

ISSN 1563-034X; eISSN 2617-7358

ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

# ХАБАРШЫ

Экология сериясы

---

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЬ-ФАРАБИ

# ВЕСТНИК

Серия экологическая

---

AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY

# EURASIAN JOURNAL

of Ecology

---

№1 (86)

Алматы  
«Қазақ университеті»  
2026



# ХАБАРШЫ

ЭКОЛОГИЯ СЕРИЯСЫ №1 (86) наурыз



04. 05. 2017 ж. Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникация министрлігінде тіркелген

Күәлік № 16501-Ж

Журнал жылына 4 рет жарыққа шығады  
(наурыз, маусым, қыркүйек, желтоқсан)

## ЖАУАПТЫ РЕДАКТОР

**Омирбекова А.А.**, PhD, доцент (Қазақстан)  
e-mail: anel.omirbekova@kaznu.edu.kz

## РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

**Заядан Б.К.**, б.ғ.д., профессор, ҚР ҰҒА академигі,  
(ғылыми редактор) (Қазақстан)  
**Колумбаева С.Ж.**, б.ғ.д., профессор (ғылыми редактордың  
орынбасары) (Қазақстан)  
**Қурманбаева М.С.**, б.ғ.д., профессор (Қазақстан)  
**Жубанова А.А.**, б.ғ.д., профессор (Қазақстан)  
**Шалахметова Т.М.**, б.ғ.д., профессор (Қазақстан)  
**Кенжебаева С.С.**, б.ғ.д., профессор (Қазақстан)  
**Атабаева С.Дж.**, б.ғ.д., профессор (Қазақстан)  
**Садырова Г.А.**, б.ғ.д., профессор (Қазақстан)  
**Абилев С.К.**, б.ғ.д., профессор (Қазақстан)  
**Тажимаева Т.Л.**, б.ғ.к., профессор м.а. (Қазақстан)  
**Бияшева З.М.**, б.ғ.к., доцент (Қазақстан)

**Мамилов Н.Ш.**, б.ғ.к., доцент (Қазақстан)  
**Инелова З.А.**, б.ғ.к., доцент (Қазақстан)  
**Кушнарченко С.В.**, б.ғ.к., доцент (Қазақстан)  
**Тастамбек Қ.Т.**, PhD, доцент (Қазақстан)  
**Дигель И.**, PhD докторы, профессор (Германия)  
**Маторин Д.**, б.ғ.д., профессор (Ресей)  
**Рахман Е.**, PhD, профессор (Қытай)  
**Liu Xiangrong**, профессор (Қытай)  
**Тамо Тацуя**, PhD, профессор (Жапония)  
**Аллахвердиев Сүлейман**, б.ғ.д., профессор (Ресей)  
**Каримов Б.**, б.ғ.д., профессор (Өзбекстан)

## ТЕХНИКАЛЫҚ РЕДАКТОР

**Ахметова Г.А.** PhD, аға оқытушы (Қазақстан)

Экология сериясы қоршаған ортаны қорғау және қоршаған ортаға антропогендік факторлардың әсері, қоршаған орта ластаушыларының биотаға және тұрғындар денсаулығына әсерін бағалау, биологиялық аулантүрлілікті сақтаудың өзекті мәселелері бағыттарын қамтиды.



**Жоба менеджері**

*Гульмира Шаққозова*

Телефон: +7 701 724 2911

e-mail: Gulmira.Shakkozova@kaznu.kz

ИБ №17085

Пішімі 60x84/8. Көлемі 12,8 б.т. Тапсырыс № 3804.

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Қазақ университеті» баспа үйі.  
050040, Алматы қаласы, әл-Фараби даңғылы, 71.

Баспа журналдың ішкі мазмұнына жауап бермейді.

© Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, 2026

1-бөлім  
**ҚОРШАҒАН ОРТАНЫ ҚОРҒАУ  
ЖӘНЕ ҚОРШАҒАН ОРТАҒА  
АНТРОПОГЕНДІК ФАКТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІ**

---

Section 1  
**ENVIRONMENTAL IMPACT  
OF ANTHROPOGENIC FACTORS  
AND ENVIRONMENTAL PROTECTION**

---

Раздел 1  
**ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ  
АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ  
И ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Р.Ж. Бержанова<sup>1</sup> , Т.Д. Мукашева<sup>1</sup> , Н.К. Бектилеуова<sup>1\*</sup> ,  
Г. Абай<sup>2</sup> , Е.С. Сатыбалды<sup>1</sup> , Р.К. Сыдыкбекова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>ТОО «BioClean», Алматы, Казахстан

\*e-mail: nurgul210979@gmail.com

## ОТБОР И ХАРАКТЕРИСТИКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МИКРОБНЫХ ШТАММОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СТРАТЕГИЙ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ

Характеристика микроорганизмов PGPM является важным этапом при выборе видов штаммов в качестве биоинокулянтов. В данном исследовании были оценены свойства PGPM у 98 изолятов, выделенных из почвы, ризосферы и тканей растений, выращенных на нефтезагрязненной почве. Было установлено, что из 98 исследованных изолятов 21,4% обладали протеолитической активностью, 24,4% – амилазной и 9,2% – целлюлолитической активностью на агаровых средах со специфическим субстратом. После первичного скрининга отобраны 20 изолятов (N9, N11, MSM12, MSM3, MSM20, MSM21, MSM25, MSM20, V16, L5-2, L5-5, L5-6, L10-2, L10-6, L10-12, L10-10, KP5, KB9, KP10 и C10) продемонстрировавших высокую двойную или тройную гидролитическую активность. Методология ступенчатого скрининга позволила отобрать штаммы, продемонстрировавшие более одного или несколько свойств с PGPR свойствами, обеспечивающих рост растений такими как: производство фитогормонов, фиксация азота, секреция ИУК, производство хелатирующих соединений железа, растворение фосфатов и синтезирующие гидролитические ферменты. Поэтому multifunctional штаммы с PGPR-свойствами могут быть использованы как наиболее перспективные инокулянты для улучшения эффективности фиторемедиации нефтезагрязнённых почв.

**Ключевые слова:** ИУК, бактерии, способствующие росту растений, сидерофоры, фитогормоны, фосфаты, фиксация азота, протеаза, целлюлаза, амилаза.

R. Berzhanova<sup>1</sup>, T. Mukasheva<sup>1</sup>, N. Bektileuova<sup>1\*</sup>,  
G. Abay<sup>2</sup>, E. Satybaldy<sup>1</sup>, R. Sydykbekova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>LLP «BioClean», Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: nurgul210979@gmail.com

### Selection and characterization of multifunctional microbial strains for the development of phytoremediation strategies

Characterization of PGPM microorganisms is an important step in selecting strains as bioinoculants. In this study, the PGPM properties of 98 isolates recovered from soil, rhizosphere, and plant tissues grown in oil-contaminated soil were assessed. Of the 98 isolates tested, 21.4% exhibited proteolytic activity, 24.4% exhibited amylolytic activity, and 9.2% exhibited cellulolytic activity on agar media with specific substrates. After the initial screening, 20 isolates (N9, N11, MSM12, MSM3, MSM20, MSM21, MSM25, MSM20, V16, L5-2, L5-5, L5-6, L10-2, L10-6, L10-12, L10-10, KP5, KB9, KP10 and C10) demonstrating high double or triple hydrolytic activity were selected. The stepwise screening methodology allowed the selection of strains demonstrating more than one or several properties with PGPR properties that ensure plant growth such as: phytohormone production, nitrogen fixation, IAA secretion, production of iron chelating compounds, phosphate solubility and synthesizing hydrolytic enzymes. Therefore, multifunctional strains with PGPR properties can be used as the most promising inoculants to improve the efficiency of phytoremediation of oil-contaminated soils.

**Keywords:** IAA, bacteria that promote plant growth, siderophores, phytohormones, phosphates, nitrogen fixation, protease, cellulase, amylase.

Р.Ж. Бержанова<sup>1</sup>, Т.Д. Мукашева<sup>1</sup>, Н.К. Бектилеуова<sup>1\*</sup>,  
Г. Абай<sup>2</sup>, Е.С. Сатыбалды<sup>1</sup>, Р.К. Сыдыкбекова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>ЖШС «BioClean», Алматы, Қазақстан

\*e-mail: nurgul210979@gmail.com

### **Фиторемедиация стратегияларын әзірлеу үшін көпфункционалды микробтық штамдарды іріктеу және сипаттау**

PGPM микроорганизмдерінің сипаттамасы биоинокулянттар ретінде штамм түрлерін таңдаудағы маңызды қадам. Бұл зерттеуде мұнаймен ластанған топырақта өсірілген өсімдіктер ризосферасынан, топырағынан және өсімдік ұлпаларынан бөлініп алынған 98 изоляттардың PGPM қасиеттері бағаланды. Зерттелген 98 изоляттың 21,4% – протеолитикалық белсенділігі, 24,4% – амилитикалық және 9,2% целлюлозолитикалық белсенділікке ие екені спецификалық субстраттары бар агарлы орталарында анықталды. Бастапқы іріктеуден кейін жоғары екі немесе үштік гидролитикалық белсенділікті көрсеткен 20 изолят (N9, N11, MSM12, MSM3, MSM20, MSM21, MSM25, MSM20, V16, L5-2, L5-5, L5-6, L10-2, L10-6, L10-12, L10-10, KP5, KB9, KP10 және C10) іріктеліп алынды Сатылап скрининг жүргізу әдістемесі PGPR-қасиеттері бар, өсімдіктердің өсуін қамтамасыз ететін бірнеше немесе бірден артық қасиеттерді көрсеткен штаммдарды іріктеп алуға мүмкіндік берді. Оларға мыналар жатады: фитогормондар өндіру, азотты фиксациялау, ИСК секрциясы, темірдің хелаттаушы қосылыстарын өндіру, фосфаттарды еріту және гидролитикалық ферменттерді синтездеу. Сондықтан PGPR-қасиеттері бар көпфункционалды штаммдар мұнаймен ластанған топырақтардың фиторемедиациясының тиімділігін арттыру үшін ең перспективалы инокулянттар ретінде пайдаланылуы мүмкін.

