сақтау-тұтыну орындарына жеткізу тізбегінің тиімділігі ең алдымен көліктік қолжетімділікке тәуелді. Теміржол желісі жүк тасымалының тұрақтылығын арттырып, логистикалық шығындарды төмендету арқылы өндіріс тиімділігін көтеруге және өңірдің азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету әлеуетін күшейтуге ықпал етеді.

Ақмола облысының экономикалық дамуына оның қолайлы экономикалық-географиялық орны мен көліктік-географиялық жағдайы да әсер етеді. Елдің географиялық орталығына салыстырмалы түрде жақын орналасуы өңірдің шаруашылық байланыстарын кеңейтуге мүмкіндік береді. Осы тұрғыда ендік және бойлық бағыттағы Орта Сібір, Оңтүстік Сібір және Трансқазақстан теміржол желілері облыстың ішкі және сыртқы экономикалық байланыстарын жүзеге асыруда маңызды рөл атқарады.

Сондай-ақ Астана қаласына азық-түлік өнімдерін жеткізетін өңірдің ауыл шаруашылығы кәсіпорындары үшін, жүрдек әрі ыңғайлы болып табылатын автомобиль көлігінің маңызы зор. Онымен жүктің басым бөлігі тасымалданады. Өңірдегі жалпыға ортақ пайдаланылатын жолдардың ұзындығы 7890,5 км құрайды. Республикалық маңызы бар жолдар 28,6 % (2260,5 км), облыстық маңызы бар жолдар 33,8 % (2665 км) және аудандық маңызы бар жолдар 37,6 % (2965 км) құрайды (Osrapova, et al., 2020). Ақмола облысының жалпы пайдаланымдағы автомобиль жолдарының тығыздығы – 54 км; республикалық маңызы бар жолдар тығыздығы – 15,5 км; облыстық маңызы бар жолдар тығыздығы – 18,2

км құрайды және жалпы пайдаланымдағы жолдардың тығыздығы орташа республикалық деңгейден жоғары (ҚР орташа көрсеткіш – 1000 км<sup>2</sup>/35,2 км) деп қорытынды жасауға болады.

Астана қаласының азық-түлік белдеуіндегі әлеуметтік-экономикалық алғышарттарын ескере отырып, осы аймақтағы бәсекелестік артықшылықтар мен перспективаларды, сондай-ақ кемшіліктер мен проблемаларды атап өткен жөн. Ол төмендегі 2-кестеде SWOT-талдауда берілген.

**Кесте 2.** Астана қаласының азық-түлік белдеуін қалыптастырудағы әлеуметтік-экономикалық факторлардың SWOT-талдауы

<b>Күшті жақтары</b>	<b>Әлсіз жақтары</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Қолайлы экономикалық-географиялық орналасуы (елорда нарығына жақындық, өткізу нарығының кеңдігі);</li> <li>- Агроөнеркәсіптік кешеннің жоғары өндірістік әлеуеті және тұрақты шикізат базасының болуы;</li> <li>- Шаруа қожалықтары мен жеке қосалқы шаруашылықтардың әртараптандырылған өндірістік бағыты (ет, сүт, көкөніс, картоп және т.б.);</li> <li>- Қала халқы тарапынан азық-түлік өнімдеріне тұрақты және төлем қабілетті сұраныстың қалыптасуы;</li> <li>- Азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етуге бағытталған мемлекеттік және өңірлік қолдау шараларының болуы;</li> <li>- Еңбек ресурстарының және ауыл шаруашылығында жұмыс тәжірибесі бар халықтың болуы</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ауыл шаруашылығы өнімдерін өңдеу, сақтау және тасымалдау инфрақұрылымының жеткіліксіз дамуы (қойма, салқындату, сұрыптау-қаптау объектілері);</li> <li>- Өндірілген ауыл шаруашылығы өнімдерін өткізу тізбегінде логистикалық шығындардың жоғары болуы;</li> <li>- Жеке қосалқы шаруашылықтардың нарыққа тікелей шығу мүмкіндіктерінің шектеулілігі;</li> <li>- Ауыл шаруашылығы өндірісінде заманауи технологиялар мен цифрлық шешімдерді енгізу деңгейінің төмендігі;</li> <li>- Өңірлік деңгейде агроөнеркәсіптік кешенді жоспарлау мен мониторинг жүргізуге арналған статистикалық деректердің жеткіліксіздігі;</li> <li>- Ауылдық аумақтардағы инженерлік және көлік инфрақұрылымының тозуы</li> </ul>
<b>Мүмкіндіктері</b>	<b>Қатерлері</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Аймақта көлік жүйесін, логистикалық қызмет көрсетуді және агрологистикалық тораптарды дамыту (қойма, көтерме-тарату орталықтары);</li> <li>- Шаруа қожалықтары мен жеке қосалқы шаруашылықтарды кооперациялау арқылы өндіріс пен өткізу тиімділігін арттыру;</li> <li>- Қала маңындағы ауыл шаруашылығы өндірісін интенсификациялау және өнімділікті арттыру;</li> <li>- Азық-түлік өнімдерін қайта өңдеу үлесін ұлғайту арқылы қосылған құнды арттыру;</li> <li>- Мемлекеттік қолдау тетіктерін (субсидия, инвестициялық жеңілдіктер) тиімді пайдалану;</li> <li>- Ішкі нарықты отандық азық-түлікпен тұрақты қамтамасыз ету</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Климаттық тәуекелдердің күшеюі (қуаңшылық, өнімділіктің құбылмалылығы);</li> <li>- Ауыл халқының қалаға көшуі және еңбек ресурстарының қысқаруы;</li> <li>- Талдау және болжау үшін статистикалық материалдың жеткіліксіздігі және үйлеспейуі (бірегей дерекқордың жоқтығы);</li> <li>- Ауыл шаруашылығы өнімдеріне баға конъюнктурасының тұрақсыздығы;</li> <li>- Логистикалық және энергетикалық ресурстар құнының өсуі;</li> <li>- Өңдеу және сақтау инфрақұрылымы жеткіліксіз дамыған жағдайда өнім шығындарының артуы</li> </ul>

#### 4. Талқылау

Алынған нәтижелер Астана қаласының азық-түлік белдеуін қалыптастыруда нарыққа жақындық пен көлік-логистикалық қолжетімділіктің шешуші фактор екенін дәлелдейді. Кәсіпорындардың аумақтық орналасуының елордаға жақын аудандарда шоғырлануы өнімді жеткізу шығындарын қысқартып, тез бұзылатын өнімдер бойынша жеткізілімнің тұрақтылығын арттырады.

Аудандарды 4 түрге жіктеу (эксперттік бағалау негізінде) аумақтағы өндірістік әлеуеттің біркелкі еместігін көрсетеді және басқарушылық шешімдерді сараланған түрде қабылдауға мүмкіндік береді: I түр үшін – өндіріс көлемін ұлғайту және сапаны стандарттау; II түр үшін – сақтау мен өңдеу инфрақұрылымын күшейту; III-IV түр үшін – мамандануды нақтылау және логистикалық қолжетімділікті нүктелік жақсарту.

2018–2024 жылдардағы динамикада бірқатар өнім топтары бойынша өсімнің байқалуы азық-түлік белдеуінің жеткізу әлеуеті күшейгенін аңғартады, алайда өнім құрылымының теңгерімділігі, өңдеу қуаттарының жеткіліктілігі және суық тізбек инфрақұрылымы жеткізілім тұрақтылығын айқындайтын негізгі шектеуші факторлар ретінде қала береді.

SWOT-талдау нәтижелері де осы қорытындыларды қолдайды: күшті жақтар (Астана нарығына жақындық, АӨК әлеуеті) мүмкіндіктермен (агрологистика мен өңдеуді дамыту) ұштасқан жағдайда, әлсіз жақтарды (инфрақұрылым, деректердің жеткіліксіздігі) азайтуға және қатерлерді (көші-қон, нарықтық құбылмалылық, климаттық тәуекелдер) басқаруға мүмкіндік береді.

Зерттеудің шектеуі ретінде типологияның эксперттік сипатта құрылғанын және болашақта оны сандық көрсеткіштер жүйесімен (өзін-өзі қамту коэффициенттері, қолжетімділік индекстері, кластерлік талдау) толықтыру қажеттігін атап өткен жөн. Сонымен қатар халықаралық тәжірибемен салыстырмалы талдау жүргізу және сценарийлік, болжамдық компонентті қосу келешек зерттеу бағыттары ретінде ұсынылады.

Халықаралық тәжірибеде ірі қалалардың азық-түлікпен қамтылуын күшейту «азық-түлік белдеуі» және «азық-түлік алабы» логикасымен, яғни қала маңы өндірісін агрологистика, өңдеу және сақтау инфрақұрылымымен байланыстыратын аумақтық жоспарлау тәсілдері арқылы іске асырылады. Бұл тұрғыда Астана маңы үшін де негізгі ұстаным ортақ: тез бұзылатын өнімдер бойынша (сүт, ет, көкөніс) жеткізілімнің тұрақтылығы нарыққа жақындықпен қатар суық тізбек, қойма және көтерме-тарату инфрақұрылымының жеткіліктілігіне тәуелді.

Сонымен бірге зерттеуді тереңдетудің болашағы бар бағыты ретінде сандық модельдеу тәсілдерін енгізу ұсынылады: аудандарды типологиялауда эксперттік бағалауды өзін-өзі қамтуға жуық көрсеткіштер, өндіріс құрылымы және көлік қолжетімділігі индекстері сияқты сандық көрсеткіштермен толықтыру, сондай-ақ қарапайым кластерлік топтастыру арқылы типтердің тұрақтылығын тексеру мүмкін. Болжамдық бөлікті күшейту үшін кемінде екі сценарийлік негізді қолдануға болады: (1) инфрақұрылымдық даму нұсқасы (қойма, өңдеу және логистика қуаттары кеңейтілген жағдайда), (2) тәуекелге негізделген даму нұсқасы (климаттық құбылмалылық немесе көші-қон күшейген жағдайда). Бұл тәсілдер алдағы зерттеулерде азық-түлік белдеуін басқару шешімдерін сандық түрде негіздеуге мүмкіндік береді.

#### 5. Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері Астана қаласының азық-түлік белдеуін қалыптастыруда Ақмола облысының экономикалық-географиялық орны мен агроөнеркәсіптік әлеуеті шешуші рөл атқаратынын көрсетті. Облыс Қазақстанның жетекші астықты өңірлерінің бірі бола отырып, егіншілікке қолайлы жер ресурстары мен өндірістік тәжірибенің қалыптасуы арқылы ішкі нарықты негізгі азық-түлік өнімдерімен қамтамасыз етуге тұрақты негіз қалыптастырады. Мал азықтық алқаптардың болуы және шаруашылық құрылымының әртараптануы (шаруа қожалықтары мен жеке қосалқы шаруашылықтардың

үлесі) өңірде мал шаруашылығын дамытуға мүмкіндік беріп, елорданы ет және сүт өнімдерімен қамтамасыз ету әлеуетін арттырады. Бұл Ақмола облысын елдің азық-түлік қауіпсіздігін күшейту және сыртқы нарыққа шығу мүмкіндігін кеңейтетін стратегиялық тірек аумақтардың біріне айналдырады. Сонымен қатар азық-түлік белдеуінің құрамында Қарағанды облысының Астанаға іргелес аудандары да қарастырылған.

Азық-түлік белдеуі шеңберінде жеткізілім құрылымы негізінен күнделікті сұраныстағы базалық өнімдерге (ет, сүт, жұмыртқа, көкөніс, картоп, ұн) сүйенетіні анықталды. Өнім көлемінің 2018–2024 жылдары жалпы өсуі және бірқатар позициялар бойынша 2021 жылдан кейін тұрақты деңгейге шығуы белдеу инфрақұрылымының және жеткізу тізбегінің нығайғанын білдіреді. Сонымен қатар аудандарды азық-түлікпен қамтамасыз ету мүмкіндігіне қарай типологиялау нәтижелері өндірістік әлеуеттің аумақ бойынша біркелкі таралмағанын көрсетті: елордаға жақын аудандарда өндіріс пен кәсіпорындардың шоғырлануы жоғары, ал шалғай аудандарда логистика, мамандану және өңдеу-қоймалау инфрақұрылымына байланысты шектеулер байқалады. Бұл айырмашылықтар азық-түлік белдеуін жоспарлауда тек өндіріс көлемін арттырумен шектелмей, «өндіру–өңдеу–сақтау–тасымалдау–өткізу» тізбегін кешенді түрде дамыту қажеттігін дәлелдейді.

Осы тұрғыда Астана қаласының айналасында азық-түлік белдеуін құру және облыс халқын азық-түлікпен қамтамасыз ету бағдарламалары аясындағы инвестициялық жобалар АӨК салаларының одан әрі өсуіне қолайлы әсер етеді. Әсіресе өңдеу кәсіпорындарын кеңейту, қойма және салқын тізбек инфрақұрылымын дамыту, көтерме-тарату орталықтарын күшейту, сондай-ақ шағын өндірушілер кооперациясын қолдау елорданы отандық өніммен үздіксіз қамту деңгейін арттырып, өнімнің өзіндік құнын төмендетуге және нарықтағы бәсекеге қабілеттілікті күшейтуге мүмкіндік береді. Жалпы алғанда, Ақмола облысының агроөнеркәсіптік әлеуетін тиімді іске асыру Астана қаласының азық-түлік қауіпсіздігін нығайтып қана қоймай, өңірдің әлеуметтік-экономикалық дамуына және ауылдық аумақтардағы жұмыспен қамтудың тұрақтануына оң ықпал етеді.

Зерттеу нәтижелері негізінде Астана қаласының азық-түлік белдеуін қалыптастырудағы агроөнеркәсіптік кешеннің экономикалық-географиялық ерекшеліктері бойынша төмендегідей ұсыныстар берілді:

- *Агрологистикалық инфрақұрылымды күшейту.* Астана қаласына жақын аудандарда көтерме-тарату орталықтарын, көкөніс қоймаларын, тоңазытқыш қоймаларын және сұрыптау-қаптау желілерін дамыту қажет. Бұл тез бұзылатын өнімдер бойынша (сүт, ет, көкөніс) ысырапты азайтып, жеткізілімнің тұрақтылығын арттырады.

- *Өңдеу кәсіпорындарын аумақтық тұрғыдан “шикізат базасына жақын” орналастыру.* Сүт қабылдау пункттері, шағын сүт зауыттары, етті бастапқы өңдеу цехтары, көкөністі қайта өңдеу (кептіру, консервілеу) бағыттары шикізат көп шоғырланған аудандарда орналасса, тасымал шығыны қысқарып, қосылған құн өңірде қалады.

- *Шағын өндірушілерді кооперациялау және тұрақты өткізу арналарына қосу.* Шаруа қожалығы мен жеке қосалқы шаруашылық үшін кооперативтер, ауылдық жабдықтау-өткізу орталықтары, сауда желілерімен ұзақмерзімді келісімшарттар жасау тетіктерін кеңейту ұсынылады. Бұл өнім көлемін тұрақтандырып, сапа талаптарын орындауды жеңілдетеді.

- *Өнім сапасы мен қауіпсіздігін басқару жүйесін енгізу.* Сертификаттау, ветеринариялық және фитосанитариялық бақылау, қадағалау ізін цифрландыру.

- *Көлік қолжетімділігін жақсарту және “соңғы шақырым” логистикасын дамыту.* Агротасымалдауда ең әлсіз буын – аудандық, ауылдық жолдар. Сондықтан ауылдан қалаға дейінгі маршруттарды оңтайландыру, жергілікті жолдарды жөндеу, маусымдық өтімділікті қамтамасыз ету (қысқы кезең) маңызды.

- *Мониторинг пен дерекқорды қалыптастыру (басқарушылық шешім үшін).* Азық-түлік белдеуі бойынша бірыңғай дерекқор: өндіріс көлемі, қойма сыйымдылығы, тасымал

ағыны, бағалар, маусымдық ауытқу сияқты көрсеткіштерді жүйелі жинау керек. Бұл болжау, тәуекелді басқару және инвестициялық шешім қабылдауды дәл етеді.

**6. Қосымша материалдар:** қосымша материалдар жоқ.

### 7. Авторлардың қосқан үлесі

Концептуализация, әдістемелерді әзірлеу, жетекшілік – Г.О.; әдістемені әзірлеу, бағдарламалық қамтамасыз ету және жоба жетекшілігі – А.С., Г.О.; әдістемені әзірлеу, зерттеу материалдарымен қамтамасыз ету, жетекшілік – А.С.; әдістемені әзірлеу, зерттеу материалдарымен қамтамасыз ету, жетекшілік – А.М.; мәтінді дайындау және өңдеу – А.С.; талдау жүргізу – А.М.