**Түйін сөздер:** ИСК, өсімдіктердің өсуіне ықпал ететін бактериялар, сидорофорлар, фитогормондар, фосфаттар, азотты бекіту, протеаза, целлюлаза, амилаза.

#### **Введение**

**За последнее время заметно усилилась заинтересованность** к использованию микробных препаратов и биоинокулянтов, содержащих PGPR, для восстановления загрязненных почвенных экосистем (Basu et al., 2021). Более того, в литературе известны штаммы PGPR, обладающие способностью к деградации углеводородов нефти, что делает их исключительно перспективными и важными агентами для использования в технологиях фиторемедиации и биоремедиации загрязненных почв (Mahanty et al., 2018). Микробные инокулянты обладают способностью поддерживать рост растений как прямым, так и косвенным образом, выполняя такие важные функции, включающие фиксацию азота, растворение фосфатов, питательных веществ, включая высвобождение сидорофоров и индол-3-уксусной кислоты (ИУК), ферменты для стимулирования роста и усиление защитных механизмов растений или обладать комбинацией всех этих свойств (Zandi et al., 2017; Bhardwaj et al., 2014).

Разработка и внедрение многофункциональных биоинокулянтов, адаптированных к специфическим местным условиям и выделенных из почв, загрязнённых нефтью, с использованием

аборигенных штаммов PGPR, усиливающих фиторемедиацию нефтяных углеводородов представляет перспективную стратегию решения проблем нефтяного загрязнения. Обширные территории Атырауской области Казахстана испытывают сильное загрязнение нефтяными углеводородами, что приводит к деградации и снижению плодородия почв (Tokbergenova et al., 2025). Такие загрязнения создают серьёзные экологические проблемы, включая подавление активности почвенных микроорганизмов, нарушение структуры почвы и токсическое воздействие на растения. В связи с этим возрастает актуальность разработки экологически безопасных и эффективных методов восстановления почв и повышения их продуктивности. В связи с необходимостью сохранения экологического равновесия и устойчивого использования земельных ресурсов проблема восстановления нефтезагрязнённых почв Казахстана приобретает особую актуальность. Применение традиционных методов очистки нефтезагрязнённых земель, такие как физические и химические способы, часто являются дорогостоящими, энергоёмкими и могут вызывать вторичное загрязнение среды. Поэтому, использование PGPR в сочетании с устойчивыми фитотехнологиями является современной стратегией экологически безопасного восста-

новления загрязнённых почв Казахстана, что делает этот подход особенно актуальным и популярным.

Целью настоящего исследования было скрининг микроорганизмов, на определение их прямых и косвенных свойств, способствующих росту растений в условиях нефтяного загрязнения: секреция сидерофоров, ферментов, фитогормонов, растворение фосфатов и фиксация азота.

### Материалы и методы исследований

**Объект исследования.** Микроорганизмы, выделенные из почвы, ризосферы и тканей растений, выращенных на нефтезагрязненной почве

#### Выявление ферментативной активности у микробных изолятов

**Определение протеазной активности.** Протеолитическую активность бактериальных изолятов оценивали качественно с использованием среды на основе обезжиренного молока (г/л): ферментативный гидролизат казеина – 5; декстроза – 1; дрожжевой экстракт – 2,5; сухое обезжиренное молоко – 1; агар – 20 г/л. После выращивания в среде LB бактериальные изоляты методом штриха пересеивали на среду SMA. Образование зоны гало свидетельствовало о наличии у штамма протеазной активности (Chandran Masi et al., 2021).

**Определение целлюлазной активности.** Метаболитическую активность целлюлазы наблюдали на среде карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). Бактериальные изоляты инокулировали в чашку Петри со средой КМЦ:  $\text{NaNO}_3$  – 0,2%,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  – 0,1%,  $\text{MgSO}_4$  – 0,05%,  $\text{KCl}$  – 0,05 %, соли карбоксиметилцеллюлозы – 0,2 %, пептон – 0,02%, агар – 1,7% и инкубировали при 30°C в течение 2 суток. После инкубации чашки Петри окрашивали красителем Конго красным и промывали. Положительная активность целлюлазы определялась по образованию ореола на красном фоне (Amit Vera et al., 2014).

**Определение амилолитической активности.** Амилолитическую активность изолятов оценивали путем их культивирования на чашках с крахмальным агаром, которые затем подвергали инкубации при 28 °С в течение 48 часов. После этого чашки заливали раствором йодида калия (KI). Затем чашки осушали. Наличие прозрачных бесцветных ореолов вокруг колоний указывало на гидролиз крахмала и продукцию амилазы (Ntabo et al., 2014).

### Характеристика бактерий по признакам, способствующим росту растений

**Синтез соединений ИУК.** Производство ИУК штаммами изучали на среде с 0,1% L – триптофана и измеряли с применением реактива Сальковского (Ji et al., 2014). Штаммы выращивали при 30°C в течение 48 часов. После центрифугирования при 10 000 об. В течение 10 минут супернатанты культур собирали. Затем 2 мл супернатанта смешивали с 4 мл реактива Сальковского и оставляли в темноте при комнатной температуре в течение 30 мин. Появление розового цвета указывает на присутствие ИУК и количество образовавшегося ИУК измеряли с помощью спектрофотометра при 530 н.м. (30 нм (UV-1900, Shimadzu, Киото, Япония). Для сравнения использовали контрольную среду без инокуляции. Концентрацию ИУК в культуре определяли по стандартной кривой ИУК (Gordon & Weber, 1951).

**Определение активности растворения фосфатов.** Способность бактериальных изолятов растворять фосфаты проверяли на среде NBRIP с бромфеноловым синим (для роста фосфатов Национального ботанического исследовательского института), содержащей (г/л): глюкоза – 10,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  – 5,  $\text{MgCl}_2$  – 5,  $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$  – 0,25,  $\text{KCl}$  – 0,2,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  – 0,1 и нерастворимый трикальций фосфат в качестве единственного источника фосфора. Эффективность выделенных штаммов в растворении фосфатов проводилась путем отбора микроорганизмов, способных образовывать прозрачную зону на чашке Петри за счет образования органических кислот в окружающей среде. Штаммы после инкубации при 30 °С в течение 7 суток образовывали прозрачные зоны, что указывало на фосфатсолюбилизирующую активность (Frey-Klett et al., 2005).

**Продукция сидерофоров.** Сидерофорную активность бактериальных изолятов определяли качественно методом посева на среду с реактивом хромазулом S (CAS-реактивом). Среду CAS дополняли гексадецилтриметил аммоний бромидом (НДТМА), катионным растворителем, стабилизирующим комплекс Fe–CAS. Штаммы инкубировали в течение 4-5 суток при 30 °С. Бактерии, продуцирующие сидерофоры, идентифицировали по изменению цвета синей среды и образованию оранжево-желтой зоны (Schwyn&Neilands, 1987).

**Фиксация азота.** Способность штаммов фиксировать азот определяли по росту на сре-

де Эшби (г/л): маннит – 20,0,  $K_2HPO_4$  – 0,2,  $MgSO_4 \times 7H_2O$  – 0,2, NaCl – 0,2,  $K_2SO_4$  – 0,1,  $CaCO_3$  – 5,0, агар-агар – 15,0) (Tran et al., 2024) после 5 дней культивирования при 28 °С. Штаммы считались активными, если рост был обильным в течение 72 часов культивирования. Более низкая скорость роста интерпретировалась как слабый рост.