### 8. Авторлар туралы мәлімет

Оспанова, Гульнара - PhD докторант, аға оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көшесі, 13, Астана, Қазақстан, 010000; [ospanova\\_14@mail.ru](mailto:ospanova_14@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4035-719X>

Мылқайдаров, Алим – география ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби көшесі, 71, Алматы, Қазақстан, 050040; [mylkaydarov@mail.ru](mailto:mylkaydarov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8652-3133>

Сансызбаева, Айгерим – PhD, доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көшесі, 13, Астана, Қазақстан, 010000; [sansyzbayeva.ab@mail.ru](mailto:sansyzbayeva.ab@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0695-3406>

**9. Қаржыландыру:** жоқ.

**10. Алғыстар:** жоқ.

**11. Мүдделер қақтығысы:** мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

### 12. Әдебиеттер тізімі

1. Baransky, N. N. (1980). Geographical and economic sites (Geograficheskie i ekonomicheskie objekty in Russian). [https://rusneb.ru/catalog/002744\\_000053](https://rusneb.ru/catalog/002744_000053)
2. Kolosovsky, N. N. (1958). Fundamentals of economic zoning (Osnovy ekonomicheskogo rajonirovaniya in Russian). <https://champ.proftest.ru>
3. Saushkin, Yu. G. (1973). Economic geography: history, theory, methods, practice (Ekonomicheskaya geografiya in Russian). <http://www.ecoross.ru/files/books2016>
4. Rakitnikov, A. N. (1970). Geography of agriculture (Geografiya sel'skogo hozyajstva in Russian). <https://rgub.ru/searchopac/book.php?id=RGUB\BIBL\0000744273>
5. Kryuchkov, V. G. (1987). Land use and food resources (Zemlepol'zovanie i prodovol'stvennye resursy in Russian). <https://earthpapers.net>
6. Nosonov, A. M. (2001). Territorial systems of agriculture. Economic and geographical foundations of research (Territorial'nye sistemy sel'skogo hozyajstva in Russian). Moscow, 12-77.
7. Mints, A. A. (1972). Economic assessment of natural resources (Ekonomicheskaya ochenka prirodnih resursov in Russian). Moscow, 302-305.
8. Pulyakin, V. A., Vlasova, T. K., & Nadirova, A. A. (1992). The global food problem: a geographical analysis (Global'naya prodovol'stvennaya problema: geograficheskij analiz in Russian). Nauka, 200-201.
9. Michurina, F. Z. (1984). Prospects of social development of the village (Perspektivy social'nogo razvitiya sela in Russian). <https://www.dissercat.com>

10. Kovalev, S. A. (1965). Economic geography in the USSR: History and modern development (Ekonomicheskaya geografiya v SSSR: istoriya i sovremennoe razvitie in Russian). Nauka, 38-41.
11. Nefedova, T. G., Polyan, P. M., & Treivish, A. I. (2001). City and village in European Russia: one hundred years of change (Goroda i sela Evropejskoj chasti Rossii: sto let peremen in Russian).  
[https://imwerden.de/pdf/gorod\\_i\\_derevnya\\_v\\_evropejskoj\\_rossii\\_sto\\_let\\_peremen\\_2001\\_iz\\_d.pdf](https://imwerden.de/pdf/gorod_i_derevnya_v_evropejskoj_rossii_sto_let_peremen_2001_iz_d.pdf)
12. Palamarchuk, M. M. (1980). Agro-industrial complex and development problems of the Kiev metropolitan region (Agropromyshlennyj kompleks i problemy razvitiya Kievskoj aglomeracii in Russian). Nauka, 92–101.
13. Suleimenov, J. J., & Uspanova, M. U. (2011). The agricultural sector of the economy of Kazakhstan in the context of globalization (Agrarnyj sektor ekonomiki Kazahstana v usloviyah globalizacii in Russian). <http://www.irbis-nbu.gov.ua>
14. Alshanov, R. A. (2006). Kazakhstan in the global agricultural market: potential, problems and their solution (Kazahstan na mirovom sel'skohozyajstvennom rynke: potencial, problemy i ih reshenie in Russian). <https://kazneb.kz/ru/bookView/view?br=1104789&simple=true>
15. Abalkin, L. I. (1987). Theoretical foundations of the restructuring of the economic mechanism (Teoreticheskie osnovy restrukturizacii ekonomicheskogo mekhanizma in Russian). (pp. 30-32). <https://theoreticaleconomy.ru/ru/storage/view/144822>
16. Belgibaev, K. M., Autov, P. P., & Sarymsakova, S. S. (1992). Cost-effective concept of increasing the efficiency of agricultural production (Ekonomicheski vygodnaya koncepciya povysheniya effektivnosti sel'skohozyajstvennogo proizvodstva in Russian). Alma-Ata: Kazshi, 45 p. <https://www.dissercat.com>
17. Government of the Republic of Kazakhstan. (2017). Roadmap for the formation of the food belt of Astana for 2018–2021, approved by the decree of the Government of the Republic of Kazakhstan dated October 13, 2017. No. 645. <https://adilet.zan.kz>
18. Ospanova, G. Sh., Saipov, A. A., Sergejeva, A. M., Saparov, K. T., Omirzakova, M. Zh., & Nurymova, R. D. (2022). Potential for the development of agritourism in the food supply zone of the Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan city. *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 44(4), 1253–1259. <https://doi.org/10.30892/gtg.44409-941>
19. State institution “Department of agriculture and land relations of Akmola region”. (2023). <https://www.gov.kz/memleket/entities/aqmola-ush/press/article/details/76973>
20. Ospanova, G. Sh., Saipov, A. A., Baizhanova, B. K., & Nurymova, R. D. (2020). Indicators that increase the effectiveness of the economic and geographical position of the city of Nur-Sultan contributing to the formation and development of the food belt (Ekonomiko-geograficheskogo polozheniya goroda Nur-Sultan in Russian). *Science and Education*, 4-2(61), 118–125. <https://vestnik.satbayev.university>

## **Economic and geographical features of the agro-industrial complex in the formation of the food belt of Astana city**

**Gulnara Ospanova, Alim Mylkaydarov, Aigerim Sansyrbayeva**

**Abstract.** The capital of the Republic of Kazakhstan, Astana, has been characterized in recent years as one of the largest dynamically developing cities in the Eurasian space. The intensification of the process of urbanization, population growth and expansion of the consumer market increases the relevance of the issue of ensuring food security in the capital and adjacent territories. Improving the system of food supply to the population of large cities and agglomerations requires the formation of specialized agricultural zones around the city, the search for directions for increasing production

volumes, and intensifying agriculture. In this regard, in order to continuously provide the capital with domestic food products, a set of measures is being implemented aimed at developing the production potential, especially the raw material base, of enterprises and farms in Akmola and Karaganda regions located in the city itself and within a radius of 300 km from it. At the same time, it is strategically important to strengthen the infrastructure for the construction, storage and logistics of enterprises for processing agricultural products in rural areas, as well as the formation of a food belt in the vicinity of Astana, focused on the production of high-quality products.

The article examines the socio-economic prerequisites for the development of the suburbs of Astana and systematizes the main factors affecting the formation and development of the food belt. The purpose of the study is to identify the socio - economic prerequisites for the development of the food Belt region of Astana, which is distinguished by the conditions of the suburbs of Astana, the optimal combination of natural, agricultural, and socio-economic resources, and to assess its potential. In the course of the study, comparative and geographical analysis, systematization of statistical data, and cartographic approaches were used, and the features of the territorial location of enterprises were evaluated. The region has the highest density of railway routes in the Republic. At the same time, the strengths and weaknesses, opportunities and barriers of development conditions were differentiated, and a socio-economic SWOT analysis of the territory was carried out. As a result of the study, Borovoe, Korgalzhyn, Arshaly, and Akkol districts of Akmola region were identified as territories with absolute priorities for further development. The results will serve as the basis for the development of proposals aimed at increasing the food supply of the capital, the development of agro-production and Processing Industries, and the improvement of the regional agrological system.

**Keywords:** food belt; food security; agricultural products; agroferms.

## **Экономико-географические особенности агропромышленного комплекса в формировании продовольственного пояса города Астаны**

**Гульнара Оспанова, Алим Мылқайдаров, Айгерим Сансызбаева**

**Аннотация.** Столица Республики Казахстан – город Астана в последние годы характеризуется как один из самых динамично развивающихся крупных городов на евразийском пространстве. Усиление процесса урбанизации, рост населения и расширение потребительского рынка все больше актуализируют вопрос обеспечения продовольственной безопасности в столице и на прилегающих территориях. Совершенствование системы обеспечения населения крупных городов и агломераций продуктами питания требует формирования вокруг города специализированных сельскохозяйственных зон, поиска направлений увеличения объемов производства и интенсификации сельского хозяйства. В этой связи в целях бесперебойного обеспечения столицы отечественными продовольственными товарами реализуется комплекс мер, направленных на развитие производственного потенциала предприятий и хозяйств Акмолинской и Карагандинской областей, расположенных в самом городе и в радиусе 300 км от него, особенно развития сырьевой базы. Стратегически важно также строительство предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции в сельской местности, усиление инфраструктуры хранения и логистики, а также формирование продовольственного пояса вокруг Астаны, ориентированного на производство высококачественной продукции.

В статье рассматриваются социально-экономические предпосылки развития территории пригорода Астаны, систематизируются основные факторы, влияющие на формирование и развитие продовольственного пояса. Цель исследования – выявление социально-экономических предпосылок развития зоны продовольственного пояса города Астаны,

отличающихся астанинской обстановкой, оптимальным сочетанием природных, сельскохозяйственных и социально-экономических ресурсов и оценка ее потенциала. В ходе исследования применялись сравнительно-географический анализ, систематизация статистических данных и картографические подходы, оценивались особенности территориального расположения предприятий. В области зафиксирована самая высокая плотность железнодорожных маршрутов по Республике. При этом были проанализированы сильные и слабые стороны, возможности и препятствия условий развития, проведен социально-экономический SWOT-анализ территории. В результате исследования Бурабайский, Коргалжынский, Аршалынский и Аккольский районы Акмолинской области определены как территории с абсолютными приоритетами для дальнейшего развития. Полученные выводы послужат основой для выработки предложений, направленных на повышение продовольственной обеспеченности столицы, развитие агропромышленной и перерабатывающей отрасли и совершенствование системы региональной агрологистики.

**Ключевые слова:** продовольственный пояс; продовольственная безопасность; сельскохозяйственная продукция; агрофермы.

## Wind speed and wind power changes with height in the Absheron peninsula coastal zone

Vusala Rasulzadeh

Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,  
Institute of Geography PLE, Baku, Azerbaijan;  
[resulzade323@gmail.com](mailto:resulzade323@gmail.com)

**Abstract.** The article analyzes in detail the change in wind speed with height in four main points located in the coastal zone of the Absheron Peninsula, which are quite promising in terms of wind energy production in Azerbaijan - Pirallahi, Mardakan, Sumgayit and Sangachal for 2001–2024. Within the framework of the study, the statistical characteristics of wind speed and wind power change dynamics at heights of 10 and 50 meters were investigated for each point. Graphs reflecting the change in wind speed and power by years, months and seasons were constructed, and long-term trends were assessed. In addition, special attention was paid to the changes in wind speed during the day at the selected points. As a result of the analysis, it was found that the wind regime in coastal zones differs in both seasonal and daily rhythms, and these characteristics directly affect the possibilities of using wind as a renewable energy source. At the end of the study, two important theoretical models - the power law and the logarithmic law - were applied to take into account the height-dependent variation of wind speed, and their advantages and suitability were comparatively evaluated.

**Keywords:** wind speed; wind energy; wind power; Log law; Power law.

**Citation:** Rasulzadeh, V. (2026). Wind speed and wind power changes with height in the Absheron peninsula coastal zone. *Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series*, 154(1), 154-170.

<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-154-170>

Academic Editor:  
N.E. Ramzanova

Received: 26.02.2026

Revised: 28.02.2026

Accepted: 11.03.2026

Published: 31.03.2026



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

### 1. Introduction

The acceleration of climate change and the challenges of energy security are driving countries around the world towards clean and renewable energy sources. In this context, wind energy is considered one of the most attractive alternatives with its long-term environmental and economic efficiency. (International Energy Agency, 2023; Pryor et al., 2010). Wind parameters are determined by altitude and synoptic conditions. At the same time, differences in their values are observed in different months and seasons of the year, as well as at different times of the day (Kubik et al., 2011). For the correct assessment of wind energy potential, it is of particular importance to study the variation of wind speed depending on altitude (Tar et al., 2009). The research study analyzed the characteristics of wind speed variations at heights of 10 and 50 meters at four selected points located on the Absheron Peninsula. The analyses conducted contribute to determining the optimal heights and locations for technical applications of wind energy.

### Brief information about the climate and wind regime of the area

The Absheron Peninsula is the largest peninsula located on the western coast of the Caspian Sea. The semi-desert dry-steppe climate prevails on the peninsula. The average wind speed on the Absheron Peninsula is 5.8-7 m/s. The number of days with strong winds (over 15 m/s) in different points of the peninsula is up to 64-145 days. Winds over 30 m/s are often observed. North winds (strong winds), winds blowing from the northeast and south directions prevail. In general, the influence of meridional atmospheric processes is characteristic of the Absheron-Gobustan region. This is explained by the influence of the Kara, Scandinavian, Azores maxima, and high-pressure areas formed in the south of the European part of Russia. As a result of the influence of these processes, the weather changes sharply, strong northerly winds blow, the air temperature drops, and precipitation is often observed. During the cold period of the year, the influence of Central Asian and subtropical anticyclones increases (Mammadov, 2014).

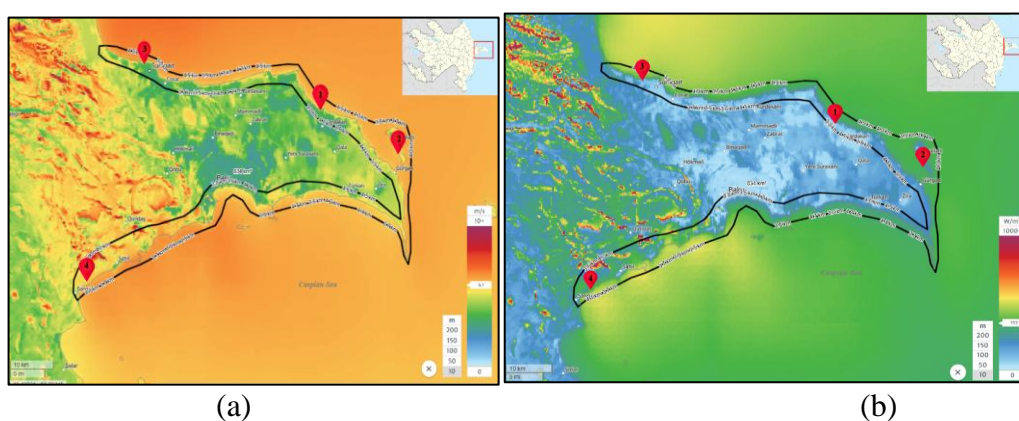


Figure 1. Wind speed and power distribution at height of 10 m

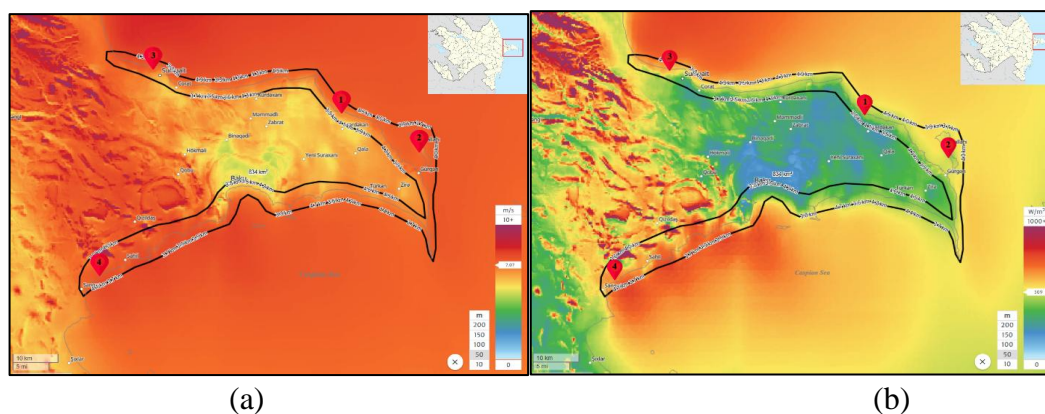


Figure 2. Wind speed and power distribution at the height 50 m

Figure 1 shows the distribution of wind speed (a) and wind power (b) at a height of 10 m and Figure 2 at a height of 50 m on the Absheron Peninsula. At a height of 10 m, wind speed is mainly high in the western and southwestern areas of the peninsula, and relatively weak inland. Accordingly, wind power is also more limited and local in nature; large-scale potential areas are limited (Figure 1). At a height of 50 m, a general increase in wind speed is observed, and this increase is especially noticeable in areas in the coastal zone. Wind power has also increased significantly, and areas with 500–600 W/m<sup>2</sup> and higher have expanded (Figure 2). As the height increases, both wind speed and power increase significantly. This also indicates that wind turbines installed at heights of 50 m and above enable a more efficient assessment of the region's wind energy potential across different altitudes.

## 2. Materials and methods

The study analyzed the variation of wind speed and wind power depending on altitude on the Absheron Peninsula, located in the coastal zone of the Azerbaijani sector of the Caspian Sea. For this purpose, hourly wind data at heights of 10 m and 50 m with a resolution of  $0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$  were obtained from the NASA (NASA,2025) space database. These satellite data, collected and archived for four stations included in the study area, cover the years 2001–2024. Based on the obtained data, statistical indicators of wind speed and power at different time intervals (annual, seasonal, and monthly) for both altitudes were calculated, and the results were visualized in the form of graphs. In addition, wind speed and power maps of the study area were prepared using the ArcGIS software based on the data obtained from the Global Wind Atlas (GWA,2025), and wind rose graphs were drawn up for each station in the Grapher program. Based on the obtained results, comparative analyses were conducted at different altitudes.