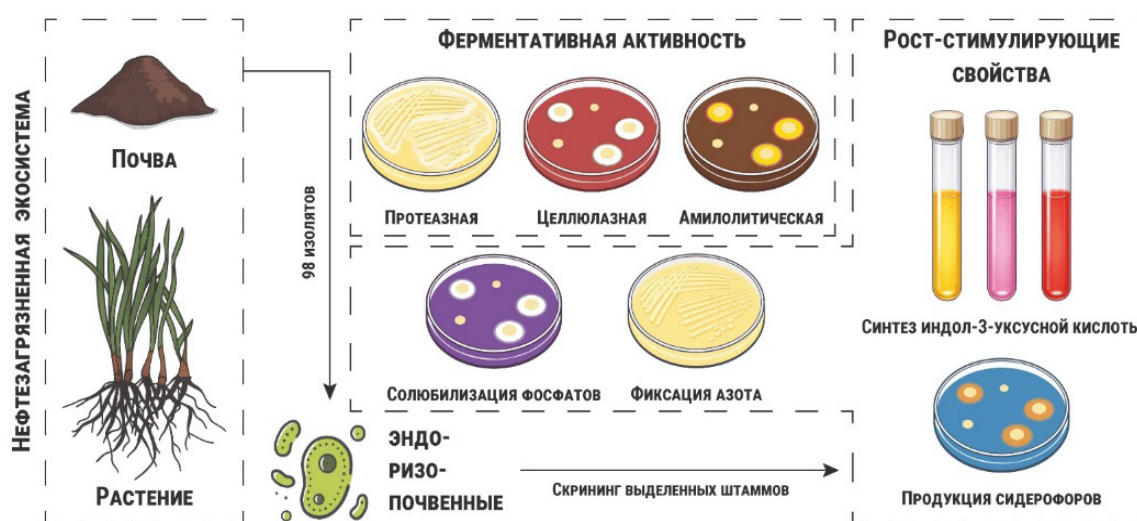
Определение принадлежности изолятов к грамположительным и грамотрицательным

определяли с помощью теста КОН (Suslow et al., 1982).

**Статистический анализ.** Эксперименты проводились в трех повторениях, числовые значения представлены как среднее значение  $\pm$  стандартное отклонение (SD) по трем повторениям.

На рисунке 1 показана схема эксперимента, наглядно оценивающая PGPR свойства, исследуемых изолятов.

**Рисунок 1**  
Дизайн эксперимента



## Результаты и их обсуждение

Выживанию растений в нефтезагрязненной почве способствует ризосферное микробное сообщество благодаря фитостимулирующей активности, а также за счет снижения фитотоксичности загрязнителя вследствие его биодegradации. В связи с этим интерес представляют микроорганизмы, относящиеся к группе PGPR, обладающие фитостимулирующей и деструктивной активностью, в отношении поллютанта (Basu et al., 2021).

Одним из важнейших критериев успешной фиторемедиации является стимуляция роста растений с помощью PGPR за счет продукции фитогормонов, обеспечения биодоступным фосфором, фиксированным азотом, депонированием железа в сидерофорах и синтезом различных ферментов (Lucy et al., 2004). Все перечисленные факторы способствуют к улучшению роста растения в условиях нефтяного стресса.

Использование микроорганизмов, выделенных из мест, загрязнённых нефтяными углеводородами, для стимулирования роста фиторемедиантов является чрезвычайно интересной и инновационной задачей. Местные штаммы более эффективны в колонизации корней растений, чем коммерческие штаммы, поскольку колонизация корней и взаимодействие растений с микроорганизмами индуцируются корневыми экссудатами, кроме того, местные микробные штаммы могут быть метаболически и генетически адаптированы для развития этих процессов. Поэтому, любой штамм, выделенный из такого источника, должен быть подвергнут ряду тестов для определения его потенциального применения (Ejaz et al., 2021).

В общей сложности было выделено 98 изолятов, которые отбирались для изоляции на основе визуальных морфологических различий и физиологических признаков, различающихся по пигментации, размеру, краю колоний или скоро-

сти роста. Из 98 изолированных изолятов – 68 изолятов были выделены из почвы и ризосферы растений фиторемедиантов и 30 изолятов изолированы из тканей. Выделенные изоляты подвергались нескольким этапам скрининга и оценивались различные свойства PGPR, включая растворение фосфата, фиксация азота, секреция индол-3-уксусной кислоты (ИУК), производство сидерофоров и различных гидролитических ферментов.

Исследования показывают, что рост растений выигрывает от взаимодействия с микроорганизмами, особенно в условиях стрессовых факторов окружающей среды, таких как загрязнение почвы, засоление или засуха. Положительное влияние микроорганизмов, населяющих почву, ризосферу или эндосферу, также имеет решающее значение в процессе фиторемедиации, поскольку они могут помогать растениям удалять загрязняющие вещества из почвы путем разложения углеводов, производства ферментов и других факторов для стимулирования роста растений (Montreemuk et al., 2024). Так, например, протеазы осуществляют минерализацию азота, борьбу с фитопатогенами, выявление проблем управления и естественного восстановления деградированных почв (Logi et al., 2024; Majumdar & Chakraborty, 2017).

И поэтому на первом этапе многоступенчатого скрининга проводился отбор изолятов на наличие ферментативной активности. Скрининг на внеклеточную ферментативную активность (амилаза, целлюлаза и протеаза) осуществлялся

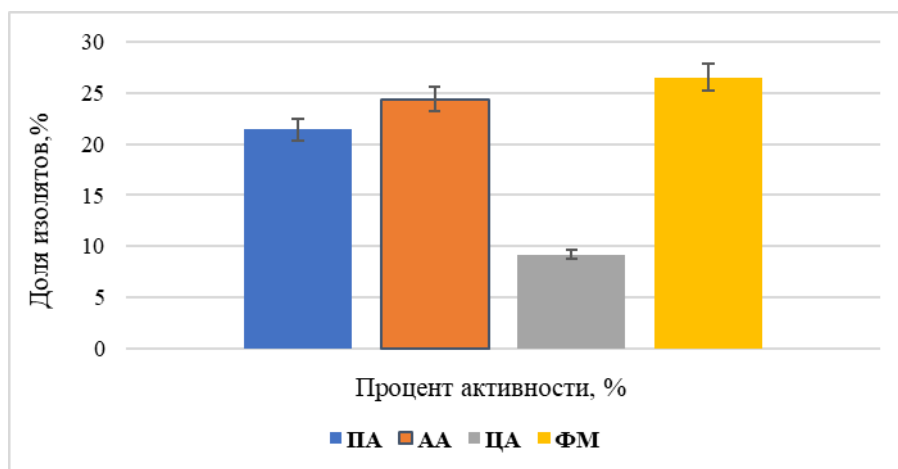
на средах: с крахмалом, казеином и карбоксиметилцеллюлозой. Прозрачный ореол вокруг выросших колоний изолятов указывал на ферментативную активность.

Двадцать один из 98 бактериальных штаммов проявили способность к протеолитической активности на агаровых средах с казеином. По результатам полученных экспериментов 24 изолята показали амилолитическую активность на среде с крахмалом и диаметр зоны гало варьировался от 0,2 до 18 см. Образование прозрачных ореолов соответствовало от 0,7 до 2,5 см. Целлюлозолитическая активность выявлена у 9 изолятов. Данные изоляты были способны создавать зоны ореола диаметром от 0,5 до 1,7 см. Установлено, что 21,4% выделенных бактериальных штаммов (24 изолята) обладали протеолитической активностью, 24,4% – амилолитической, 9,2% – целлюлозолитической активностью (Рисунок 2). Стратегия применения субстратов в средах позволила отобрать штаммы с множественной гидролитической активностью. Так, каждый из исследованных штаммов бактерий продемонстрировал ферментативную активность в отношении 1, 2 или всех протестированных ферментов.

Результаты данных исследований представлены на рисунке 1. Микроорганизмы, обладающие двумя или более гидролитическими способностями, служат важным ресурсом в стратегии по снижению воздействия нефтяных загрязнений на окружающую среду.

**Рисунок 2**

*Количество активных изолятов, обладающих ферментативной активностью*



После первичного скрининга были выбраны 20 изолятов с наилучшей активностью на специфических культуральных средах и демонстрирующих высокую двойную или тройную ферментативную активность и условно обозначенные как N9, N11, MSM12, MSM3, MSM20, MSM21, MSM25, MSM20, V16, L5-2, L5-5, L5-6, L10-2, L10-6, L10-12, L10-10, KP5, KB9, KP10 и C10. Среди исследованных микроорганизмов штаммы N9, MSM3, MSM25, L10-2, L10-12, KP5, KB9, MSM21, KP10, C10 и N11 продемонстрировали двойную гидролитическую активность протеазы и амилазы. Примечательно, что N9, MSM3, MSM21, MSM25, L5-2, L5-5, L5-6 и L10-12 показали тройную гидролитическую активность: протеазы, амилазы и целлюлазы. Таким образом, штаммы, показавшие множественную гидролитическую активность, возможно имеют высокий потенциал применения в процессах биоремедиации.