## 3. Results and discussion

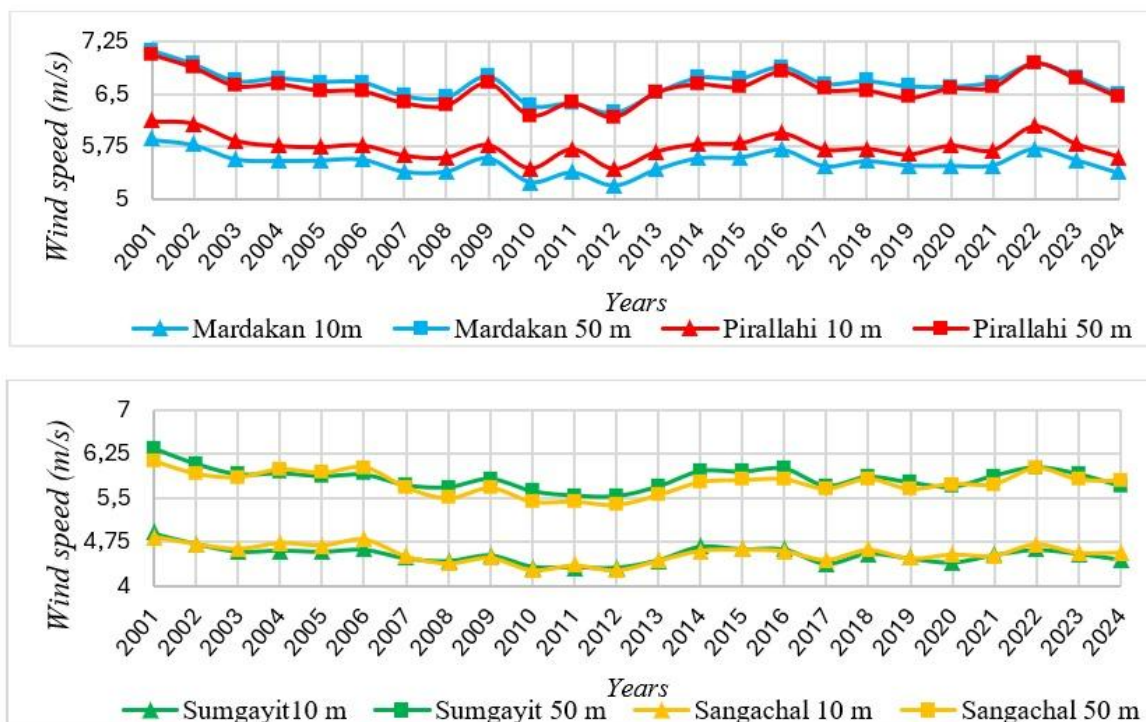
### 3.1. Variation of wind speed and direction depending on height

Wind speed and direction are key parameters of the movement of air masses in the atmosphere and play an important role in assessing wind energy potential. Wind speed is usually measured in meters per second (m/s) and can vary at different altitudes, while wind direction is determined based on geographical directions. According to the International Energy Agency (IEA, 2013), the consistency of wind direction and statistical distribution of speed are considered key indicators in optimizing wind energy projects (Archer et al., 2005).

Observations show that the wind increases in strength with increasing height above the ground. This is called the Velocity or Height Effect. Near the ground surface, the flow encounters surface roughness that impedes the flow to reduce the wind speed and present a variety of wind patterns with random vertical and horizontal velocity components at right angles to the main direction of the flow. The slowing or retarding effect occurs in the air layers near the ground and gradually decreases with increasing height until it becomes negligible. Also, there are no obstacles at high altitudes. Thus, the wind speed increases with increasing height above the ground (Aiyer, 2021).

**Table 1.** Average multi-year wind speed, force, and standard deviation at selected points at 10 and 50 meters altitude

№	Coordinate (Lat/Lon) N / E	Average wind speed, V (m/s)		Standard deviation, $\sigma_v$ (m/s)		Wind Power, P W/m <sup>2</sup>		Wind Power Classifications	
		10m	50m	10m	50m	10m	50m	10m	50m
1	40.52 / 50.13 - Mardakan	5.5	6.65	2.94	3.93	196	347	Poor	Moderate
2	40.43 / 50.37 - Pirallahi	5.75	6.58	2.95	3.67	224	336	Marginal	Moderate
3	40.64 / 49.54 - Sumgayit	4.52	5.84	2.6	3.13	109	235	Poor	Marginal
4	40.24 / 49.51 - Sangachal	4.55	5.76	2.41	2.86	111	226	Poor	Marginal



**Figure 3.** Time-varying average annual wind speed at 10 and 50 meters height at the study points during 2001-2024

Figure 3 shows the change in wind speed at 10 and 50 meters altitudes over a multi-year period at the survey points. Thus, the maximum values were observed at 50 meters altitude in Mardakan and Pirallahi, respectively, as 7.12 and 7.06 m/sec. At 10 meters altitude, these values were recorded as 6.12 and 5.86 m/sec. At Sumgayit and Sangachal stations, the maximum wind speed at 50 meters altitude was 6.34 and 6.13 m/sec, respectively. At 10 meters altitude, the indicators decreased to 4.89 and 4.83 m/sec. Although a certain downward trend in wind speeds was observed over time, local increases were recorded in some years. In general, an increase in wind speed was observed at higher altitudes, highlighting the wind energy potential of these areas.

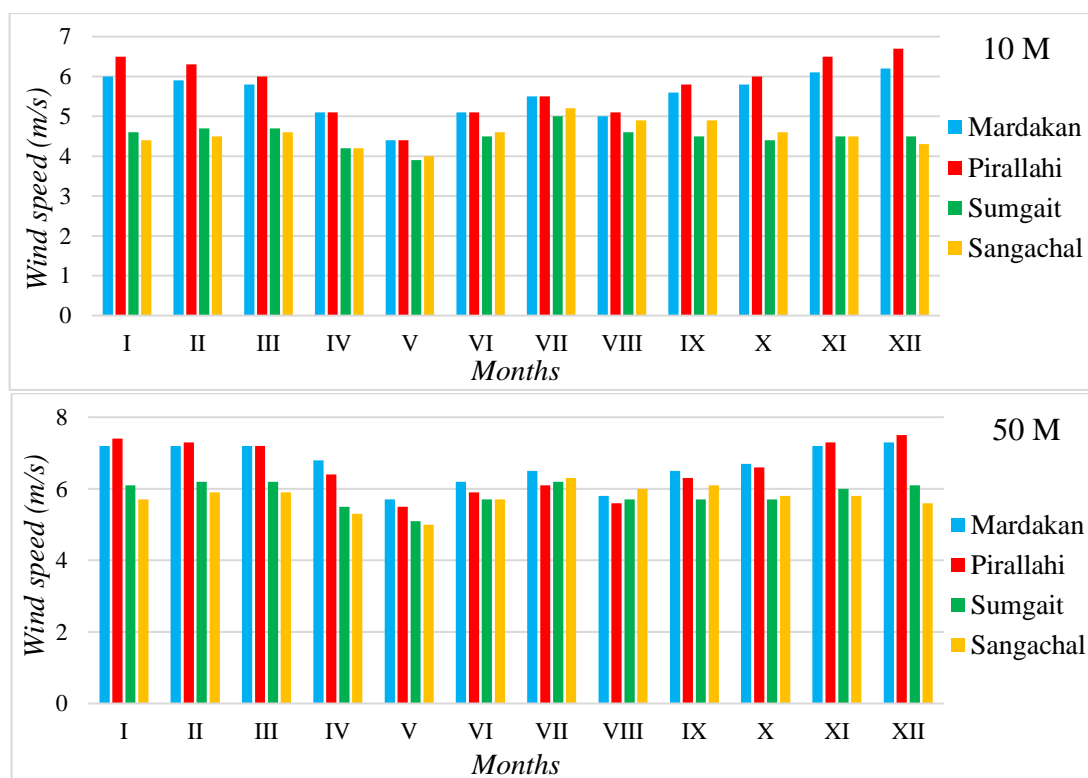
**Table 2.** Variation of average monthly wind speed with height at selected points

№	Coordinate (Lat/Lon) N / E	Height (m)	Months											
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
			Multi-year average monthly wind speed (m/s)											
1	40.52/50.13 Mardakan	10	6	5.9	5.8	5.1	4.4	5.1	5.5	5.0	5.6	5.8	6.1	6.2
		50	7.2	7.2	7.2	6.8	5.7	6.2	6.5	5.8	6.5	6.7	7.2	7.3
2	40.43/50.37 Pirallahi	10	6.5	6.3	6	5.1	4.4	5.1	5.5	5.1	5.8	6	6.5	6.7
		50	7.4	7.3	7.2	6.4	5.5	5.9	6.1	5.6	6.3	6.6	7.3	7.5
3	40.64/49.54 Sumgayit	10	4.6	4.7	4.7	4.2	3.9	4.5	5	4.6	4.5	4.4	4.5	4.5
		50	6.1	6.2	6.2	5.5	5.1	5.7	6.2	5.7	5.7	5.7	6	6.1
4		10	4.4	4.5	4.6	4.2	4	4.6	5.2	4.9	4.9	4.6	4.5	4.3

	40.24/49.51 Sangachal	<b>50</b>	5.7	5.9	5.9	5.3	5	5.7	6.3	6	6.1	5.8	5.8	5.6
--	--------------------------	-----------	-----	-----	-----	-----	---	-----	-----	---	-----	-----	-----	-----

Figure 4, prepared based on Table 2, shows the monthly average wind speeds at 10 m and 50 m altitudes for 4 locations (Mardakan, Pirallahi, Sumgayit, Sangachal) based on multi-year averages. As can be seen, at 10 m altitude in Mardakan and Pirallahi, the highest values are reached in I, II, III, XI, and XII months. In June, July and August, the wind speed decreases to a minimum. In Sangachal and Sumgayit, the highest wind speed is in July, and the lowest speed is in May.

At 50 m altitude, the wind speed for all months is higher than at 10 m. The highest speeds are observed in the winter months, especially in December and January - rising to 7.5 m/s (in Mardakan and Pirallahi). In Sumgayit and Sangachal, the maximum wind speed at 50 m is observed in July, with 6.2 and 6.3 m/s.



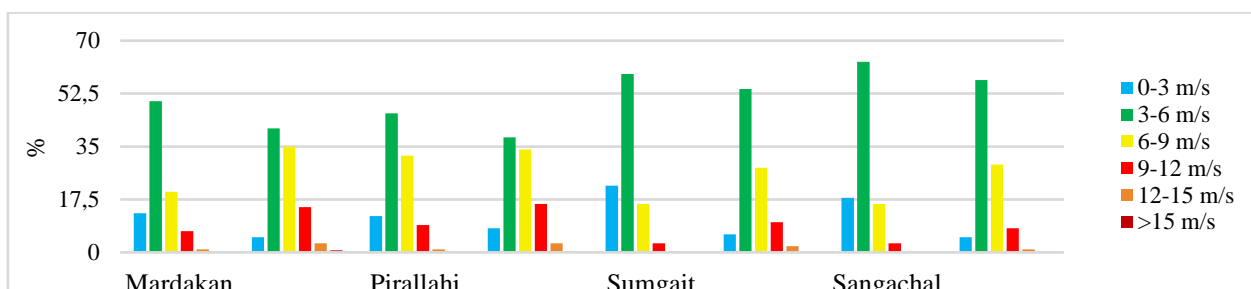
**Figure 4.** Multi-year average monthly wind speed at 10 and 50 meters height

Table 3 shows that at a height of 10 meters, winds with a speed of 0-6 m/s dominate at all locations. However, at a height of 50 meters, the opposite process occurs, and wind speeds above 6 m/s are observed more often than at a height of 10 meters. This trend confirms that wind speed increases with increasing height. Thus, at a height of 50 m, more favorable conditions are formed in terms of wind energy production.

**Table 3.** Percentages of the total number of windy days by year

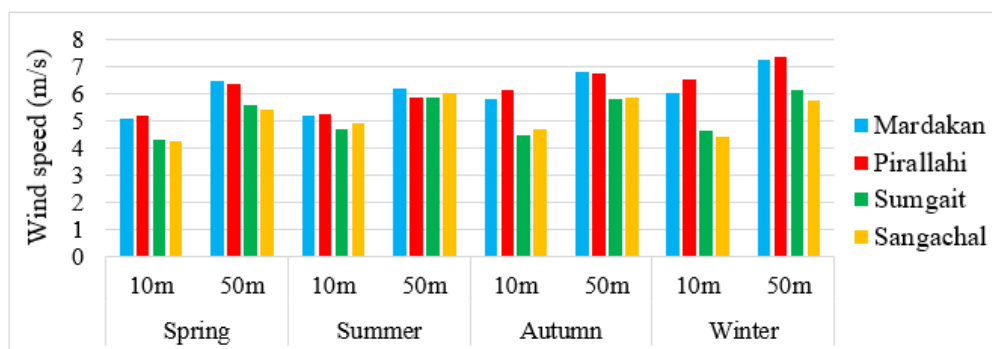
Wind speed gradations (m/s)	Percentage of windy days (%)							
	Mardakan		Pirallahi		Sumgayit		Sangachal	
	10m	50m	10m	50m	10m	50m	10m	50m

0-3	13	5	12	8	22	6	18	5
3-6	50	41	46	38	59	54	63	57
6-9	20	35	32	34	16	28	16	29
9-12	7	15	9	16	3	10	3	8
12-15	0.98	3	1	3	0.3	2	0.2	1
>15	0.13	0.7	0.02	0.38	0	0	0	0.1



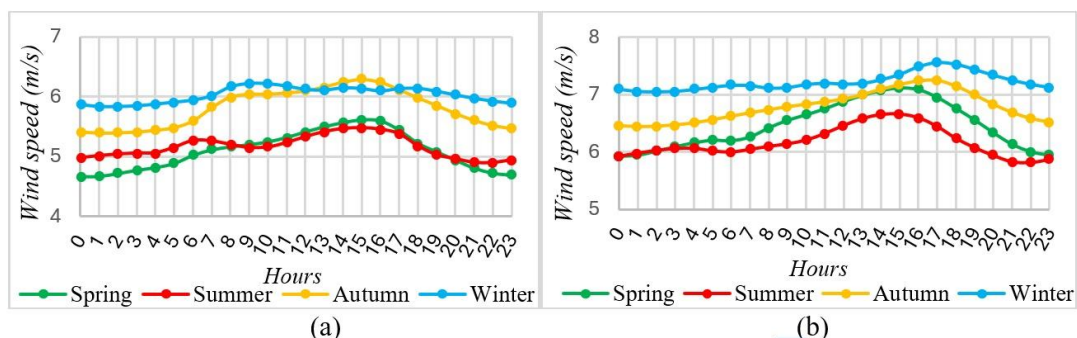
**Figure 5.** Distribution of wind speed recurrence frequency at the survey points at 10 and 50 meters height

According to the frequency of windy days in the studied areas, the speed interval of 3–6 m/s prevails at all altitudes. In Mardakan and Pirallahi, especially at an altitude of 50 m, the share of winds in the range of 6–12 m/s is significantly higher, which is significant in terms of wind energy. Speeds above 12 m/s were observed mainly at 50 m in Mardakan. In Sumgayit and Sangachal, more low-speed winds were recorded, and the energy potential in these regions can be assessed relatively poorly (Figure 5).

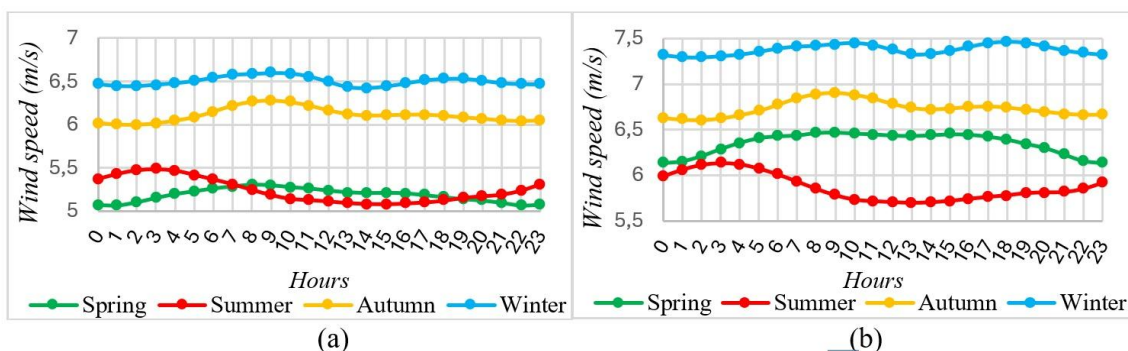


**Figure 6.** Seasonal variation of wind speed at 10 and 50 m height at the study points

The maximum values of wind speed at a height of 50 meters in Mardakan, Pirallahi and Sumgayit are observed in winter and in Sangachal in summer. At a height of 10 meters, these values are observed in Mardakan and Pirallahi in winter and in Sangachal and Sumgayit in summer (Figure 6).