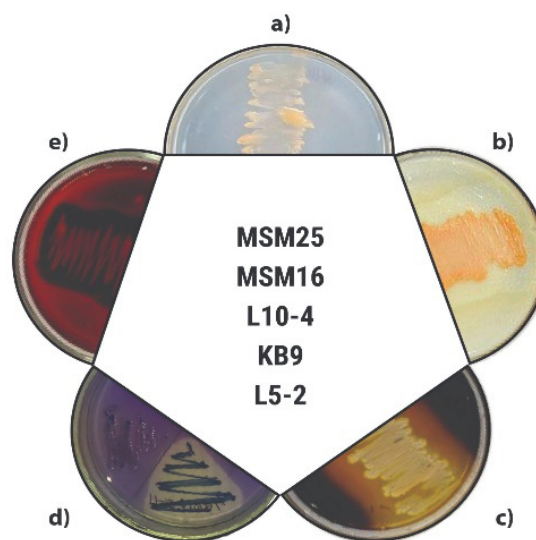
Второй этап скрининга посвящен исследованиям по проверке изолятов на наличие множественных признаков, способствующих росту растений. Оценены такие свойства как способность растворять фосфор, образовывать 3-индолуксусную кислоту, продуцировать сидерофоры и фиксировать молекулярный азот.

Растворение твердых фосфатов является очень распространенной характеристикой среди PGPR микроорганизмов. Такие бактерии играют значительную роль в почве благодаря своей метаболической активности, например растворению сложных форм фосфата в более доступные для растений формы, а также посредством процессов подкисления, хелатирования и реакций обмена (Pan&Cai, 2023). Все изолированные штаммы были проверены на способность растворять неорганический фосфат методом точечного посева бактериальных изолятов на модифицированную среду NBRIP с использованием трикальцийфосфата в качестве субстрата. Образование прозрачных ореолов вокруг бактериальных колоний после 7 дней инкубации при температуре 28°C считалось показателем фосфатрастворяющей активности. Так, из 98 проверенных изолятов 26 (26,5 %) штаммов могли создавать фосфатрастворяющие четкие зоны вокруг своих колоний, что может быть результатом образования органических кислот или полисахаридов, или активности ферментов фосфатазы. Среди исследованных 30 (30,6%) штаммов показали слабый уровень растворять фосфат, а 42 (42,9%) штамма вовсе не продемонстриро-

вали способность к растворению фосфата и не показали зон гало на чашке Петри с NBRIP. Таким образом, было отобрано 26,5 % штаммов с наилучшей способностью растворять фосфор и 5 изолятов проявили ферментативную активность (Рисунок 3).

### Рисунок 3

Изоляты со множественной ферментативной и фосфат-мобилизующей активностями



Примечание: (a) азотфиксирующая активность; (b) протеолитическая активность; (c) амилолитическая активность; (d) фосфатмобилизующая активность; (e) целлюлазная активность;

Эндогенно продуцируемые или экзогенно применяемые органические соединения известны как регуляторы роста и развития растений и оказывают влияние на морфологические и физиологические процессы. Среди таких регуляторов роста растений, наиболее распространенным является продукция ИУК, стимулирующих развитие корневой системы растений. ИУК как представитель группы фитогармонов, обычно считается наиболее важным природным ауксином (Kadmiri et al., 2018; Singh & Jha, 2017). В связи с чем проведен скрининг, заключающийся в отборе PRRB, продуцирующих индолуксусную кислоту. Штаммы были протестированы на продукцию ИУК колориметрическим методом с помощью реактива Сальковского и гарантирующего присутствие гормона в супернатанте инокулянтов по появлению ярко красной окраски. Так, образование индолуксусной кислоты было

характерно почти для всех выделенных 98 штаммов. Однако, уровень образования ИУК варьировался от 1,2 до 159 мкг/мл в зависимости от штамма. В зависимости от количества синтезируемого ИУК штаммы были разделены на группы: низко (от 1 до 11 мкг/мл), средне (от 12 до 20) и высокопродуктивные (свыше 20 мкг/мл).

Из 98 протестированных изолятов в группу низкопродуцирующие ИУК были включены 54 изолята, которые синтезировали различное количество ауксина, варьирующееся от 0,5 до 11 мкг/мл и это составило 55,1 %. А ко второй группе были отнесены 22 штамма, продуцирующие ИУК в пределах от 14 до 19,5 мкг/мл или 22,4 %. Так, относительно высокое содержание ИУК свыше 22 мкг/мл было выявлено у 21 штаммов (21,4 %), среди них 10 штаммов (10,2 %) оказались лучшими продуцентами ИУК MSM17, N11, NB14, N10, V23, Cab11, C11, L10-11, LbB7 и LbP9 показали самый высокий уровень ИУК от 59 до 159 мкг/мл. Уровни продукции ИУК, близкие к 50 мкг/мл или превышающие их, обычно считаются высокими.

Некоторые исследования указывают на то, что свободноживущие (Chaudhary et al., 2002) и симбиотические азотфиксирующие бактерии обладают потенциалом утилизации углеводов. Эти факты указывают на возможное наличие почвенных бактерий, обладающих комбинированным потенциалом для утилизации углеводов, фиксации азота, а также устойчивости к нефтяным загрязнениям. Поэтому, отобранные бактерии, обладающие возможностью к фиксации азота, могут стать ценными биологическими системами, улучшающими биоремедиацию почв, загрязненных нефтью (Sorkhoh et al., 2010).

Для скрининга изолятов на способность к фиксации азота использовалась безазотистая среда Эшби. Изоляты высевали на поверхность среды и инкубировали в течение 3-5 дней при 28°C. Образование хорошего роста колонии свидетельствовало о способности изолята к фиксации азота. Из 98 проверенных только 30 изолятов фиксировали азот. Кроме того, 3 штамма (Cab11, C11 и MSM25) продуцировали слизь, что является косвенным признаком того, что они синтезируют экзополисахарид.

Одним из факторов, лимитирующих скорость разложения углеводов микробными сообществами, является доступность и потребность питательных веществ, включая железо. Микроорганизмы, связанные с ризосферой,

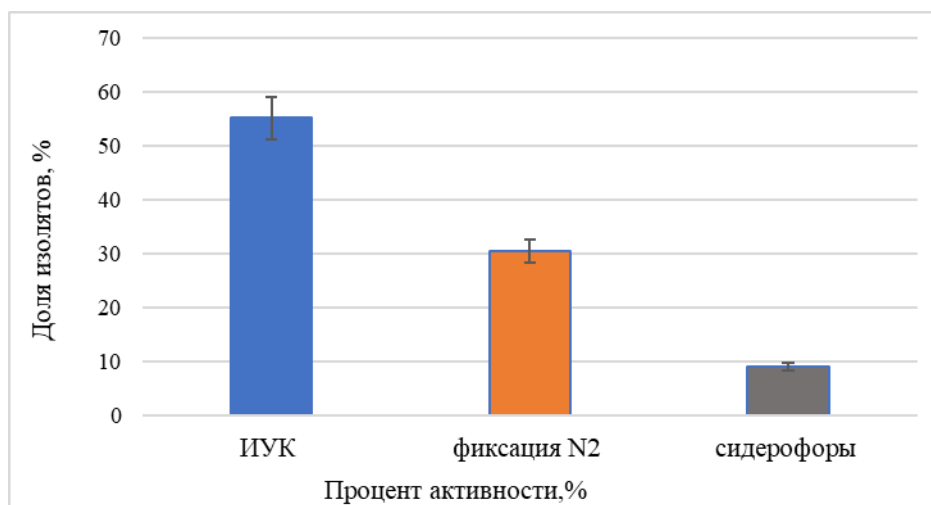
продуцируют широкий спектр сидерофоров. Известно, что сидерофоры, синтезуемые бактериями, участвуют в биodeградации нефтяных углеводов посредством косвенного механизма, облегчая усвоение железа деградирующими микроорганизмами в случае дефицита железа (Barbeau et al., 2002).

На следующем этапе скрининга все 98 выделенных микроорганизмов были исследованы на предмет продукции сидерофоров. Для обнаружения сидерофоров проводили инокуляцию изолятов в течение 72 часов при 30 °C на среду CAS (Lynne et al., 2011). Сидерофор-положительными считали те изоляты, у которых наблюдали изменение цвета с синего на оранжевый вокруг инокулированной области. Так, 9,1% или 9 изолятов, у которых при скрининге на агаровой среде CAS было обнаружено наличие сидерофор, остальные изоляты 89, 9% не образовывали оранжевые зоны гало на среде (Рисунок 4). Таким образом, штаммы, продуцирующие сидерофоры, являются экологически чистыми и устойчивыми агентами, которые могут способствовать процессам ремедиации и могут оказать влияние в борьбе со стрессом растений. Отбор перспективных штаммов бактерий, секретирующих сидерофоры могут выступать как потенциальные инокулянты в существующих методах очистки и могут применяться как перспективная и экологически безопасная стратегия для эффективного восстановления нефтезагрязненных почв (Ahmed & Holmström, 2014).