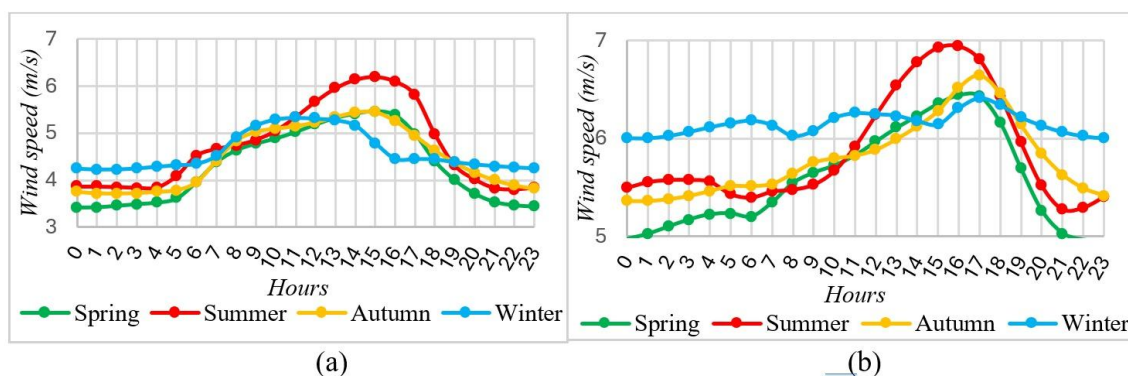
**Figure 7 .** Diurnal seasonal variation of wind speed at 10 (a) and 50 meters (b) altitude in Mardakan



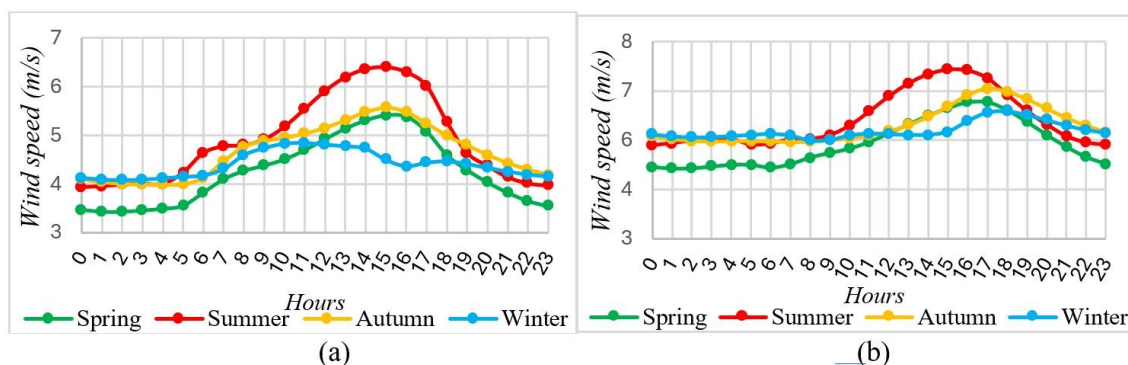
**Figure 8.** Diurnal seasonal variation of wind speed at 10 (a) and 50 meters (b) altitude in Pirallahi

At a height of 10 meters, although the wind speed in Mardakan remains stable throughout the day in winter and autumn, a certain increase is observed in the afternoon hours (12:00–16:00) in spring and summer. At a height of 50 meters, the wind speed increases during the daytime hours (10:00–15:00) in other seasons, except for winter (Figure 7a, 7b).

Analysis of data obtained at Pirallahi at altitudes of 10 and 50 meters shows that, unlike other locations, the diurnal variation is very weak here, there is stability. Pirallahi peninsula is located on the coastline extending directly into the Caspian Sea and is in full contact with the sea. In areas close to the sea, the diurnal temperature variation is weak, which prevents the formation of thermal convective flows during the day. While the temperature difference between the surface and the atmosphere (thermal contrast) varies strongly during the day over the land, this variation is minimal over the sea. As a result, local wind systems originating from the surface of the earth (for example, daytime breeze flows) develop poorly in coastal and island-type areas. For this reason, diurnal variability is not observed (Figure 8a, 8b).



**Figure 9.** Diurnal seasonal variation of wind speed at heights of 10 (a) and 50 meters (b) in Sumgayit



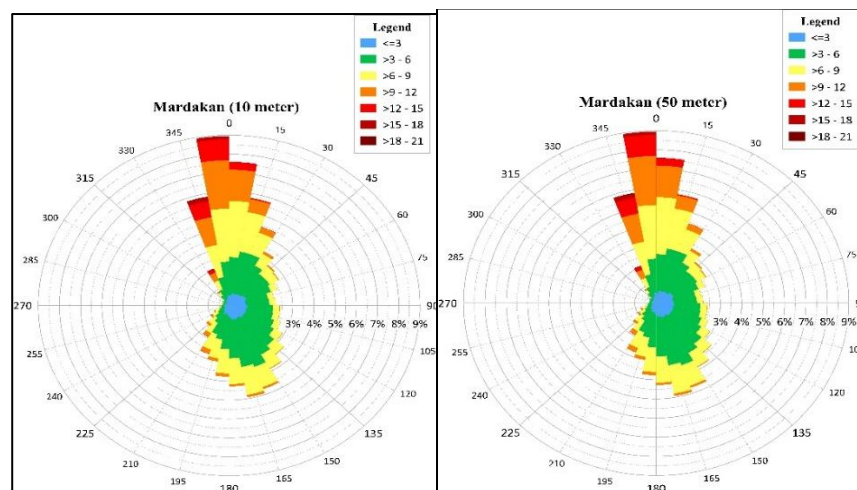
**Figure 10.** Diurnal seasonal variation of wind speed at 10 (a) and 50 (b) meters in Sangachal

In Sumgayit, in the summer (especially between 12:00 and 17:00), the wind speed increases significantly (6-7 m/s), while in other seasons it varies between 3.5–5 m/s. Although the wind is strong at night in winter, it decreases in the afternoon. In summer, on the contrary, it is weak in the morning and reaches its peak in the afternoon (Figure 9a, 9b).

In Sangachal, at both altitudes, in spring, summer and autumn, the wind is weak in the morning and reaches its maximum in the afternoon. This process is observed until 17:00 in the evening. Then the wind speed begins to decrease. In winter, the wind speed is almost constant throughout the day and is higher in the evening (Figure 10a, 10b).

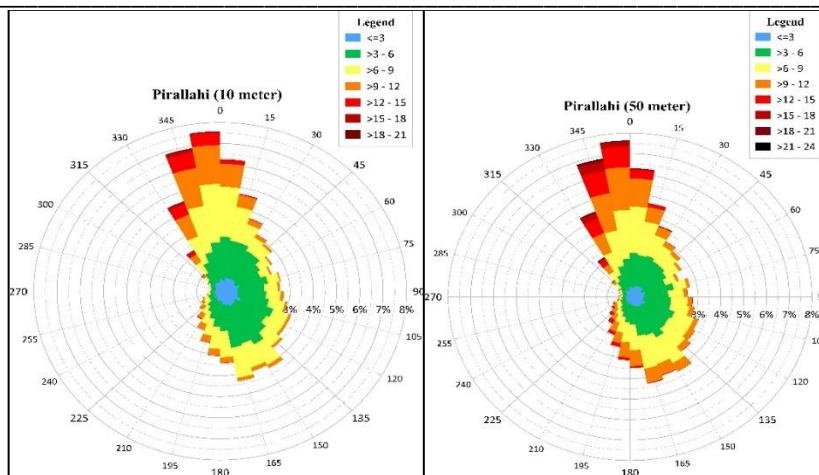
As the altitude increases, the effect of the earth's surface (friction) decreases, as a result of which air currents move faster. This is especially noticeable in dry and open areas (Sumgayit, Sangachal). On the coasts (Mardakan, Pirallahi), the increase in altitude is not as effective because the wind is stable even in the lower layers.

Proper knowledge of wind direction is also essential to harness the maximum possible wind energy. This can also help to install the wind turbine in the best position (Hulio, 2021).



**Figure 11.** Wind rose graph at heights of 10 and 50 meters in Mardakan

Wind rose diagrams constructed at heights of 10 m and 50 m in the Mardakan area show that the main wind direction is dominant in the northern and northwestern sectors. The increase in wind speed at a height of 50 m and the increased probability of recurrence of winds with a speed of  $\geq 15$  m/s indicate that there is a favorable potential for wind energy exploitation in this area. The relatively stable wind direction can ensure the continuity of energy production (Figure 11).

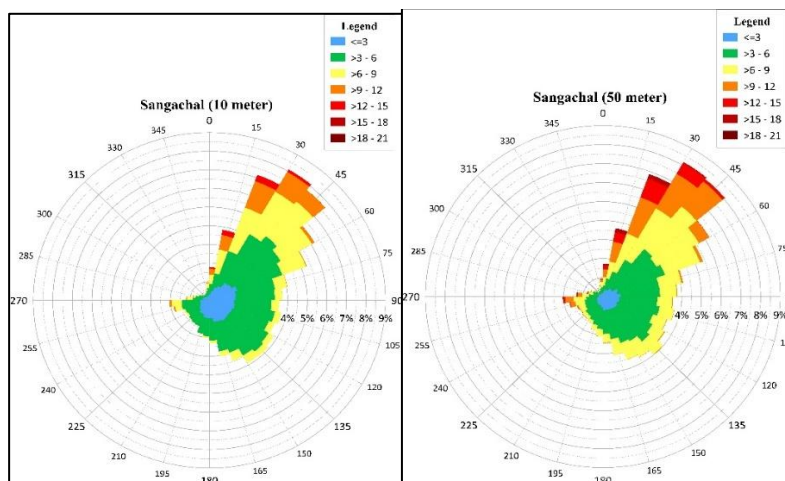


**Figure 12.** Wind rose graph at heights of 10 and 50 meters in Pirallahi

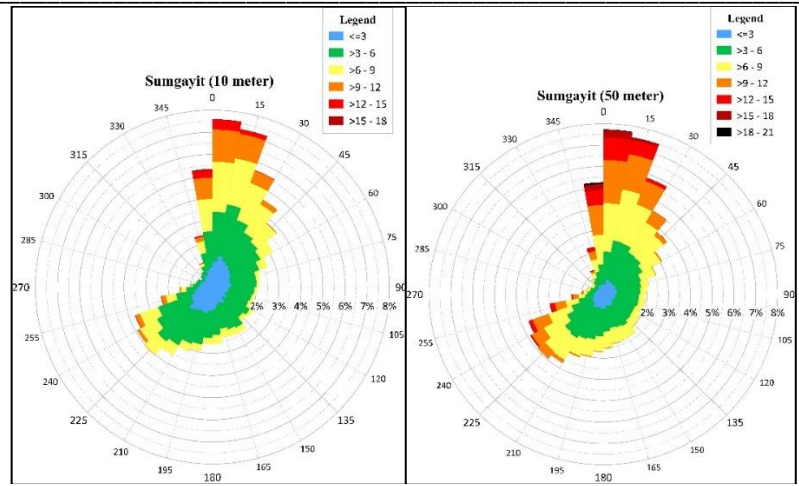
The wind rose graphs at Pirallahi similarly show a predominance of wind in the north and northwest directions. The fact that high-speed winds (>15 m/s) cover a wider sector, especially at an altitude of 50 m, confirms the high wind energy potential here. The high repetition frequency and stable direction compared to lower altitudes are important indicators for planning wind power plants (Figure 12).

At 10 meters above sea level, winds in Sangachal are predominantly northeasterly, with the main share of speeds varying between 3–9 m/s. Strong winds (above 12 m/s) are relatively rare. As the altitude increases to 50 meters, the dominant wind direction remains constant, but the share of speeds above 12 m/s increases significantly (Figure 13).

In Sumgayit, the main wind direction is northeasterly, with the wind mainly varying between 3–9 m/s, and high speeds are rare. At 50 meters above sea level, the wind intensifies, and the share of high speeds increases (Figure 14).



**Figure 13.** Wind rose graph at heights of 10 and 50 meters in Sangachal



**Figure 14.** Wind rose graph at heights of 10 and 50 meters in Sumgayit

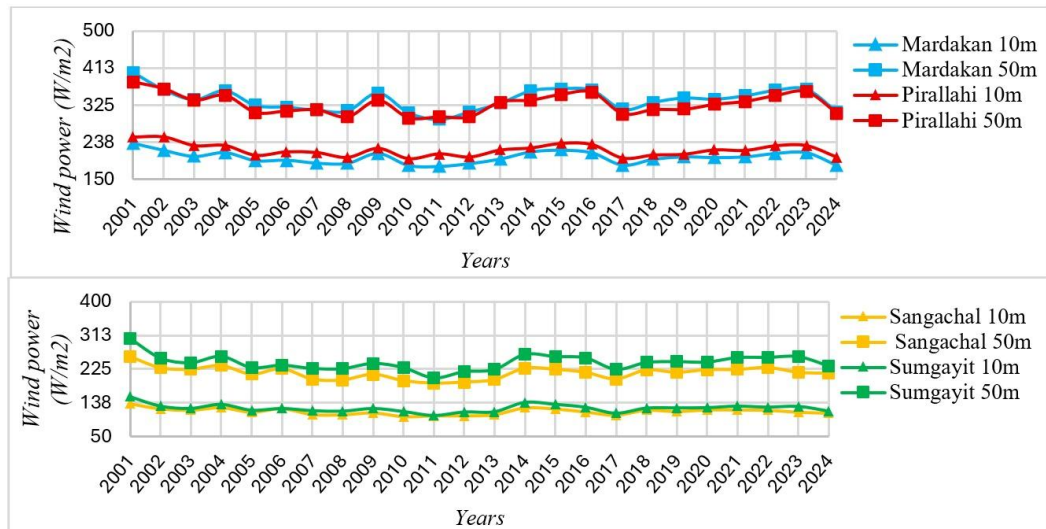
3.2. Variation of wind power depending on height

One of the most important factors for assessing the wind energy potential in an area is calculating the wind power ( $W/m^2$ ) (Fagiano L et al., 2021). Wind power  $P$  is the energy obtained from the kinetic energy of air currents. It is proportional to the cube of the wind speed  $v$  and is calculated by the formula (Manwell et al., 2009):

$$P = \frac{\rho}{2} \bar{v}^3 \tag{1}$$

Here,  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  is the air density (Gardashov et al., 2024; Rasulzadeh, 2025).

Wind power is one of the main indicators of wind energy potential and is considered a key parameter in the initial assessment of the available opportunities for electricity generation in a given area (Sathyajith, 2007).



**Figure 15.** Time-varying average annual wind power at 10 and 50 meters height at the study points during 2001-2024

Figure 15 shows the change in wind power at selected points over the years. As can be seen, the maximum values were observed at Mardakan and Pirallahi at a height of 50 meters,

respectively, at 402 and 380 W/m<sup>2</sup>. At a height of 10 meters in these points, these values were recorded as 235 and 250 W/m<sup>2</sup>. At the Sumgayit and Sangachal points, the maximum wind power at a height of 50 meters was 304 and 2.58 W/m<sup>2</sup>, respectively. At a height of 10 m, the indicators decreased to 152 and 135 W/m<sup>2</sup>.

Figure 16 shows the average monthly wind speed at 10 m and 50 m altitudes based on multi-year averages. As can be seen, at 10 m altitude, the indicators in Mardakan and Pirallahi are higher than at other stations, and the values in I, II, III, XI, and XII months are higher. In May and August, the wind speed decreases to a minimum. In Sangachal and Sumgayit, the maximum wind speed is low throughout the year. At 50 m altitude, the highest wind speed values are observed in November-March. In Sangachal, however, this is an exception and the predominance is recorded in July.

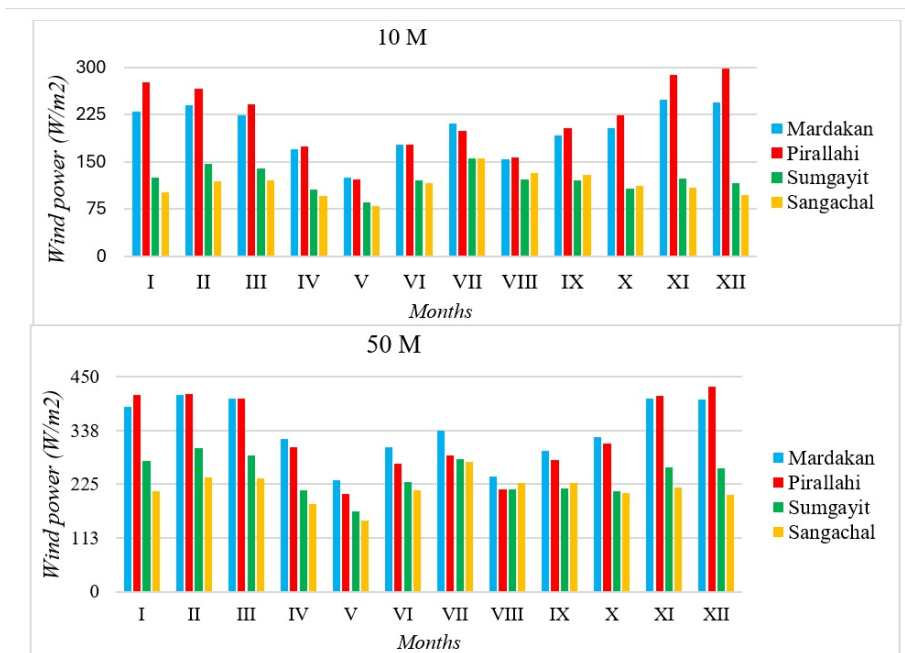


Figure 16. Multi-year average monthly wind power at 10 and 50 meters height

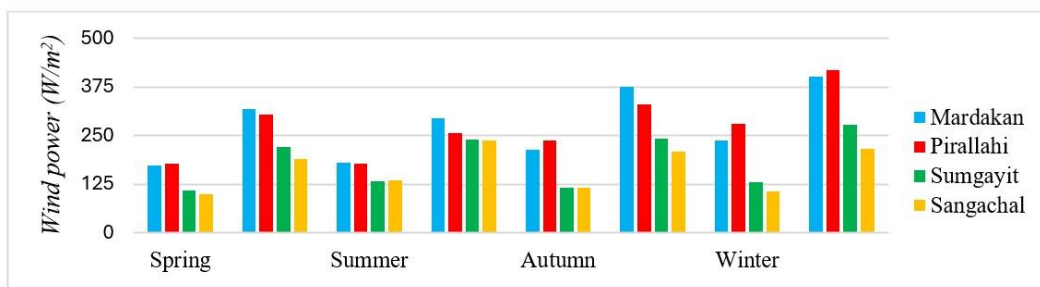


Figure 17. Seasonal variation of wind power at 10 and 50 m height at the study points

Analysis of wind speed indicators by season shows that at a height of 50 meters, the maximum wind speed is observed in the winter season in all 3 locations except Sangachal. The minimum indicators coincide with the spring-summer season. This situation is also evident at a height of 10 meters (Figure 17).