Из 98 изолятов 12 (MSM16, MSM21, MSM25, L5-6, L5-5, L5-2, L10-11, L10-4, L10-12, KP5, KB9 и C10) показали одновременно положительный результат по четырем признакам (ИУК, растворение фосфатов, фиксацию и образованию сидерофоров), способствующим росту растений (Рисунок 3). Кроме того, штамм MSM25 показал шесть признаков, повышающих рост растений: ИУК, растворение фосфатов, фиксацию азота, образованию сидерофоров, обладал амилотической и целлюлозолитической активностью. Штаммы MSM16 и N10 показали положительный результат по всем пяти PGPR признакам, как синтез ИУК, растворение фосфатов, фиксация азота, образование сидерофоров и целлюлозолитической активностью. Штаммы MSM21, L5-5, L5-2 и L5-6 демонстрировали следующие свойства PGPR: фиксация азота, растворение фосфатов, образование сидерофоров и проявили активность протеазы, амилазы и целлюлазы.

**Рисунок 4**

Количество активных изолятов, обладающих PGPR свойствами



Штаммы L10-4, L10-12, KP5, KB9 и C10 обладали рядом свойств как продукция ИУК, растворение фосфата, фиксация азота, образование сидерофор, кроме того, продуцировали протеазу, амилазу и целлюлазу.

Таблица 1 отражает результаты качественной оценки признаков, связанных с ростостимулирующими свойствами растений такими как: продукция ИУК, фиксация азота, солюбилизация фосфора, что важно при выборе кандидатов-биоинокулянтов для стимулирования развития растений.

Среди исследованных культур большинство (76) штаммов являются грамположительными, что составляет 77,5%, а остальными 12 штаммов (11,7%) оказались грамотрицательными. Настоящее исследование показало, что большинство штаммов, продуцирующих ИУК, являются грамположительными. Из данных литературы следует, что некоторые грамположительные штаммы относятся к бактериям рода *Bacillus*, известным своей способностью продуцировать ИУК (Wahyudi et al., 2011).

**Таблица 1**

Ранжирование изолятов по количеству PGPR-признаков

Изоляты	Кол-во PGPR-признаков	Признаки
L10-4, L10-12, KP5, KB9, C10	7	ИУК; растворение фосфатов; фиксация азот; сидерофоры; протеолитическая, амилитическая и целлюлозолитическая активности
MSM25	6	ИУК; растворение фосфатов; фиксация азота; сидерофоры; амилитическая и целлюлозолитическая активности
MSM21, L5-5, L5-2, L5-6	6	фиксация азота; растворение фосфатов; сидерофоры; протеолитическая, милолитическая и целлюлозолитическая активности
MSM16, N10	5	ИУК; растворение фосфатов; фиксация азота; сидерофоры; целлюлозолитическая активность
MSM16, MSM21, MSM25, L5-6, L5-5, L5-2, L10-11, L10-4, L10-12, KP5, KB9,	4	ИУК; растворение фосфатов; фиксация азота; сидерофоры

Результаты исследований показывают, что отборанные штаммы представляют собой перспективных кандидатов для использования в качестве биоинокулянтов, предлагая устойчивую и экологически чистую стратегию биоремедиации почв, загрязненных нефтяными углеводородами. Благодаря этим прямым и косвенным эффектам, вызываемым PGPR, они являются идеальными кандидатами для разработки и коммерциализации в качестве биоинокулянтов и фитопротекторных микробных продуктов. Эффективные многофункциональные штаммы могут быть использованы в качестве биоинокулянтов как отдельные штаммы, так и в комбинации для биоремедиации нефтезагрязнённых почв.

### Конфликт интересов

Авторы подтверждают, что ознакомлены с содержанием статьи и не имеют конфликта интересов.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта №АР23489379 «Фитостратегия: восстановление

почв Атырауской области, загрязненных углеводородами с использованием растений и биоинокулянтов» на 2024–2026 гг. при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

### Вклад авторов

*Бержанова Р.Ж.:* разработка концепции, методология, научное руководство, управление проектом, редактирование и доработка рукописи.

*Мукашева Т.Д.:* разработка концепции, научное руководство, редактирование и доработка рукописи.

*Бектилеуова Н.К.:* формальный анализ, валидация данных, редактирование и доработка рукописи

*Абай Г.:* проведение исследования, сбор и обработка данных, валидация данных

*Сатыбалды Е.С.:* проведение исследования, сбор и обработка данных, валидация данных

*Сыдыкбекова Р.К.:* формальный анализ, валидация данных, редактирование и доработка рукописи.

### Литература

- Ahmed, E., & Holmström, S. J. M. (2014). Siderophores in environmental research: Roles and applications. *Microbial Biotechnology*, 7(3), 196–208. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12117>
- Bera, A., Ghosh, A., Mukhopadhyay, A., Chattopadhyay, D., & Chakrabarti, K. (2014). Improvement of degummed ramie fiber properties upon treatment with cellulase secreting immobilized *A. larrymoorei*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 38, 341–351. <https://doi.org/10.1007/s00449-014-1274-6>
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & El Enshasy, H. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Barbeau, K., Zhang, G. P., Live, D. H., & Butler, A. (2002). Petrobactin, a photoreactive siderophore produced by the oil-degrading marine bacterium *Marinobacter hydrocarbonoclasticus*. *Journal of the American Chemical Society*, 124, 378–379. <https://doi.org/10.1021/ja0119088>
- Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., & Tuteja, N. (2014). Biofertilizers function as key players in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microbial Cell Factories*, 13, 1–10.
- Chandran Masi, M., Gemechu, G., & Tafesse, M. (2021). Isolation, screening, characterization, and identification of alkaline protease-producing bacteria from leather industry effluent. *Annals of Microbiology*, 71, 24. <https://doi.org/10.1186/s13213-021-01631-x>
- Chaudhary, D. K., Bajagain, R., Jeong, S.-W., & Kim, J. (2019). Development of a bacterial consortium comprising oil-degraders and diazotrophic bacteria for elimination of exogenous nitrogen requirement in bioremediation of diesel-contaminated soil. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(7), 99. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2674-1>
- Frey-Klett, P., Chavatte, M., Clausse, M. L., Courrier, S., Roux, C. L., Raaijmakers, J., et al. (2005). Ectomycorrhizal symbiosis affects functional diversity of rhizosphere fluorescent pseudomonads. *New Phytologist*, 165, 317–328.
- Gordon, S. A., & Weber, R. P. (1951). Colorimetric estimation of indoleacetic acid. *Plant Physiology*, 26, 192–195. <https://doi.org/10.1104/pp.26.1.192>
- Ji, S. H., Gururani, M. A., & Chun, S. C. (2014). Isolation and characterization of plant growth promoting endophytic diazotrophic bacteria from Korean rice cultivars. *Microbiological Research*, 169, 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.06.003>
- Kadmiri, I. M., Chouaoui, L., Azaroual, S. E., Sijilmassi, B., Yaakoubi, K., & Wahby, I. (2018). Phosphate-solubilizing and auxin-producing rhizobacteria promote plant growth under saline conditions. *Arabian Journal of Science and Engineering*, 43, 3403–3415.

- Pan, L., & Cai, B. (2023). Phosphate-solubilizing bacteria: Advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects. *Microorganisms*, *11*(12), 2904. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122904>
- Lori, M., Symnaccik, S., Mäder, P., De Deyn, G., & Gattinger, A. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—A meta-analysis and meta-regression. *PLoS ONE*, *12*(7), e0180442.
- Lucy, M., Reed, E., & Glick, B. R. (2004). Applications of free-living plant growth promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, *86*(1), 1–25. <https://doi.org/10.1023/B:ANTO.0000024903.10757.6e>
- Lynne, A. M., Haarmann, D., & Loudon, B. C. (2011). Use of blue agar CAS assay for siderophore detection. *Journal of Microbiology & Biology Education*, *12*, 51–53. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v12i1.249>
- Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., & Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: A potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 3315–3335.
- Majumdar, S., & Chakraborty, U. (2017). Optimization of protease production from plant growth promoting *Bacillus amyloliquefaciens*. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, *8*, 635–642.
- Montreemuk, J., Stewart, T. N., & Prapagdee, B. (2024). Bacterial-assisted phytoremediation of heavy metals: Concepts, current knowledge, and future directions. *Environmental Technology & Innovation*, *33*, 103488. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103488>
- Ejaz, M., Zhao, B., Wang, X., Bashir, S., Haider, F. U., Aslam, Z., Khan, M. I., Shabaan, M., Naveed, M., & Mustafa, A. (2021). Isolation and characterization of oil-degrading *Enterobacter* sp. from naturally hydrocarbon-contaminated soils. *Applied Sciences*, *11*(8), 3504. <https://doi.org/10.3390/app11083504>
- Ntabo, R. M., Nyamache, A. K., Lwande, W., Kabii, J., & Nonoh, J. (2018). Enzymatic activity of endophytic bacterial isolates from selected mangrove plants in Kenya. *Open Microbiology Journal*, *12*, 354–363.
- Hosseini, S., Sharifi, R., & Habibi, A. (2025). Efficient bioremediation of crude oil contaminated soil by a consortium of in-situ biosurfactant producing hydrocarbon-degraders. *Scientific Reports*, *15*, 19852. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05035-8>
- Schwyn, B., & Neilands, J. B. (1987). Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Analytical Biochemistry*, *160*, 47–56.
- Singh, R. P., & Jha, P. N. (2017). The PGPR *Stenotrophomonas maltophilia* SBP-9 augments resistance against stress in wheat plants. *Frontiers in Microbiology*, *8*, 1945. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01945>
- Sorkhoh, N. A., Ali, N., Dashti, N., Al-Mailem, D. M., Al-Awadhi, H., Eliyas, M., & Radwan, S. S. (2010). Soil bacteria with combined potential for oil utilization, nitrogen fixation, and mercury resistance. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *64*(3), 226–231.
- Suslow, T. V., Schroth, M. N., & Isaka, M. (1982). Application of a rapid method for Gram differentiation of bacteria. *Phytopathology*, *72*, 917–918. <https://doi.org/10.1094/phyto-72-917>
- Tokbergenova, A., Skorintseva, I., Ryskeldiyeva, A., Kaliyeva, D., Salmurzauly, R., & Mussagaliyeva, A. (2025). Assessment of anthropogenic disturbances of landscapes: West Kazakhstan region. *Sustainability*, *17*(2), 573. <https://doi.org/10.3390/su17020573>
- Tran, V. C., Mai, P. T. T., Giang, N. T., Hien, L. V., Tuan, N. M., Hai, N. T., Anh, H. T. L., & Khuong, N. Q. (2024). Isolation, selection, and biological evaluation of nitrogen-fixing bacteria from paddy soils in Vietnam. *The Open Agriculture Journal*. <https://doi.org/10.2174/0118743315298974240313043427>
- Wahyudi, A. T., Astuti, R. P., Widyawati, A., Meryandini, A., & Nawangsih, A. A. (2011). Characterization of *Bacillus* sp. strains isolated from soybean rhizosphere. *Journal of Microbiology and Antimicrobials*, *3*, 34–40.
- Zandi, P., & Basu, S. K. (2016). Role of plant growth-promoting rhizobacteria as biofertilizers. In D. Nandwani (Ed.), *Organic farming for sustainable agriculture* (pp. 71–87). Springer.

#### **Сведения об авторах:**

Р.Ж. Бержанова – ассоциированный профессор кафедры биотехнологии КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: ramza05@mail.ru).

Т.Д. Мукашева – профессор кафедры биотехнологии КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: mtogzhan@mail.ru).

Н.К. Бектилеуова – докторант 2 курса обучения кафедры биотехнологии КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: nurgul210979@gmail.com).

Г. Абай – старший научный сотрудник ТОО «BioClean» (Алматы, Казахстан, e-mail: abay.gk@mail.ru).

Е.С. Сатыбалды – магистрант 2 курса обучения кафедры биотехнологии КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: satybaldyelnur49@gmail.com).

Р.К. Сыдыкбекова – ассоциированный профессор кафедры биотехнологии КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: raihan\_07\_77@mail.ru).

#### **Information about the authors:**

R. Berzhanova – Associate Professor of the Department of Biotechnology of Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: ramza05@mail.ru).

T. Mukasheva – Professor of the Department of Biotechnology of Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: mtogzhan@mail.ru).

N. Bektileuova – 2nd-year doctoral student of the Department of Biotechnology of Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: nurgul210979@gmail.com).

*G. Abay – Senior Researcher at BioClean LLC (Almaty, Kazakhstan, e-mail: abay.gk@mail.ru).*

*E. Satybaldy – 2nd-year Master’s student of the Department of Biotechnology of Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: satybaldyelnur49@gmail.com).*

*R. Sydykbekova – Associate Professor of the Department of Biotechnology of Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: raihan\_07\_77@mail.ru).*

**Авторлар туралы мәлімет:**

*Р.Ж. Бержанова – биотехнология кафедрасының қауымдастырылған профессоры әль-Фараби атындағы ҚазҰУ (Алматы, Қазақстан, e-mail: ramza05@mail.ru).*

*Т. Д. Мукашева – биотехнология кафедрасының профессоры әль-Фараби атындағы ҚазҰУ (Алматы, Қазақстан, e-mail: mtogzhan@mail.ru).*

*Н.К. Бектилеуова – биотехнология кафедрасының 2 курс докторанты әль-Фараби атындағы ҚазҰУ (Алматы, Қазақстан, e-mail: nurgul210979@gmail.com).*

*Г. Абай – ЖШС «BioClean» аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, эл. почта: abay.gk@mail.ru)*

*Е.С. Сатыбалды – биотехнология кафедрасының 2 курс магистранты әль-Фараби атындағы ҚазҰУ (Алматы, Қазақстан, e-mail: satybaldyelnur49@gmail.com).*

*Р.К. Сыдыкбекова – биотехнология кафедрасының қауымдастырылған профессоры әль-Фараби атындағы ҚазҰУ (Алматы, Қазақстан, e-mail: raihan\_07\_77@mail.ru).*

*Поступила 5 ноября 2025 года*

*Принята 25 марта 2026 года*

С.М. Романова\* , А.С. Серикова , Р.Е. Махмутова 

РГП «Институт зоологии» КН МНВО РК, Алматы, Казахстан

\*e-mail: sofiyarom@mail.ru

## РЕЖИМ И ДИНАМИКА ИОННО-СОЛЕВОГО СОСТАВА ВОДЫ ВОДОХРАНИЛИЩА ТАСОТКЕЛЬ И ЕГО ПРИТОКОВ (2014–2023 гг.)

Приведены результаты многолетнего изменения минерализации и ионно-солевого состава воды одного из важнейших мелиоративных сооружений Казахстана – водохранилища Тасоткель на р. Шу, используемого в основном для орошения 42,1 тыс. га земель в Шуском и Мойынкумском районах Жамбылской области. Рассмотрено влияние основных притоков (Карабалта, Аксу, Токтас) на формирование химического состава воды водохранилища.

Установлено, что в период с 2014 по 2023 гг. общая минерализация воды в водохранилище Тасоткель изменялась в пределах 289,3–714,2, составляя в среднем  $556,9 \pm 11,0$  мг/дм<sup>3</sup>, и незначительно отличается от средней минерализации воды верхнего участка реки Шу  $541,5 \pm 14,0$  мг/дм<sup>3</sup>. Более высокую минерализацию воды имеют притоки Карабалта  $1316,9 \pm 50,9$  мг/дм<sup>3</sup>, Аксу  $773,4 \pm 16,8$  мг/дм<sup>3</sup> и Токтас  $1050,0 \pm 38,0$  мг/дм<sup>3</sup>. В их ионном составе чаще преобладают сульфатные ионы и ионы натрия или магния. Во все сезоны года, кроме осеннего периода, вода водохранилища была карбонатно-кальциевого состава. Осенью вода водохранилища по классификации О.А. Алекина относилась к сульфатному классу, магниевой или натриевой группе второго типа. В этот период преобладающими солями становились  $MgSO_4$  и  $Na_2SO_4$ , привносимые притоками.

Выявлено, что в нижнем течении реки Шу (п. Конаев) зафиксировано увеличение минерализации воды на  $80,1 \pm 13,4$  мг/дм<sup>3</sup> по сравнению с верхним участком. В последние три года исследования (2021–2023 гг.) наблюдалось более высокое среднегодовое значение минерализации воды рек Сарыкау ( $1204,6 \pm 54,7$ ), Карабалта ( $1396,9 \pm 60,2$ ), Аксу ( $812,3 \pm 23,2$ ) и Токтас ( $1153,8 \pm 58,9$ ) по сравнению с предыдущими годами, соответственно, Сарыкау ( $1114,0 \pm 203,4$ ), Карабалта ( $1176,9 \pm 86,8$ ), Аксу ( $725,2 \pm 21,2$ ) и Токтас ( $925,0 \pm 49,5$ ).

Относительно низкая минерализация воды Тасоткельского водохранилища (меньше 1 г/дм<sup>3</sup>) и преобладание гидрокарбонатных солей кальция оказывает благоприятное мелиоративное влияние на солонцеватые и щелочные почвы района исследования. В случае использования воды рек Карабалта, Токтас и Шу для орошения или технических целей возможно образование твердых солей карбоната и сульфата кальция. Вероятность интенсивного осаждения этих солей увеличивается при нагревании воды, что может привести к образованию накипи и засорению технического оборудования.

**Ключевые слова:** Тасоткель, минерализация, ионно-солевой состав, гидрохимия, формирование химического состава воды, экология.

S.M. Romanova\*, A.S. Serikova, R.E. Makhmutova

«Institute of Zoology», Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: sofiyarom@mail.ru

### Regime and dynamics of the ion-salt composition of the Tasotkel reservoir and its tributaries (2014–2023)

This article examines the multi-year (2014–2023) changes in mineralization and the ionic-salt composition of one of Kazakhstan's most important reclamation structures the Tasotkel Reservoir on the Shu River. This reservoir serves as a primary water supply source for agriculture in the Shu and Moiynkum districts of the Zhambyl region and is used for irrigating 42.1 thousand hectares of land. The study analyzes the impact of the main tributaries (Karabalta, Aksu, and Toktas) on the formation of the reservoir's chemical composition.