**Table 4.** Percentage distribution of wind strength gradations at heights of 10 and 50 meters (%)

Wind power gradations (W/m <sup>2</sup> )	Mardakan		Pirallahi		Sumgait		Sangachal	
	10M	50M	10M	50M	10M	50M	10M	50M
<b>0-300</b>	79.4	64.2	76.1	63.8	89.6	75.6	90.8	79.2
<b>300-600</b>	13.5	19.5	16.1	19.9	7.8	14.5	7.1	12.7
<b>600-900</b>	4.4	8.2	5.0	8.4	1.8	5.6	1.6	4.8
<b>900-1200</b>	1.6	3.6	1.7	3.9	0.5	2.2	0.4	1.8
<b>1200-1500</b>	0.6	2.1	0.7	2.0	0.1	1.0	0.1	0.9
<b>1500-1800</b>	0.3	0.9	0.3	0.8	0.1	0.4	0	0.3
<b>1800-2100</b>	0.2	0.5	0.1	0.5	0	0.3	0	0.1
<b>2100-2400</b>	0	0.4	0	0.2	0	0.1	0	0.1
<b>2400-2700</b>	0.1	0.2	0	0.2	0	0.1	0	0
<b>2700-3000</b>	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0
<b>&gt;3000</b>	0	0.2	0	0.1	0	0	0	0

Table 4 presents percentage indicators for wind power gradations. As can be seen, in all stations, only in the interval of 0-300 W/m<sup>2</sup>, the advantage falls on the height of 10 meters. In other cases, the advantage is at a height of 50 meters. This power range is observed at a height of 10 meters, in Sangachal. Based on the wind power gradations, it is clear that in all stations, a higher energy density is observed at a height of 50 meters than at 10 meters. This indicates that as the height increases, the potential for using wind energy increases and the optimal height for wind power plants may be 50 m or more.

### 3.3. Laws of wind change with height.

As we have seen, wind speed depends on altitude and varies with surface roughness; as altitude increases, wind speed also increases (Khaligh et al., 2010). In wind energy studies, two mathematical models or ‘laws’ have generally been used to model the vertical profile of wind speed over regions of homogenous, flat terrain (e.g., fields, deserts, and prairies). The first approach, the log law, has its origins in boundary layer flow in fluid mechanics and in atmospheric research. It is based on a combination of theoretical and empirical research. The second approach, used by many wind energy researchers, is the power law. Both approaches are subject to uncertainty caused by the variable, complex nature of turbulent flows (Hiester et al., 1981). Wind energy engineers typically model wind shear using one of two mathematical models, a logarithmic profile or a power law profile (Manwell et al., 2009).

### 3.4. Logarithmic law

The logarithmic profile law states that wind speed is proportional to the logarithm of height above ground (Hsu, 1982). Thus, the following equation expresses the ratio of wind speed at the center height to wind speed at the anemometer height:

$$\frac{U_{hub}}{U_{anem}} = \frac{\ln(Z_{hub}/Z_0)}{\ln(Z_{anem}/Z_0)} \tag{2}$$

Here,  $U_{hub}$  – is the wind speed at the central height of the wind turbine (m/s),  $U_{anem}$  – is the wind speed at the anemometer height (m/s),  $Z_{hub}$  is the central height of the wind turbine (m),  $Z_{anem}$  is the height of the anemometer (m),  $Z_0$  – is the length of the surface roughness (m) (Tieo et al., 2020).

Surface roughness length is a parameter that characterizes the roughness of the surrounding terrain. Ground-level obstacles such as vegetation, buildings, and topographic features slow down the wind speed near the surface (Garrett, 2015). Since the effect of these obstacles decreases with height above the ground, wind speed tends to increase with height above the ground. This change in wind speed with height is called wind shear. Table 5 provides approximate surface roughness lengths for various terrain types (Ongaki et al., 2019).

(Irwin, 1979) reported that during unstable conditions,  $\alpha$  is only a weak function of stability and instead is strongly dependent on surface roughness. This is in accordance with the findings from this study, where it was discussed that open water likely coincide with unstable atmospheric conditions, and hence the surface roughness is the main factor determining the vertical structure of the profiles.

**Table 5.** Values (approximate) of surface roughness length for various types of terrain

Terrain Description	$Z_0$	Terrain Description	$Z_0$
Very smooth, ice or mud	0.00001 m	Crops	0.05 m
Calm open sea	0.0002 m	Few trees	0.10 m
Blown sea	0.0005 m	Many trees, few buildings	0.25 m
Snow surface	0.003 m	Forest and woodlands	0.5 m
Lawn grass	0.008 m	Suburbs	1.5 m
Rough pasture	0.010 m	City center, tall buildings	3.0 m
Fallow field	0.03 m		

### 3.5. Power Law

The power law represents a simple model for the vertical wind speed profile. Its basic form is:

$$\frac{U_{hub}}{U_{anem}} = \left( \frac{Z_{hub}}{Z_{anem}} \right)^\alpha \tag{3}$$

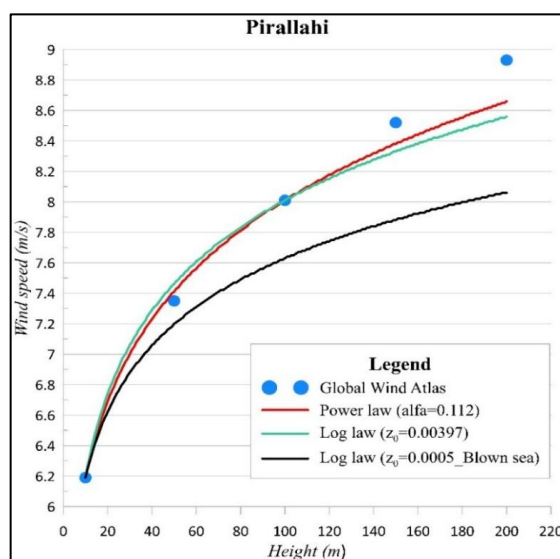
here,  $U_{hub}$  – wind speed at the central height of the wind turbine (m/s),  $U_{anem}$  – wind speed at the anemometer height (m/s),  $Z_{hub}$  – central height of the wind turbine (m),  $Z_{anem}$  – height of the anemometer (m),  $\alpha$  – power law quantity.

The power law is most often applied to extrapolate near-surface wind speed to the wind turbine hub height. Due to variations of the meteorological conditions, the power law exponent varies over time (Jung et al., 2021). The power law exponent is a dimensionless parameter. Fundamental studies in fluid mechanics have shown that its value is equal to 1/7 for turbulent flow over a flat plate. Wind speed researchers have found that in practice, the power law exponent depends on the roughness of the terrain, atmospheric stability, and a number of other factors (HOMER Energy, 2025).

Figure 18 shows the variation of wind speed (m/s) with altitude (m) for the Pirallahi area. The graph compares three different theoretical approaches (Power Law and two different Logarithmic Laws) with Global Wind Atlas (GWA) data. Satellite data from GWA (blue dots) show wind speeds at altitudes from 10 m to 200 m. The increase in the number of blue dots as the altitude increases clearly shows the increase in wind speed with altitude.

Power law (red line,  $\alpha = 0.112$ ): This empirical method predicts wind speed with a simple power function. As we can see, the red line is close to the GWA data and represents the increase in speed with increasing altitude well.

Logarithmic law— $z_0 = 0.00397$ . This is the roughness coefficient of the surface and is based on local conditions and is more consistent with the GWA data.  $z_0 = 0.0005$  (the “Blown sea” surface) – this is the standard logarithmic curve for a smoothed surface over the sea. As can be seen, this line does not coincide with real observations and underestimates the wind speed.



**Figure 18.** Analysis of the variation of wind speed in Pirallahi with height using Power and Logarithmic Laws (The graph was created by the author using Grapher software)

Both the Power Law and the Logarithmic Law ( $z_0 = 0.00397$ ) fit the GWA data well. These indicators confirm that the area under consideration has a high wind energy potential and that it is more favorable to place turbines at heights above 50 m. Also, these results show how important the correct choice of model is in the assessment of wind energy.

#### 4. Conclusion

The conducted analyses showed that the wind speed in the coastal zone of the Absheron Peninsula tends to increase with altitude, and this increase is more noticeable in some areas. In particular, the speeds recorded at a height of 50 meters are higher than at a level of 10 meters, indicating the potential opportunities in terms of wind energy. These results provide important scientific foundations for planning renewable energy projects in selected points of Absheron. At the same time, such analyses create conditions for making technologically and spatially correct decisions for the transition to sustainable energy systems.

**5. Supplementary Materials:** no supplementary materials.

#### 6. Author Contributions

The author carried out all work related to obtaining data and preparing the article himself.

## 7. Author Information

Rasulzadeh, Vusala - Ph.D. student, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Institute of Geography PLE, Baku, Azerbaijan; [resulzade323@gmail.com](mailto:resulzade323@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0575-6101>

**8. Funding:** none.

**9. Acknowledgements:** none.

**10. Conflicts of Interest:** the author declares no conflicts of interest.

## 11. References

1. Aiyer, P. (2021). Wind speed change with height in built environment. *International Journal of Engineering Research*, 8 (1).
2. Archer, C. L., & Jacobson, M. Z. (2005). Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110 (D12). <https://doi.org/10.1029/2004JD005462>
3. Fagiano, L., Milanese, M., Razza, V., & Bonansone, M. (2012). High-altitude wind energy for sustainable marine transportation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(2), 781-791. <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2180715>
4. Gardashov, E. R., & Gardashov, R. H. (2024). On the derivation of an analytical expression for wind power probability distribution function and capacity factor of turbine. *International Journal of Sustainable Energy*, 43(1). <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2390447>
5. Garrett, R. (2015). Investigations of surface roughness length modification in Black Rock City, NV [Master Thesis, San Francisco State University].
6. Global Wind Atlas. (2025). Global wind atlas. URL: <https://globalwindatlas.info/en/>
7. Hiester, T., & Pennell, W. (1981). The Meteorological aspects of siting large wind turbines, *Pacific Northwest Laboratory*.
8. HOMER Energy. (2025). Wind resource variation with height. HOMER pro documentation. [https://homerenergy.com/products/pro/docs/3.15/wind\\_resource\\_variation\\_with\\_height.html](https://homerenergy.com/products/pro/docs/3.15/wind_resource_variation_with_height.html)
9. Hudio, Z. H. (2021). Assessment of wind characteristics and wind power potential of Gharo, Pakistan. *Hindawi Journal of Renewable Energy*, 8960190. <https://doi.org/10.1155/2021/8960190>
10. Hsu, S. (1982). Determination of the power-law wind profile exponent on a tropical coast. *Journal of Applied Meteorology*, 21, 1187-1190. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1982\)021<1187:DOTPLW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1982)021<1187:DOTPLW>2.0.CO;2)
11. International Energy Agency. (2023). Wind energy technology perspectives 2023. <https://www.iea.org/reports/wind-energy-technology-perspectives-2023>
12. International Energy Agency (2013). Wind energy - technology roadmap. <https://www.iea.org/publications>
13. Irwin, J. S. (1979). A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability. *Atmospheric Environment*, 13, 191-194.
14. Jung, C., & Schindler, D. (2021). The role of the power law exponent in wind energy assessment: A global analysis. *International Journal of Energy Resources*, 45 (6), 8484-8496. <https://doi.org/10.1002/er.6382>
15. Khaligh, A., & Onar, O.C. (2010). Energy harvesting. Boca Raton.
16. Kubik, M, Coker, P., & Hunt, C. (2011). Using meteorological wind data to estimate turbine generation output: a sensitivity analysis. *World Renewable Energy Congress*, 4074-4081. <http://dx.doi.org/10.3384/ecp110574074>
17. Manwell, J., MCGowan, J., & Rogers, A. (2009). Wind energy explained.

18. Mammadov, R. M. (2014). Geography of the Republic of Azerbaijan: physical geography (Volume 1). Avrupa. [in Azerbaijani]
19. NASA Prediction of worldwide energy resources. (2025). <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
20. Ongaki, L., Maghanga, C., & Joash, K. (2019). Determination of the surface roughness parameter and wind shear exponent of Kisii Region from the on-site measurement of wind profiles. *Journal of Energy*, 8264061. <https://doi.org/10.1155/2019/8264061>
21. Pryor, S., & Bartelmie, C. (2010). Climate change impacts on wind energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 430–437.
22. Rasulzadeh, V. M. (2025). Assessment of the wind and wave energy potential in the water area of the Caspian Sea. *Вісник Харківського Національного Університету Імені В.Н. Каразіна Серія Геологія. Географія. Екологія*, 62, 315-323. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-62-23>
23. Sathyajith, M. (2007). Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics. Springer, 24 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-30906-3>
24. Tar, K., & Szegedi, S. (2009). Alterations of potential wind energy with height and parts of the day. *Journal of Electrical and Electronics Engineering* 2(1), 206-210
25. Tiew, J., Skote M., & Srikanth N. (2020). Suitability of power-law extrapolation for wind speed estimation on a tropical island. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 205, 104317. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104317>

## **Апшерон түбегінің жағалау аймағындағы биіктікке байланысты жел жылдамдығы мен қуатының өзгеруі**

**Вусала Расулзаде**

**Аңдатпа.** Мақалада 2001–2024 жылдар аралығында Әзірбайжандағы жел энергиясын өндіру тұрғысынан өте перспективалы болып табылатын Апшерон түбегінің жағалау аймағында орналасқан төрт негізгі нүктеде – Пираллахи, Мардакан, Сумгайт және Сангапальда – жел жылдамдығының биіктікке байланысты өзгеруі егжей-тегжейлі талданады. Зерттеу аясында әр нүкте үшін жел жылдамдығының статистикалық сипаттамалары және 10 және 50 метр биіктіктегі жел қуатының өзгеру динамикасы зерттелді. Жел жылдамдығы мен қуатының жылдар, айлар және маусымдар бойынша өзгеруін көрсететін графиктер құрылды және ұзақ мерзімді үрдістер бағаланды. Сонымен қатар, таңдалған нүктелерде күндізгі жел жылдамдығының өзгеруіне ерекше назар аударылды. Талдау нәтижесінде жағалау аймақтарындағы жел режимі маусымдық және тәуліктік ырғақтар бойынша әртүрлі екені және бұл сипаттамалар желді жаңартылатын энергия көзі ретінде пайдалану мүмкіндіктеріне тікелей әсер ететіні анықталды. Зерттеу соңында жел жылдамдығының биіктікке тәуелді өзгеруін ескеру үшін екі маңызды теориялық модель – қуат заңы және логарифмдік заң – қолданылды және олардың артықшылықтары мен жарамдылығы салыстырмалы түрде бағаланды.

**Түйін сөздер:** жел жылдамдығы; жел энергиясы; жел энергиясы; логарифм заңы; қуат заңы

## **Изменение скорости и направления ветра с высотой в прибрежной зоне Апшеронского полуострова**

**Вусала Расулзаде**

**Аннотация.** В статье подробно анализируется изменение скорости ветра с высотой в четырех основных точках прибрежной зоны Апшеронского полуострова, представляющих наибольший потенциал для ветроэнергетики в Азербайджане – Пираллахи, Мардакан, Сумгаит и Сангачал – за период 2001–2024 годов. В рамках исследования были изучены статистические характеристики изменения скорости ветра и мощности ветра на высотах 10 и 50 метров для каждой точки. Построены графики, отражающие изменение скорости ветра и его мощности по годам, месяцам и сезонам, и оценены долгосрочные тенденции. Кроме того, особое внимание уделено изменениям скорости ветра в течение суток в выбранных точках. В результате анализа установлено, что ветровые режимы в прибрежных зонах различаются как по сезонным, так и по суточным ритмам, что напрямую влияет на возможности использования ветра в качестве возобновляемого источника энергии. В конце исследования были применены две важные теоретические модели - степенной закон и логарифмический закон - для учета зависимости скорости ветра от высоты, и проведена сравнительная оценка их преимуществ и пригодности.