Between 2014 and 2023, the mineralization of the Tasotkel Reservoir varied within 289,3–714,2, averaging  $(556,9 \pm 11,0)$  mg/dm<sup>3</sup>, which is not significantly different from the average mineralization of the upper section of the Shu River ( $541,5 \pm 14,0$ ) mg/dm<sup>3</sup>. However, the high mineralization of the Karabalta ( $1316,9 \pm 51,0$ ), Aksu ( $773,4 \pm 16,8$ ), and Toktas ( $1050,0 \pm 38,0$ ) rivers did not have a significant impact on the overall salinity of the reservoir. Throughout all seasons except autumn, the reservoir water

was of a carbonate-calcium composition. During autumn, according to Alekin O.A.'s classification, the water belonged to the sulfate class and the magnesium or sodium group of the second type. During this period,  $MgSO_4$  and  $Na_2SO_4$  salts predominated, which was linked to the influence of the tributaries.

In the lower reaches of the Shu River (near Konaev settlement), an increase in water mineralization by  $80,1 \pm 13,4$  mg/dm<sup>3</sup> was recorded compared to the upper section. Over the last three years (2021–2023), the average annual mineralization of the Sarykau ( $1204,6 \pm 54,7$ ), Karabalta ( $1396,9 \pm 60,2$ ), Aksu ( $812,3 \pm 23,2$ ), and Toktas ( $1153,8 \pm 58,9$ ) rivers was higher compared to previous years: Sarykau ( $1114,0 \pm 203,4$ ), Karabalta ( $1176,9 \pm 86,8$ ), Aksu ( $725,2 \pm 21,2$ ), and Toktas ( $925,0 \pm 49,5$ ), respectively.

The relatively low mineralization of the Tasoitel Reservoir water (less than 1 g/dm<sup>3</sup>) and the predominance of calcium bicarbonate have a beneficial reclamation effect on the saline and alkaline soils of the study area. However, using water from the Karabalta, Toktas, and Shu rivers for irrigation or technical purposes may lead to the formation of solid calcium carbonate and calcium sulfate salts. The likelihood of intensive precipitation of carbonate and sulfate salts increases when the water is heated, potentially leading to scale formation and clogging of technical equipment.

**Keywords:** Tasoitel, mineralization, ionic-salt composition, hydrochemistry, water chemical composition formation, ecology

С.М. Романова\*, А.С. Серікова, Р.Е. Махмутова

ҚР ҒЖБМ ҒК «Зоология институты» ШЖК РМК, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: sofiyarom@mail.ru

### Тасоткел су қоймасы және оның салаларындағы судың иондық-тұздық құрамы режимі мен динамикасы (2014–2023 ж.)

Мақалада Қазақстандағы маңызды мелиорациялық нысандардың бірі – Жамбыл облысының Шу және Мойынқұм аудандарында ауыл шаруашылығын сумен қамтамасыз етуге арналған және 42,1 мың га жерді суаруға пайдаланылатын Шу өзеніндегі Тасоткел су қоймасының минерализациясы мен ионды-тұздық құрамының 2014–2023 жылдардағы өзгерістері зерттелді. Зерттеу барысында негізгі салалардың (Қарабалта, Ақсу, Тоқтас) су қоймасындағы химиялық құрамның қалыптасуына әсері қарастырылды.

2014–2023 жылдар аралығында Тасоткел су қоймасындағы судың минерализациясы 289,3–714,2, шегінде өзгеріп, орташа мәні ( $556,9 \pm 11,0$ ) мг/дм<sup>3</sup> құрады, бұл Шу өзенінің жоғарғы ағысындағы орташа минерализациядан ( $541,5 \pm 14,0$ ) мг/дм<sup>3</sup> айтарлықтай айырмашылығы жоқ. Алайда Қарабалта ( $1316,9 \pm 51,0$ ), Ақсу ( $773,4 \pm 16,8$ ) және Тоқтас ( $1050,0 \pm 38,0$ ) өзендеріндегі судың жоғары минерализациясы су қоймасының жалпы тұздылығына айтарлықтай әсер етпеді. Күз мезгілінен басқа барлық маусымдарда су қоймасының суы карбонатты-кальцийлі құрамда болды. Ал күзде судың химиялық құрамы Алекин О.А. классификациясы бойынша сульфатты класқа, екінші типтің магний немесе натрий тобына жататыны анықталды. Бұл кезеңде  $MgSO_4$  және  $Na_2SO_4$  тұздары басым болды, бұл су қоймасына құятын өзендердің әсерімен байланысты.

Шу өзенінің төменгі ағысында (Қонаев кенті) судың минерализациясы жоғарғы ағысқа қарағанда  $80,1 \pm 13,4$  мг/дм<sup>3</sup> жоғары екені анықталды. Соңғы үш жылда (2021–2023 ж.) Сарықау ( $1204,6 \pm 54,7$ ), Қарабалта ( $1396,9 \pm 60,2$ ), Ақсу ( $812,3 \pm 23,2$ ) және Тоқтас ( $1153,8 \pm 58,9$ ) өзендеріндегі минерализацияның орташа жылдық мәні алдыңғы жылдармен салыстырғанда жоғары болды: сәйкесінше, Сарықау ( $1114,0 \pm 203,4$ ), Қарабалта ( $1176,9 \pm 86,8$ ), Ақсу ( $725,2 \pm 21,2$ ) және Тоқтас ( $925,0 \pm 49,5$ ).

Тасоткел су қоймасындағы судың салыстырмалы түрде төмен минерализациясы (1 г/дм<sup>3</sup>-ден төмен) және кальций гидрокарбонатының басым болуы зерттелген аймақтың сортаң және сілтілі топырақтарына жағымды мелиорациялық әсер етеді. Ал Қарабалта, Тоқтас және Шу өзендерінің суын суару немесе техникалық мақсаттарда пайдалану кезінде кальций карбонаты мен кальций сульфатының қатты тұздарының түзілуі мүмкін. Әсіресе, судың қыздырылуы карбонат пен сульфат тұздарының қарқынды шөгу ықтималдығын арттырып, бұл техникалық жабдықтардың бітелуіне және қақтың пайда болуына әкелуі мүмкін.

**Түйін сөздер:** Тасоткел, минерализация, ионды-тұздық құрам, гидрохимия, судың химиялық құрамының қалыптасуы, экология

## Введение

Тасоткельское водохранилище, построенное на р. Шу, является основным водосборником и используется в основном для орошения 42,1 тыс.

га земель в Шуском и Мойынқумском районах Жамбылской области республики Казахстан. В настоящее время в Казахстане эрозии подверглось около 180 млн га земель, что составляет 60% территории страны. Из них 41% дегради-

ровало вследствие засоления (Esembekova & Esengeldieva, 2019; Kovda, 2008). В Жамбылской области подземные воды являются основным источником питьевого водоснабжения населения, тогда как поверхностные воды преимущественно используются для нужд сельского хозяйства.

Несмотря на наличие данных о составе воды реки Шу и подземных вод (Kaziev et al., 1971; Zaurbek, 2005; Starodubtsev & Truskavetskii, 2007; Kunshygar & Kulebaev, 2011; Klimentko et al., 2022), исследование формирования химического состава воды Тасоткельского водохранилища и его изменение в многолетнем цикле до сих пор не были полноценно изучены. В связи с этим актуальны исследования ионно-солевого состава Тасоткельского водохранилища и ее притоков.

В работе использованы основные гидрохимические показатели воды Тасоткельского водохранилища и ее притоков за период 2014–2023 гг., опубликованные в Информационных бюллетенях, а также каталожные сведения Казгидромета (Kazhydromet, 2014–2023).

Целью исследования является оценка сезонных и годовых изменений ионно-солевого состава воды водохранилища, а также влияние его притоков Аксу, Токтас, Карабалта и реки Шу на формирование качественного и количественного состава воды.

Тасоткель – одно из крупнейших водохранилищ в южной части Жамбылской области. Оно расположено на реке Шу, недалеко от границы с Кыргызстаном. Водоохранилище было построено в 1963 году, а в 1974 году прошло реконструкцию и было повторно введено в эксплуатацию. Его общий объем составляет 620 млн м<sup>3</sup>, однако, согласно указанию областного комитета, из-за сейсмической опасности было разрешено наполнять водохранилище только до отметки 516,0 м, что соответствует объему 420 млн м<sup>3</sup> (Krutov, 2020). Длина водохранилища составляет 18 км, максимальная ширина – 8,5 км, максимальная глубина – 23 м, средняя глубина – 8,1 м. Тасоткель является одним из важнейших мелиоративных сооружений Казахстана. Вдоль его берегов расположены различные природные станции и пастбища.

*Река Шу* протекает по территории Казахстана и Кыргызстана, охватывая Кордайский, Шуский, Мойынкумский и Сарысуский районы Жамбылской области. Она формируется в результате слияния рек Жуанарык и Кошкаркол, берущих начало с ледников Терской Алатау и

Киргизского хребта, и впадает в Ащыколь-Акжайкынскую впадину. Общая длина Шу составляет 1186 км, из которых 850 км проходят по территории Казахстана. Площадь водосборного бассейна – 200,36 тыс. км<sup>2</sup>, из них 164,56 тыс. км<sup>2</sup> принадлежат Казахстану. У реки Шу около 80 притоков. В среднем течении ширина русла составляет 50–100 м, в нижнем – 40–60 м. Основные источники питания – ледниковые, снеговые, подземные и дождевые воды.