**Ключевые слова:** скорость ветра; энергия ветра; мощность ветра; логарифмический закон; степенной закон

# The possibilities of using satellite data to analyze the spectral features of woody vegetation

Igor Sedelnikov, Saltanat Ismagulova\*, Pavel Dmitriev

I. Manash Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan, [igor\\_sko\\_kz\\_94@mail.ru](mailto:igor_sko_kz_94@mail.ru), [smismagulova@mail.ru](mailto:smismagulova@mail.ru), [dmitriev\\_pavel@mail.ru](mailto:dmitriev_pavel@mail.ru)

\*Correspondence: [smismagulova@mail.ru](mailto:smismagulova@mail.ru)

**Abstract:** The article presents the results of a study of the possibilities of using satellite data to assess and monitor forest ecosystems, which is a key task in the context of sustainable management of natural resources. The research is aimed at developing a methodology for differentiating forest-forming rocks of the temperate zone based on the analysis of their seasonal spectral dynamics using modern Earth remote sensing technologies (Landsat 8-9) and a geoinformation systems tool (ArcGIS 10.8). The results of a study of the spectral characteristics of tree species based on an analysis of their reflectivity in various ranges of the electromagnetic spectrum in a temperate climate zone are presented. It has been established that the most contrasting spectral differences, which make it possible to reliably identify deciduous and coniferous tree species, are observed during certain phenological periods (spring and summer), which confirms the importance of taking into account the time factor when deciphering forests. The calculations carried out to establish boundaries and determine the area of forest areas affected by fire confirm the efficiency and effectiveness of using remote sensing methods and geoinformation technologies. The results and algorithm of actions of the conducted research are of practical importance for forestry in order to determine the species composition of forests, their inventory and monitoring, timely response to possible threats such as forest fires and logging, as well as assessment of their consequences.

**Цитирование:** Sedelnikov, I., Ismagulova, S., Dmitriev P. (2026). The possibilities of using satellite data to analyze the spectral features of woody vegetation. Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography Series, 154(1), 171-186.

<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-154-1-171-186>

Академический редактор:  
Н.Е. Рамазанова

Поступила: 13.02.2026

Исправлена: 04.03.2026

Принята: 17.03.2026

Опубликована: 31.03.2026



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

**Keywords:** remote sensing; satellite imagery; optical spectral analysis; channel combinations; forest resources; tree species; forest fires.

## 1. Introduction

Modern methods of remote sensing of the Earth (RS) are a key tool for obtaining objective data on the state of terrestrial ecosystems, including forests (Holzwarth et al., 2020; Gonets et al., 2025; Savin et al., 2022; McRoberts et al., 2010).

The use of multispectral satellite systems makes it possible to record the spectral response of vegetation in various ranges of the electromagnetic spectrum, thereby providing the opportunity to differentiate tree species, assess their physiological state, and identify trends in vegetation degradation or restoration (Faruque et al., 2022).

The development of satellite technologies, from early Landsat missions to modern Sentinel and KazEOSat systems, has significantly expanded the spectral and spatial monitoring capabilities of natural resources (Ahmed et al., 2018; Dostalova et al., 2016; Wulder et al., 2012).

Forest ecosystems, being the most important part of the biosphere, play an essential role in climate regulation, water protection and soil protection processes, provide biodiversity and perform a wide range of ecosystem functions (Zhumadina et al., 2022; Drüke et al., 2022; Acharya et al., 2019). Therefore, assessing the state of vegetation based on satellite data is an important area for detecting disturbances, such as the effects of fires, anthropogenic transformations or changes related to climatic stresses. Spectral index analysis, including NDVI and SAVI, is widely used to diagnose vegetation cover density, determine the degree of degradation, and assess the dynamics of forest land conditions over a long period (Mancino et al., 2014; Zhanguzhina et al., 2025; Ozgeldinova et al., 2024).

Research conducted in Kazakhstan demonstrates the increasing role of satellite monitoring in assessing the state of forest resources and other natural complexes (Bissenbayeva et al., 2024). According to a review of domestic works, the use of remote sensing technologies made it possible for the first time to perform large-scale mapping of the country's forests, identify areas of degradation, determine the boundaries and condition of plantings, and assess the consequences of forest fires and other disruptive factors (Kabdulova et al., 2019; Babu et al., 2019; Volokitina et al., 2021; Sagynbaeva et al., 2023). This highlights the importance of spectral methods for the analysis of forest-forming rocks and vegetation in general, especially in conditions of increasing exposure to climatic and anthropogenic factors (Gauthier et al., 2014; Nizamutdinov et al., 2022).

## **2. Materials and methods**

Remote sensing is based on the detection of electromagnetic radiation reflected or emitted by objects on the Earth's surface. Electromagnetic radiation includes a wide range of waves, from the ultraviolet to the microwave range. Each object has a unique ability to reflect or absorb radiation, which makes it possible to identify it using remote sensing.

The optical-spectral remote sensing method is based on the analysis of the spectral characteristics of reflected solar radiation detected using specialized sensors mounted on satellites or aircraft. Unlike the traditional optical approach, this method focuses not only on the visual characteristics of the image, but also on the spectral signature of objects, that is, on how different materials reflect or absorb electromagnetic radiation in specific spectral ranges.

Each type of vegetation, soil, water, or artificial object has a unique spectral reflection curve. Due to its high spectral resolution, the optical spectral method makes it possible to accurately distinguish between forest-forming species, assess the condition of plantings, detect the presence of stresses (for example, caused by drought, pests or pollution), and monitor seasonal and long-term changes. The use of optical spectral analysis is especially relevant in the tasks of monitoring forest ecosystems. For example, based on the analysis of spectral data, it is possible not only to determine the type of tree species (coniferous, deciduous), but also to identify signs of forest degradation, disease foci and areas susceptible to anthropogenic impact. In addition, this method allows you to track the effects of forest fires, determining the degree of burnout and the nature of vegetation restoration.

The spectral characteristics of tree species depend on many factors, including biochemical composition, leaf and needle structure, tree age, seasonal changes, and environmental conditions. The main parameters used in spectral analysis include reflection coefficients in various spectral ranges. For example, hardwoods have a high reflection in the near infrared range, while conifers have lower reflectivity values.

Vegetation has a characteristic spectral signature, which is determined by the interaction of light with pigments, cellular structure, and water content. The main ranges of the spectrum in which the distinctive features of tree species are manifested:

1. Visible range (400-700 nm): Absorption in the blue (400-500 nm) and red (600-700 nm) ranges is due to chlorophyll, so the leaves are green, as green light (500-600 nm) is partially reflected.

2. *Near infrared range* (NIR, 700-1300 nm): characterized by strong reflection due to the internal structure of leaves and needles, which makes this range important for the classification of tree species.

3. *Mid-infrared range* (MIR, 1300-2500 nm): the reflectivity of which is related to the water content in plant tissues and may vary depending on their condition, for example, during drought or disease.

Coniferous trees (spruce, pine, cedar) have a lower reflection in the near infrared range compared to deciduous trees (oak, birch, aspen), which is associated with a high density of needles and its lower water content. At the same time, hardwoods have a more pronounced reflection in the NIR range, as their leaves have a more developed internal structure (Komarova et al., 2016; Zharko et al., 2014).

The spectral properties of tree species can change under the influence of various factors:

1. *Seasonal changes*: in autumn, a decrease in chlorophyll levels increases the reflection in the red range, giving the foliage yellow and orange hues. In winter, when deciduous trees shed their leaves, the spectral characteristics of the forest cover change significantly, which is important to take into account when interpreting remote sensing data.

2. *Age and structure of foliage*: young leaves have a higher reflectivity in the visible range, which makes it possible to distinguish young stands from old-age forests.

3. *Health status*: drought, disease, and environmental pollution affect spectral characteristics, especially in the SWIR range. For example, pest-affected trees may exhibit reduced reflectivity in the near-infrared range.

4. *Soil type and humidity*: Wet and swampy areas can affect the spectral properties of tree species by changing their reflectivity.

Data from satellite systems (Landsat, Sentinel, MODIS) make it possible to distinguish tree species by their spectral characteristics. Multispectral and hyperspectral analysis methods are used to map forests, assess their productivity, and monitor vegetation conditions (Banskota et al., 2014; Kurbanov et al., 2018; Chernikhovskii et al., 2019).

Multispectral imagery from the EarthExplorer platform developed by the United States Geological Survey (USGS) was used to analyze forest-forming rocks. This web resource provides access to an extensive archive of remote sensing data, including images from the Landsat, Sentinel, MODIS and other satellite systems. The study used images from the Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 satellite, providing an optimal ratio of spatial resolution and time frequency of observations.

The choice of this satellite is due to its following parameters:

- Wide spectral range. Landsat 8 and 9 satellites detect reflected radiation in 11 spectral ranges, including blue, green, red, near infrared and mid infrared, which makes them particularly useful for classifying forest-forming species and assessing changes in forest ecosystems.

- Optimal shooting frequency. The area is re-covered approximately once every 16 days, allowing you to track seasonal vegetation changes and analyze ecosystem dynamics.

- Minimal cloud cover. As part of the data search on EarthExplorer, you can additionally set filtering criteria by cloud level, which will allow you to select images with the least amount of atmospheric interference.

- The presence of thermal channels. The TIRS Thermal Infrared Sensor contains two infrared channels with a resolution of 100 m, which makes it possible to analyze thermal anomalies, detect soil moisture and determine the state of vegetation.

- Support for radiometric and atmospheric correction. C2 L2 (Level 2) level data has already been calibrated and processed for atmospheric distortion, making it more accurate for scientific analysis (Munzer, 2021).

There are inherent limitations associated with the spatial resolution of Landsat imagery (30 m per pixel), primarily related to the mixed pixel effect and the minimum mapping unit. However, for

regional-scale monitoring of relatively homogeneous forest stands whose area exceeds several image pixels, the spatial resolution of Landsat data is considered sufficient and is widely applied both in scientific research and in operational forest management practice.

As part of the study, satellite images of the territory of the Burabai State National Nature Park in the Akmola region, obtained from the Landsat 8-9 spacecraft for April, May and the summer period of 2024, were analyzed. During scene selection, images with minimal cloud cover were prioritized. Given the extremely low proportion of cloud cover and the study's focus on the analysis of homogeneous forest areas, no additional cloud and cloud-shadow masking procedures were applied, as they did not exert a significant influence on the interpretation of the delineated territories. The primary objective of the study was to demonstrate a methodological workflow for seasonal spectral differentiation of forest vegetation types and for assessing fire impacts based on open-access Landsat Level-2 data within a GIS environment. Accordingly, the emphasis was placed on the logic of the analytical processing and the sequence of operations rather than on the documentation of specific scenes.

Special attention was paid to the vegetation cover, as well as to changes in the surface structure in different seasons. The use of satellite data allows for comprehensive monitoring of the state of landscapes without the need for ground-based observations, which is especially important for remote and vast territories.

The images were preprocessed in the ArcGIS 10.8 program, which included correction procedures, channel combinations, and image preparation for visual analysis. Thanks to this, it was possible to obtain high-quality composites suitable for interpreting seasonal changes within the study area.

### **3. Results**

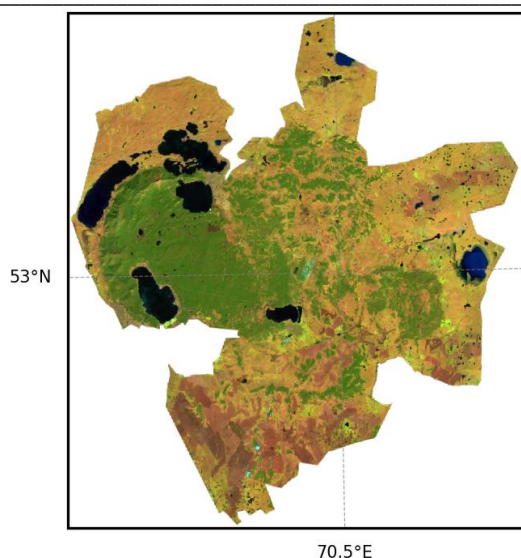
The results of visual analysis of satellite image data of the territory of the Burabai State National Nature Park make it possible to trace changes and identify differences between coniferous (*Pinus sylvestris*) and deciduous (birch (*Betula pendula*), aspen (*Populus tremula*)) in different phases of the growing season. Further analysis includes a detailed consideration of the spectral characteristics of landscapes in different seasons based on the processed images.

Spectral brightness indicators for different types of forest vegetation vary depending on the season and manifest themselves differently in different parts of the electromagnetic spectrum. In April, when hardwoods do not yet have a developed leaf mass, the differences between coniferous and deciduous forests are especially clearly revealed in images obtained using various combinations of spectral channels. The evaluation of spectral band combinations was deliberately based on visual interpretability, as the study is oriented toward applied forestry objectives, where false-color composites are traditionally employed by field practitioners.

Based on the analysis of the April satellite images for 2024 using data from the Landsat 8-9 satellite, the possibilities of visual separation of tree species were studied. Coniferous forests in April show a pronounced increase in reflectivity in the near-infrared range (channel 5 - NIR) and moderate values in the SWIR ranges (channels 6 and 7). Deciduous forests, in the absence of foliage in April, are characterized by reduced reflectivity in the near-infrared range, but have comparatively higher values in the middle IR (channels 6 and 7). The difference between forest types is particularly pronounced in channel 7, which makes it possible to effectively use it for vegetation classification.

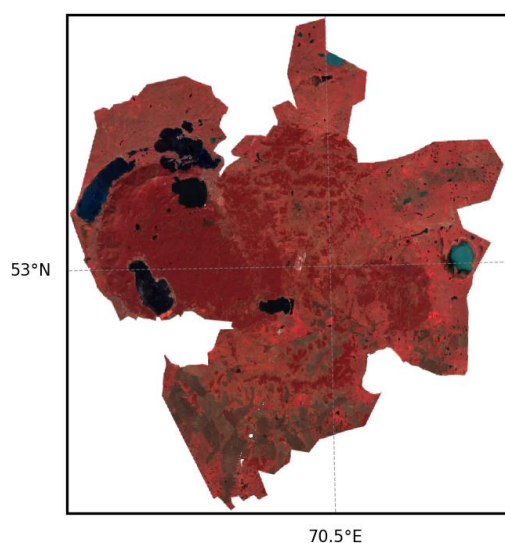
During the study, various color combinations of Landsat 8-9 channels were considered:

In the 6,5,4 (SWIR1, NIR, Red) combination, coniferous forests are visualized in green and dark green tones due to the presence of chlorophyll. At the same time, hardwoods appear more faded or grayish, allowing them to be visually distinguished from the other landscape elements (Figure 1).



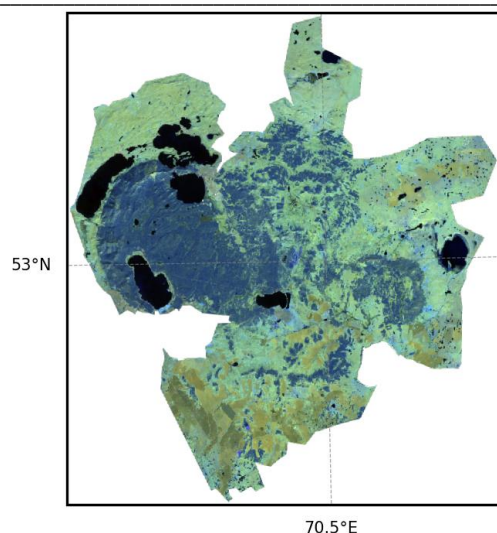
**Figure 1.** Channel combinations 6, 5, 4

In the combination 5,4,3 (NIR, Red, Green), traditionally used to assess vegetation, coniferous forests acquire a bright red hue, reflecting the activity of photosynthesis (Figure 2). Deciduous forests, in the absence of foliage, look more dull, often gray or brownish-green.



**Figure 2.** Channel combinations 5, 4, 3

In the combination of 7,6,5 (SWIR2, SWIR1, NIR), which excludes channels of the visible range, coniferous forests are displayed in bluish-blue tones and stand out most clearly against the background of other types of vegetation (Figure 3). This combination is considered the most effective for isolating coniferous plantations in the April period.

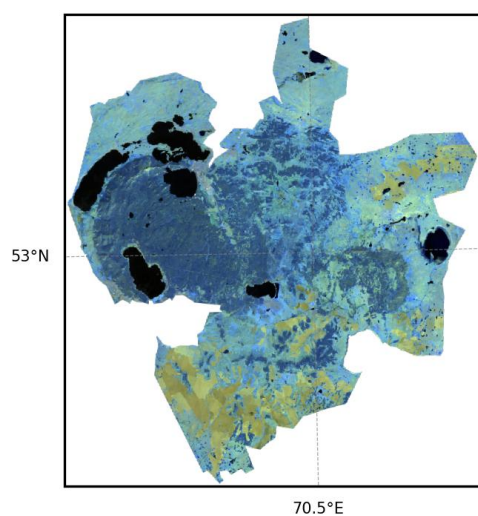


**Figure 3.** Channel combinations 7, 6, 5

Thus, the combination of channels 6, 5, and 4 is the most informative for the purposes of classifying forest stands by type in the April period, as it makes it possible to distinguish conifers most clearly against the background of deciduous and open areas. In April, coniferous forests retain active photosynthetic activity and reflect a greater amount of near and mid-infrared radiation, while hardwoods that do not yet have developed foliage are characterized by low reflectivity. This makes the combination of 6, 5, and 4 especially effective for visually highlighting coniferous plantations in early spring.

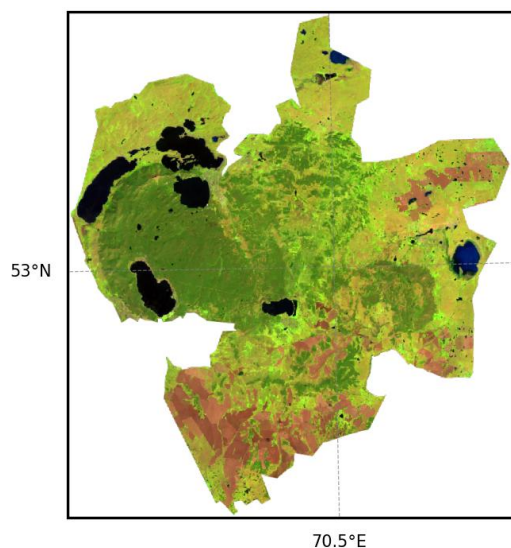
The satellite images from May, reflecting the state of the territory during the active beginning of the growing season, show an increase in the values of the spectral brightness index in the near-infrared range for hardwoods. This is due to the formation of the leaf apparatus and the beginning of photosynthetic activity.

During the visual analysis, it became obvious that the combination of channels 7, 6, and 5, displaying spectral information in the mid- and near-infrared ranges, demonstrates the greatest information content when separating coniferous and deciduous tree species in the May period (Figure 4). In this composition, coniferous forests acquire a distinct blue hue, which makes them stand out clearly from the rest of the landscapes. Deciduous plantings in this combination look less contrasting, which makes it easy to distinguish between both types of forests.



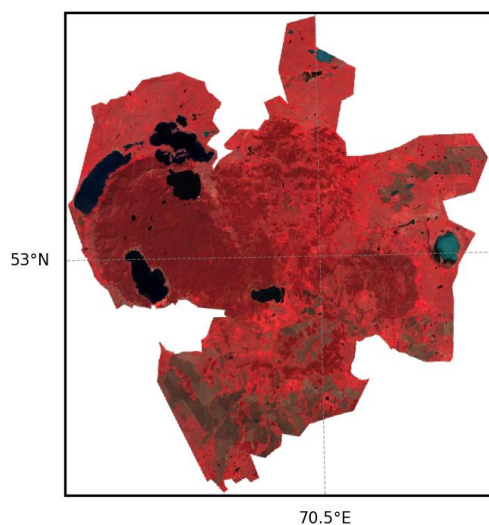
**Figure 4.** Channel combinations 7, 6, 5

Combinations 5,4,3 and 6,5,4 were also used for comparative analysis. In combination 6,5,4, coniferous forests are visualized in dark green tones, and deciduous forests in light green, which also gives satisfactory differentiation (Figure 5).



**Figure 5.** Channel combinations 6, 5, 4

The combination of 5, 4, 3, despite the overall contrast enhancement, is inferior to the combination of 7, 6, 5 in terms of the severity of differences between the species (Figure 6).



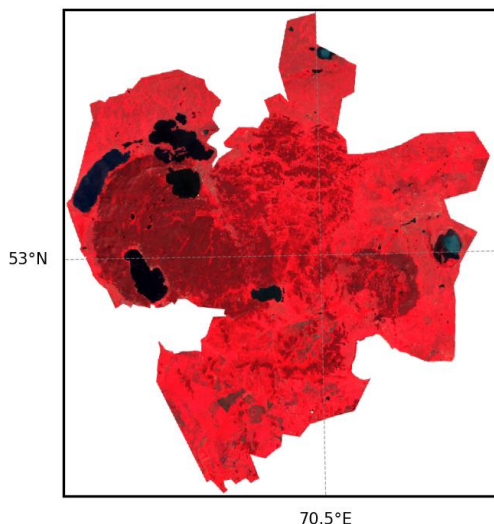
**Figure 6.** Channel combinations 5, 4, 3

Analysis of satellite images from May showed that, at the beginning of the active vegetation period, hardwoods increase their infrared reflectivity. The clearest difference between coniferous and deciduous forests was provided by the combination of channels 7, 6, and 5, where conifers stand out in blue. Combinations of 5, 4, 3, and 6, 5, 4 also produced good results, but they separated the types of woody vegetation less expressively.

In the summer months, when vegetation reaches its maximum development, there is a significant increase in reflectivity in the entire near-infrared range for all types of tree species. This is due to the high density of the leaf cover and active photosynthetic processes. Despite the general increase in spectral brightness, the differences between coniferous and deciduous species persist.

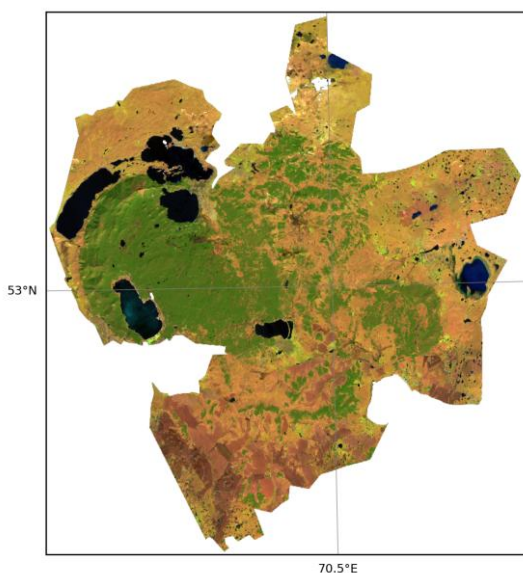
These differences make it possible to continue effective rock separation even during the peak of the growing season.

5, 4, 3 (NIR, Red, Green) is a traditional vegetation combination in which all vegetation is displayed in red shades (Figure 7). However, in the summer, when both deciduous and coniferous forests are at their peak of activity, the visual difference between them in this composition becomes less pronounced. The entire vegetation cover looks rich red and it is difficult to distinguish between tree species.



**Figure 7.** Channel combinations 5, 4, 3

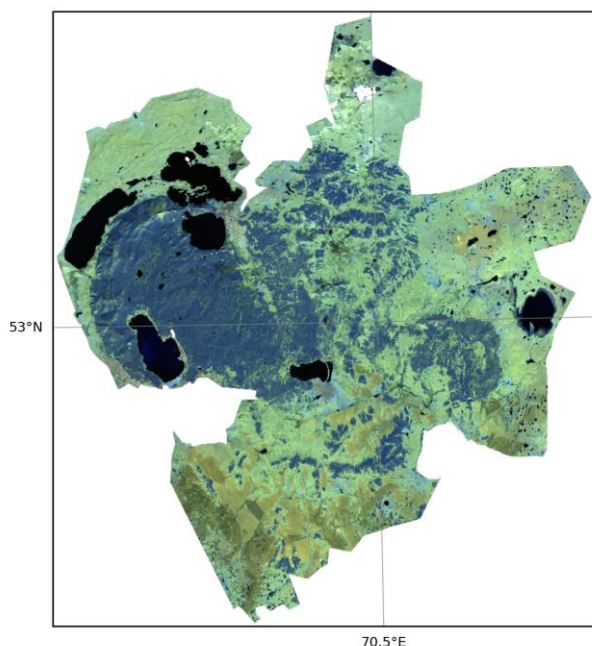
6, 5, 4 (SWIR1, NIR, Red) is a composition that allows for differences in moisture content and vegetation structure. In this combination, coniferous forests look saturated green, while deciduous forests are lighter and less contrasting (Figure 8). Arable land, meadows, and agricultural land are also clearly distinguishable, which makes this combination useful for a comprehensive landscape analysis.



**Figure 8.** Channel combinations 6, 5, 4

7, 6, 5 (SWIR2, SWIR1, NIR) is a combination that excludes visible channels, but effectively reflects differences in vegetation structure. In this color scheme, conifers are visualized in blue and light blue tones, clearly standing out against the background of deciduous forests and farmland

(Figure 9). This combination is particularly good at showing the internal heterogeneity of the vegetation cover and makes it possible to confidently classify the types of tree species.



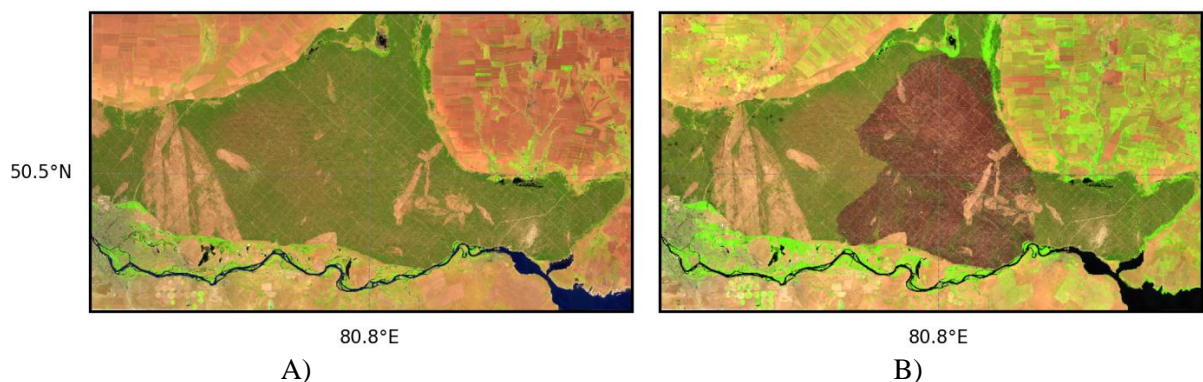
**Figure 9.** Channel combinations 7, 6, 5

Based on the visual analysis of the summer images, the combination of channels 7, 6, and 5 proved to be the most informative for distinguishing coniferous and deciduous forests. It allows coniferous plantations to be clearly distinguished due to the characteristic blue spectral response and demonstrates high sensitivity to differences in vegetation structure. Despite the overall increase in spectral brightness in all breeds, this combination retains a clear contrast and reliably captures differences between forest types during the peak growing season.

One of the illustrative areas of practical application of the optical spectral method is the assessment of the consequences of natural disasters, including forest fires. The use of satellite data combined with the capabilities of GIS technologies makes it possible to quickly and objectively identify the boundaries of affected areas, differentiate the degree of burnout, and distinguish between the types of damaged vegetation.

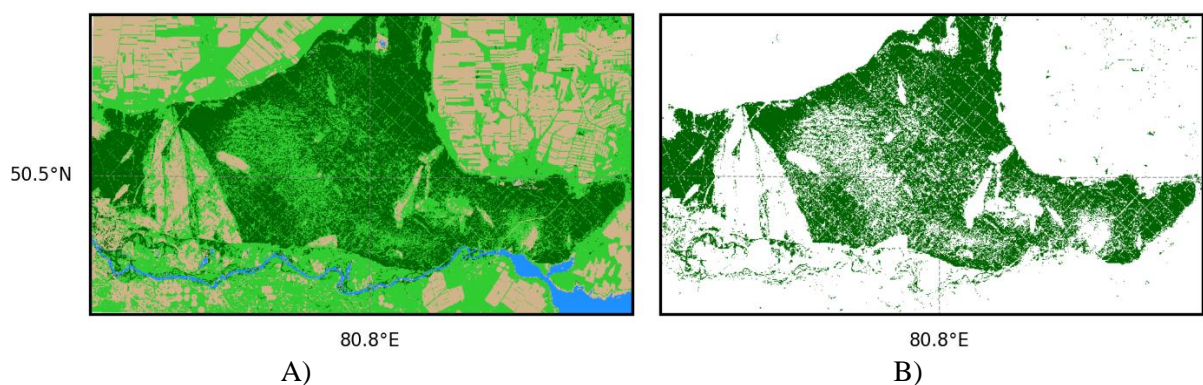
A striking example of the devastating effects of wildfires is the emergency that occurred in the Abai region in June 2023, which resulted in the destruction of about 65,000 hectares of forest areas. The optical spectral method was used to obtain quantitatively accurate information about the area of burnt forests and to determine the proportion of coniferous vegetation within the burnt area (Figure 10). Landsat 8-9 scenes from May and June 2023 were used as the primary material. A combination of channels 6, 5, and 4 was used as the working color combination.

Although standard burn severity and fire-related indices (NBR, dNBR) constitute effective tools for the quantitative assessment of post-fire impacts, the delineation of burned areas based on pronounced spectral contrast in the SWIR and NIR ranges is conceptually consistent with the principles underlying the NBR calculation and may be applied within the framework of rapid assessment.



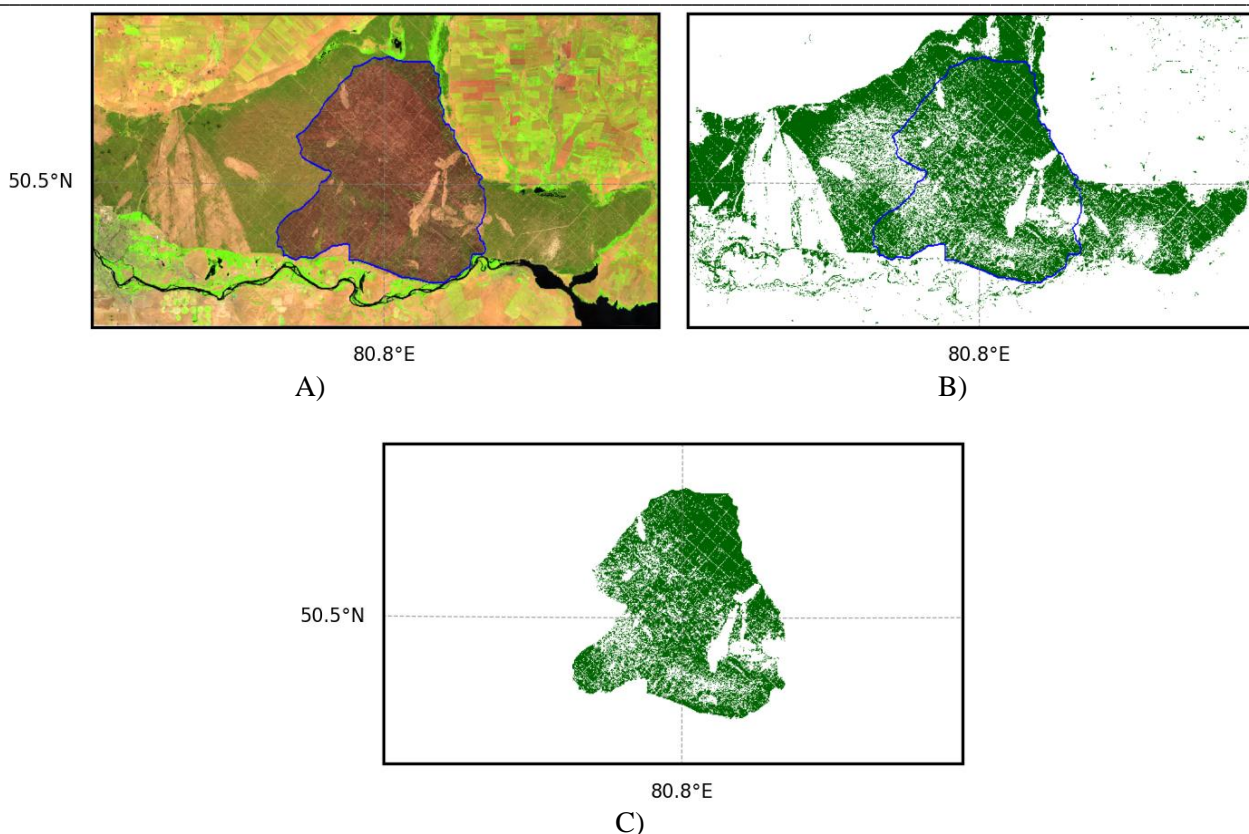
**Figure 10.** Processed image of the forest of the Abai region before (A) and after (B) the fire

After connecting spectral channels 6, 5, and 4, the pixel values of the image data were reclassified by type of underlying surface using the "Reclassify" tool in the ArcGIS environment. Since the study was aimed at demonstrating the conceptual applicability of spectral differentiation rather than at developing a universal threshold-based model with fixed parameter values, the reclassification was performed automatically in ArcGIS using the Maximum Likelihood algorithm. In this approach, the classifier computes the probability that a given pixel belongs to the class "Water," "Vegetation," or "Built-up area," and each raster pixel is assigned to the class for which this probability (likelihood) is the highest. The resulting classified raster was converted into a vector format using the "Raster to Polygon" tool, on the basis of which coniferous plantations were identified (Figure 11).



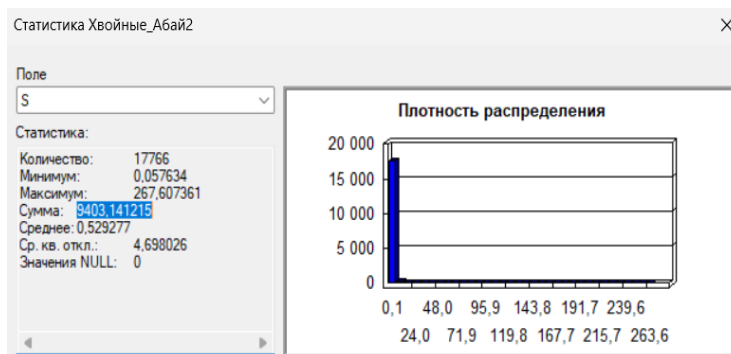
**Figure 11.** A reclassified snapshot of the forest of the Abai region (A) and a vector layer of coniferous plantations (B)

The reclassification procedure was also carried out for the satellite image of the forests of the Abai region after the fire, on the basis of which a separate polygonal layer corresponding to the fire area was created (Figure 12). The next step is to overlay the resulting polygon on a vector layer of coniferous plantations and select them inside the polygon using the Selection by Location tool.



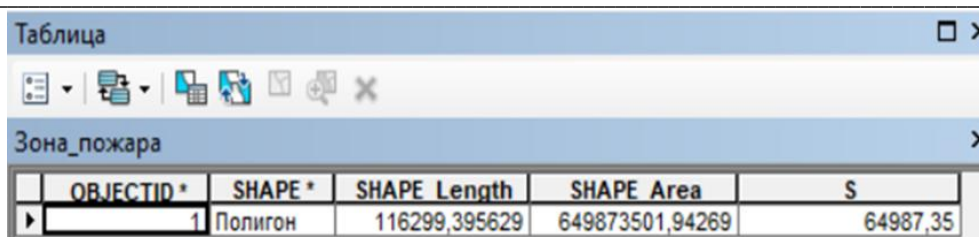
**Figure 12.** Identification of coniferous plantations within the fire area based on a reclassified satellite image of forests in the Abai region

At the final stage of the analysis, a quantitative assessment of the area of coniferous forests trapped in the fire contour was carried out (Figure 13). For this purpose, an attribute table of the coniferous plantation layer was used, in which the area values of each site were stored. Using the built-in statistics function in ArcGIS, the total area of coniferous forests within the fire zone was obtained. According to the results, the total area of burnt coniferous plantations was 9403.14 hectares, which is shown in the "Sum" column of field S on the distribution density diagram.



**Figure 13.** Calculations of the fire area of coniferous plantations

To obtain an accurate estimate of the scale of a natural fire in the Abai region, the attribute table of the polygon marking the boundaries of the fire zone was analyzed (Figure 14). As a result of the analysis, it was found that the total area of the fire was 64 987.35 hectares, which confirms the official data on the disaster that occurred in the summer of 2023.



	OBJECTID *	SHAPE *	SHAPE Length	SHAPE Area	S
▶	1	Полигон	116299,395629	649873501,94269	64987,35

**Figure 14.** Calculations of the total fire area

The obtained indicators allowed us to determine the percentage of coniferous forests to the affected area, which was 14.5%.

#### 4. Discussion

The analysis of the spectral characteristics of forest-forming rocks of the temperate zone demonstrates the following features: coniferous species (spruce, pine, cedar) have a lower reflection in the near infrared range (NIR) compared with deciduous species (birch, aspen), which is associated with a high density of needles and a lower content of water in the needles. The use of the near-infrared range in composite images has made it possible to more effectively identify the types of woody vegetation in satellite images.

It has been revealed that the most suitable combination of spectral channels for conifers is a combination of channels 6, 5 and 4, in which conifers are most clearly distinguished from deciduous trees. For hardwoods, the best combination is 7, 6, 5, the spectrum of which is characterized by a light blue color.

Calculations based on the spectral method the calculation of the area of coniferous trees affected by fire in the territory of the Abai region in 2023 corresponds to official data.

The use of multispectral data makes it possible to quickly track changes in vegetation cover, differentiate vegetation types, assess the degree of moisture in territories, and identify structural features of the landscape during different growing seasons. The analysis of the reflectivity of wood in various ranges of the electromagnetic spectrum makes it possible to identify stress conditions of plants caused by changes in climatic conditions, anthropogenic impact or pest damage.

#### 5. Conclusion

The analysis of seasonal satellite images from Landsat 8-9 confirmed the effectiveness of remote sensing for monitoring forest resources. The optical spectral method provides high information content with minimal resource expenditure, which makes it a particularly valuable tool for environmental research, environmental planning, and analysis of the dynamics of natural processes. The results obtained confirm the expediency of using satellite data in regional monitoring and classification of natural complexes. Further advancement of spectral data processing technologies, specifically through the implementation of a validation procedure using an error matrix and the development of a statistically optimized classification model, will not only improve the accuracy of forest species composition assessment but also enhance methods for monitoring forest condition under conditions of global environmental change, thereby opening new opportunities for ecological monitoring and the rational management of natural resources.

**6. Supplementary Materials:** no additional materials.

#### 7. Author Contributions

Conceptualization, methodology development, supervision – I.S.; methodology development, software and project management, research material provision – S.I.; methodology development, supervision – P.D.; text preparation and editing – I.S., S.I.; analysis – S.I., P.D. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 8. Author Information

Sedelnikov, Igor – lecturer, Department of Geography and Ecology, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Pushkin str. 86, Petropavlovsk, Kazakhstan, 150000; [igor\\_sko\\_kz\\_94@mail.ru](mailto:igor_sko_kz_94@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9921-1825>

Ismagulova, Saltanat – PhD, associate professor, Department of Geography and Ecology, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Pushkin str. 86, Petropavlovsk, Kazakhstan, 150000; [smismagulova@mail.ru](mailto:smismagulova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3654-7756>

Dmitriev, Pavel – professor, Department of Geography and Ecology, Candidate of biological sciences, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Pushkin str. 86, Petropavlovsk, Kazakhstan, 150000; [dmitriev\\_pavel@mail.ru](mailto:dmitriev_pavel@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2712-3508>

**9. Funding:** not Funding.

**10. Acknowledgments:** none.

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

## 12. References

1. Acharya, R. P., Maraseni, T., & Cockfield, G. (2019). Global trend of forest ecosystem services valuation – An analysis of publication. *Ecosystem Services*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100979>
2. Ahmed, B., Rida, K., Aafaf, J., Fatima, T., & Samir, N. (2018). Monitoring of forest cover dynamics in Eastern Area of Beni-Mellal Province using ASTER and Sentinel-2A. *Multispectral Data, Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(3), 203–215. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452478>
3. Babu, K. V. S., Kabdulova, G., & Kabzhanova, G. (2019). Developing the forest fire danger index for the country Kazakhstan by using geospatial techniques. *J. of Environ Informatics Letters*, 1(1), 48–59. <https://doi.org/10.3808/jeil.201900006>
4. Banskota, A., Kayastha, N., Falkowski, M., Wulder, M. A., Froese, R. E., & White, J. C. (2014). Forest monitoring using Landsat time-series data: a review. *Canadian J. of Rem. Sens*, 40 (5). 362–384. <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.987376>
5. Bissenbayeva, S. Melysbek, Sh., & Baimukan, E. (2024). An overview of forest monitoring in Kazakhstan based on earth observation. (Obzor monitoringa lesov v Kazakhstane na osnove nablyudeniya za Zemley in Russian). *Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian national University. Chemistry. Geography. Ecology series (Vestnik Yevraziyskogo natsional'nogo universiteta im. L.N. Gumileva. Seriya Khimiya. Geografiya. Ekologiya)*, 147(2), 135–149. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2024-147-2-135-149>
6. Chernikhovskii, D. M., & Alekseev, A. S. (2019). The method for determining forest characteristics based on earth remote sensing materials, forest management data and the k-NN algorithm (Case study of Lodeynopol'skoe Forest District of Leningrad). (Metod opredeleniya kharakteristik lesov naosnove materialov distantsionnogo zondirovaniya zemli, dannykh lesoustroystva i algoritma k-nn (na primere Lodeynopol'skogo lesnichestva Leningradskoy oblasti) in Russian). *Forestry J (Lesnoy Zhurnal)*, 4, 45–65. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.45>
7. Dostalova, A., Hollaus, M., Milenkovic, M., & Wagner, W. (2016). Forest area derivation from Sentinel-1 Data. ISPRS ann. photogramm. *Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, III–7, 227–233. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-III-7-227-2016>
8. Druke, M., Sakschewski, B., Von Bloh, W., Billing, M., Lucht, W., & Thonicke, K. (2023). Fire may prevent future Amazon forest recovery after large-scale deforestation. *Communications Earth & Envir*, 4, 248. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00911-5>

9. Faruque, Md. J., Vekerdy, Z., Hasan, Md. Y., Islam, K. Z., Young, B., Ahmed, M. T., Monir, M. U., Shovon, S. M., Kakon, J. F., & Kundu, P. (2022). Monitoring of land use and land cover changes by using remote sensing and GIS techniques at human-induced mangrove forests areas in Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environ*, 25, 100699. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100699>
10. Gauthier, S., Bernier, P., Burton, P. J., Edwards, J., Isaac K., Isabel, N., Jayen, K., Le Goff, H., & Nelson, E. A. (2014). Climate change vulnerability and adaptation in the managed Canadian boreal forest. *Environ Rev*, 30, 256–285. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0064>
11. Gonets, G., Komissarova, E., & Kolesnikov, A. (2025). Methodology for clarifying and updating information on forest resources through the use of remote sensing data and mobile devices (Metodika utochneniya i obnovleniya informatsii o lesnykh resursakh posredstvom ispol'zovaniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya i mobil'nykh ustroystv in Russian). *Bulletin of SSUGiT (Vestnik SSUGT)*, 30, 96–105. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-1-96-105>
12. Holzwarth, S., Thonfeld, F., Abdullahi, S., Asam, S., Da Ponte Canova, E., Gessner, U., Huth, J., Kraus, T., Leutner, B., & Kuenzer, C. (2020). Earth observation based monitoring of forests in Germany: a Review. *Remote Sensing*, 12(21), 3570. <https://doi.org/10.3390/rs12213570>
13. Ju, J., & Masek, J. G. (2016). The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data. *Remote Sens. Environ*, 176, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.001>
14. Kabdulova, G., Kabzhanova, G., Baktybekov, K., Aimbetov, A., & Aligazhiyeva, L. (2019). Satellite remote sensing for monitoring of the forest resources of Kazakhstan. *SPIE-Intl Soc Optical Eng*, 37. <https://doi.org/10.1117/12.2533563>
15. Komarova, A. F., Zhuravleva, I. V. & Yablokov, V. M. (2016). Open multispectral data and basic remote sensing methods in the study of vegetation cover (Otkrytye mul'tispektral'nyye dannyye i osnovnyye metody distantsionnogo zondirovaniya v izuchenii rastitel'nogo pokrova in Russian). *Principles of Ecology (Printsipy ekologii)*, 1, 40–74. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2016.4922>
16. Kurbanov, E. A., Vorobiev, O. N., Menshikov, S. A., & Smirnova, L. N. (2018). Identification of forest stands and dominant tree species in Penza Region using Sentinel-2 imagery. (Raspoznavaniye lesnykh nasazhdeniy i dominiruyushchikh drevesnykh porod Penzenskoy oblasti po dannym sputnika Sentinel-2). *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space (Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa)*, 15 (5), 154–166. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166>
17. Mancino, G., Nole, A., Ripullone, F., & Ferrara, A. (2014). Landsat TM imagery and NDVI differencing to detect vegetation change: assessing natural forest expansion in Basilicata, Southern Italy. *Forest-Biogeosciences and Forestry*, 7, 75. <https://doi.org/10.3832/for0909-007>
18. McRoberts, R. E., Cohen, W. B., Næsset, E., Stehman, S. V., & Tomppo, E. O. (2010). Using remotely sensed data to construct and assess forest attribute maps and related spatial products. *Scandinavian J. of Forest Research*, 25(4), 340–367. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.497496>
19. Munzer, N. (2021). Development of a methodology for using satellite imagery data for forest monitoring [Razrabotka metodiki primeneniya dannykh kosmicheskikh s"yemok dlya monitoringa lesov]: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 25.00.34 [Place of protection: Moscow State University of Geodesy and Cartography]. – Moscow, 2021. – 150 p.
20. Nizamutdinov, D., Pestereva, N., Kornilova, O., Kirillova, I., & Udodov, M. (2022). Regional modeling of forest cover changes in relation to climate and anthropogenic factors: a case study of the Far Eastern federal district of Russia. *Ecolog. Indicators*, 144, 108629. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108629>
21. Ozgeldinova, Z., Zhanguzhina A., Mukaev, Z., Ulykpanova M., & Berdenov, Z. (2024). Determining the species composition of forest vegetation in the Kostanay region using remote

- sensing data. *Hydrometeorology and Ecology*, 1, 133–143. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-133-143>
22. Savin, M., Plotnikova, A., & Narykova, A. (2022). Application of GIS technologies to build spatial predictors for mapping forest ecosystem functions at the local level. *Forest science issues*, 5, 1–15. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202252-105>
23. Sagynbaeva, A., Mambetov, B., & Dancheva, A. (2023). Application of the approach of remote sensing of the earth and GIS in the study of the process of restoration of the vegetation cover of a pine forest (on the example of the state forest natural reserve «Semey ormany») (Primeneniye distantsionnogo zondirovaniya zemli i GIS tekhnologii pri izuchenii vosstanovleniya osnovnogo lesa (na primere gosudarstvennogo lesnogo prirodnogo rezervata «Semey ormany») in Russian). *Research, results (Izdenister Natigeler)*, 1(97), 127–138. <https://doi.org/10.37884/1-2023/15>
24. Volokitina, A., Kalachev, A., Korets, M., & Sofronova, T. (2021). Fire behavior prediction in larch forests of the Kazakhstan Altai. *Symmetry*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/sym13040578>
25. Wulder, M., Masek J., Cohen W., Loveland, T., & Woodcock, C. (2012). Opening the archive: how free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sens Environ*, 122, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>
26. Zhanguzhina, A., Ozgeldinova, Z., Mukayev, Z., Ulykpanova, M., & Zhanuzakova, P. (2025). Natural restoration of forests after a fire in the Amankaragay Forest massif of the Kostanay Region, Republic of Kazakhstan. *J. of the Bulgar. Geo. Soc*, 52, 93–114. <https://doi.org/10.3897/jbgs.e144897>
27. Zharko, V. O., & Bartalev S. A. (2014). Forest tree species recognizability assessment based on satellite data on their spectral reflectance seasonal changes (Otsenka raspoznavayemosti drevesnykh porod lesa na osnove sputnikovykh dannykh o sezonnykh izmeneniyakh ikh spektral'nootrazhatel'nykh kharakteristik in Russian). *Modern problems of remote sensing of the Earth from space (Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa)*, 11(3), 159–170. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=1884>
28. Zhumadina, S., Chlachula, J., Zhaglovskaya-Faurat, A., Czerniawska, J., Satybaldieva, G., Nurbayeva, N., Mapitov, N., Myrzagaliev, A., & Boribay, E. (2022). Environmental dynamics of the ribbon-like pine forests in the Parklands of North Kazakhstan. *Forests*, 13(1), 2. <https://doi.org/10.3390/f13010002>

## Ағаш өсімдіктерінің спектрлік ерекшеліктерін талдау үшін спутниктік мәліметтерді пайдалану мүмкіндіктері

Игорь Седельников, Салтанат Исмагулова, Павел Дмитриев

**Аңдатпа.** Мақалада табиғи ресурстарды тұрақты басқару контекстіндегі негізгі міндет болып табылатын орман экожүйелерінің жағдайын бағалау және мониторингілеу үшін спутниктік мәліметтерді пайдалану мүмкіндіктерін зерттеу нәтижелері берілген. Зерттеу Жерді қашықтықтан зондтаудың заманауи технологияларын (Landsat 8-9) және географиялық ақпараттық жүйе құралын (ArcGIS 10.8) пайдалана отырып, олардың маусымдық спектрлік динамикасын талдау негізінде қоңыржай белдеудегі орман құраушы түрлерін саралау әдістемесін әзірлеуге бағытталған. Мақалада қоңыржай климаттық жағдайларда электромагниттік спектрдің әртүрлі диапазонында олардың шағылысу қабілетін талдау негізінде ағаш түрлерінің спектрлік сипаттамаларын зерттеу нәтижелері берілген. Өрттен зақымданған орман алқаптарының шекарасын белгілеу және ауданын анықтау бойынша жүргізілген есептеулер қашықтықтан зондтау әдістері мен геоақпараттық технологияларды қолданудың тиімділігін растайды. Зерттеудің нәтижелері мен іс-шаралар жоспары

ормандардың түрлік құрамын анықтау, оларды түгендеу және мониторингілеу, орман өрттері мен ағаш кесу сияқты ықтимал қауіптерге дер кезінде ден қою және олардың зардаптарын бағалау мақсатында орман шаруашылығы үшін практикалық маңызы бар.

**Түйін сөздер:** Қашықтықтан зондтау; спутниктік суреттер; оптикалық-спектрлік талдау; арналар комбинациясы; орман ресурстары; ағаш түрлері; орман өрттері.

## **Возможности использования спутниковых данных для анализа спектральных особенностей древесной растительности**

**Игорь Седельников, Салтанат Исмагулова, Павел Дмитриев**

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования возможностей использования спутниковых данных для оценки состояния и мониторинга лесных экосистем, что является ключевой задачей в контексте устойчивого управления природными ресурсами. Исследование направлено на развитие методики дифференциации лесообразующих пород умеренного пояса на основе анализа их сезонной спектральной динамики с использованием современных технологий дистанционного зондирования Земли (Landsat 8-9) и инструмента геоинформационных систем (ArcGIS 10.8). Представлены результаты исследования спектральных характеристик древесных пород на основе анализа их отражательной способности в различных диапазонах электромагнитного спектра в условиях умеренного климатического пояса. Установлено, что наиболее контрастные спектральные различия, позволяющие надежно идентифицировать лиственные и хвойные породы деревьев, наблюдаются в определенные фенологические периоды (весенний и летний), что подтверждает важность учета временного фактора при дешифрировании лесов. Проведенные расчеты по установлению границ, определению площади пострадавших от пожара лесных массивов подтверждают оперативность и эффективность использования методов дистанционного зондирования и геоинформационных технологий. Результаты и алгоритм действий проведенного исследования имеют практическое значение для лесного хозяйства с целью определения породного состава лесов, их инвентаризации и мониторинга, своевременного реагирования на возможные угрозы, такие как лесные пожары и вырубка, а также оценку их последствий.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование; спутниковые снимки; оптико-спектральный анализ; комбинации каналов; лесные ресурсы; древесные породы; лесные пожары.

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.

– 1 (154)/2026 – Астана: ЕҰУ. 187 б.

Шартты б.т. – 20.43. Таралымы – сұраныс бойынша.

Басуға қол қойылды: 31.03.2026

Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://bulchmed.enu.kz>

*Мазмұнына типография жауап бермейді*

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2.  
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті Тел.: +7(71-72) 70-95-00(ішкі 33-207)  
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің баспасында басылды