Река Карабалта расположена в долине Шу и протекает с юга на север вдоль уклона. Ее общая длина – 129 км, из которых 26 км находятся на территории Казахстана. Ширина русла составляет 4–6 м, на некоторых участках достигает 6–12 м. Глубина реки варьирует от 0,2 до 1,0 м, скорость течения – 0,5–2,0 м/с, площадь водосбора – 577 км<sup>2</sup>. Основное питание реки обеспечивается ледниковыми и талыми снеговыми водами. Почвы вдоль реки сложены аллювиально-пролювиальными отложениями неоген-четвертичного возраста, состоящими из крупнозернистых песчано-глинистых пород (Samibaeva, 2018).

На территории Кыргызстана, в городе Карабалта, с 1955 года функционирует Кара-Балтинский горно-обогатительный комбинат, занимающий площадь 550 км<sup>2</sup>.

*Река Токтас (Токташ)* протекает по территории Меркенского и Шуского районов. Ее общая длина составляет 115 км, из которых 32 км находятся в Казахстане, площадь водосбора – 660 км<sup>2</sup>. Исток реки расположен на ледниках Киргизского хребта. В верхнем и среднем течении она протекает через крутые обрывистые ущелья. Питание реки осуществляется за счет снеговых, ледниковых и подземных вод. В зимний период (декабрь–февраль) русло замерзает. Берега реки используются как сенокосные угодья. Вода активно применяется для орошения сельскохозяйственных угодий.

Река Аксу – левый приток Шу, берет начало на северных склонах Киргизского хребта. Длина реки составляет 155 км, из них 20,09 км находится в Казахстане, площадь водосбора – 483 км<sup>2</sup>. В бассейне реки насчитывается 5 малых притоков общей длиной 5 км и несколько небольших озер общей площадью более 4,2 км<sup>2</sup>. Основное питание обеспечивается ледниковыми и снеговыми водами. Около 70% годового стока приходится на период с мая по июль. Вода пресная, средняя минерализация составляет 130–140 мг/дм<sup>3</sup> (по данным 2003 года). Вода реки Аксу широко ис-

пользуется для орошения сельскохозяйственных угодий (Ayagan, 2003).

*Река Сарыкау* в пределах территории Кыргызстана называется Саргоу, однако информация о ней весьма ограничена. Основные гидрохимические показатели и расход воды приведены только Казгидрометом [7–8].

Территория Жамбылской области относится к зоне расположения Шу-Сарысуйского бассейна, который представляет собой крупную гидрогеологическую структуру, включающую пористые и пластовые подземные воды. Данный бассейн характеризуется мощными неоген-кайнозойскими рыхлыми отложениями. Основными источниками питания пресных и слабоминерализованных подземных вод являются Киргизский Алатау и хребет Каратау.

Общий расход подземных вод составляет 261,19 м<sup>3</sup>/с, из которых воды с минерализацией до 1 г/л – 172,84 м<sup>3</sup>/с, а воды с минерализацией от 1 до 3 г/л – 87,36 м<sup>3</sup>/с. Мухамеджановым М.А. установлено, что изменение климатических условий не оказало значительного влияния на формирование подземных водных ресурсов в данном регионе (Mukhamedzhanov & Tleuova, 2024).

Климат северных равнин и центральных долин засушливый. Летние месяцы очень жаркие, средняя температура в июле составляет 21–25°C, может достигать 45–48°C. Зимой в северной части средняя температура варьирует от –8 до –12°C, в южных районах – от –4 до –7°C.

Годовое количество осадков на равнине составляло 140–220 мм, в среднем 135 мм, а в предгорьях – 210–330 мм, в горных районах реки Шу – от 363 до 501 мм. При этом максимальные осадки приходятся на зиму и весну (Mustafaev et al., 2019).

В равнинных районах из-за сильных ветров и недостатка влаги испаряемость достигала 1000 мм. Наивысший уровень испарения наблюдался в июле, а самый низкий – в ноябре.

В горных районах Жамбылской области величина испаряемости изменялась в зависимости от абсолютной высоты: на высоте 2000–2500 м – 480–500 мм; на 3300 м – снижалась до 230–290 мм. В предгорных равнинах испаряемость варьировала в пределах 630–790 мм, в среднем составляла 570 мм (Batabergenova, 1978; Nekrasov, 1987).

В горных районах Киргизского хребта среднегодовое количество атмосферных

осадков изменялось в пределах 600–800 мм. В предгорных равнинах количество осадков за многолетний период варьировало от 129–240 мм до 555–610 мм, в среднем составляло 327–397 мм. Распределение осадков в течение года неравномерное, их наибольший объем приходился на теплый сезон, максимальное количество осадков выпадало в мае, а на высоте 2000 м – в июне-июле.

Формирование химического состава воды, разнообразие солевого состава и протекание процессов его формирования напрямую зависят от окружающей среды (климата, почвенного покрова, содержания и видов минералов в земной коре, донных отложений, цветения воды, морфометрических и гидрологических характеристик и др.). Для рек основными природными факторами являются объем воды и длина реки, а для водохранилищ – площадь, средняя и максимальная глубины, объем воды и приток рек. Влияют также и антропогенные факторы: регулирование речного стока, использование воды для орошения, поступление загрязняющих веществ в водные объекты и др.

В воде, как и в почве, встречаются различные соли NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, MgCl<sub>2</sub>, Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>, Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, но в разных соотношениях. В результате орошения, испарения и подъема грунтовых вод содержание этих солей в почве может увеличиваться. Хотя общее количество солей в почве может быть одинаковым, однако соотношение их качественного и количественного состава различается. Как правило, это напрямую связано с гипотетическим солевым составом как подземных, так и поверхностных вод, поступающих в почву. Высокая концентрация некоторых солей может выступать в качестве токсиканта для растений, негативно влияя на рост и урожайность солечувствительных культур (Mamontov et al., 2012).

Поскольку Тасоткелское водохранилище расположено в аридной зоне, с агрономической точки зрения важным показателем при его использовании для орошения является определение соотношения токсичных и нетоксичных солей в воде. Токсичность солей для растений изменяется в следующем порядке (Minashina, 1974): очень опасные – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> > NaHCO<sub>3</sub> > NaCl; опасные – CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; малоопасные – MgSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>.

В этом отношении высокие концентрации натриевых солей (особенно Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и NaHCO<sub>3</sub>)

могут привести к засолению почвы и ухудшению её агрохимических свойств. Поэтому систематический анализ ионного состава воды, используемой для орошения, является важной задачей (Chowdary et al., 2005; Cruz et al., 2013).

Целью данного исследования являлось изучить основные гидрохимические показатели водохранилища Тасоткель и ее притоков в период 2014–2023 гг., провести анализ изменения ионно-солевого состава воды реки Шу до и после водохранилища в различные годы и сезоны. Исследование солевых взаимодействий в водных объектах, оценка качества воды, определение возможности осаждения карбоната и сульфата кальция в водохранилище позволяет дать рекомендации по использованию воды в ирригационных и технических целях.

### Материалы и методы

Исследование проведено путем анализа первичных кадастровых и мониторинговых данных Казгидромета, собранных в 2014–2023 гг. [7–8]. Для оценки изменений физико-химических показателей воды рассматривались следующие параметры: температура, расход воды, водородный показатель (рН), содержание и насыщенность растворенным кислородом, концентрация главных ионов. Кроме того, для сравнительного анализа минерализации воды Тасоткельского водохранилища были использованы собствен-

ные данные авторов за июль 2004 и 2007 годов (Кгура, 2012).

Все водные объекты берут начало на территории Кыргызстана. Нами исследованы эти объекты на территории Казахстана: Тасоткельское водохранилище в Жамбылской области и реки, стабильно питающие его с юго-восточной стороны Аксу, Токташ, Карабалта, а также река Сарыкау, впадающая в р. Шу после водохранилища (Рис. 1). Гидропост верхнего течения реки Шу расположен в 2,8 км от границы Кыргызстана, вблизи села Кайнар, Кордайского района. Гидропосты рек Сарыкау, Токташ и Карабалта находятся в приграничной зоне, тогда как гидропост реки Аксу расположен в 16,09 км от границы Кыргызстана, ниже по течению от Аксуского водохранилища на 7,99 км, вблизи села Аксу. Гидропост нижнего течения реки Шу расположен в 47,65 км от Тасоткельского водохранилища, вблизи села Конаев. Полные данные исследуемых объектов приведены в таблице 1.

Классификация химического состава воды проведена по О.А. Алекину (Alekin, 1970). Оценка растворимости солей в воде осуществлялась путем расчета взаимодействий ионов. Используются основные катионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  и анионы  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ . Для связывания ионов в гипотетические соли концентрация основных ионов воды должна быть выражена в ммоль/дм<sup>3</sup> экв.).

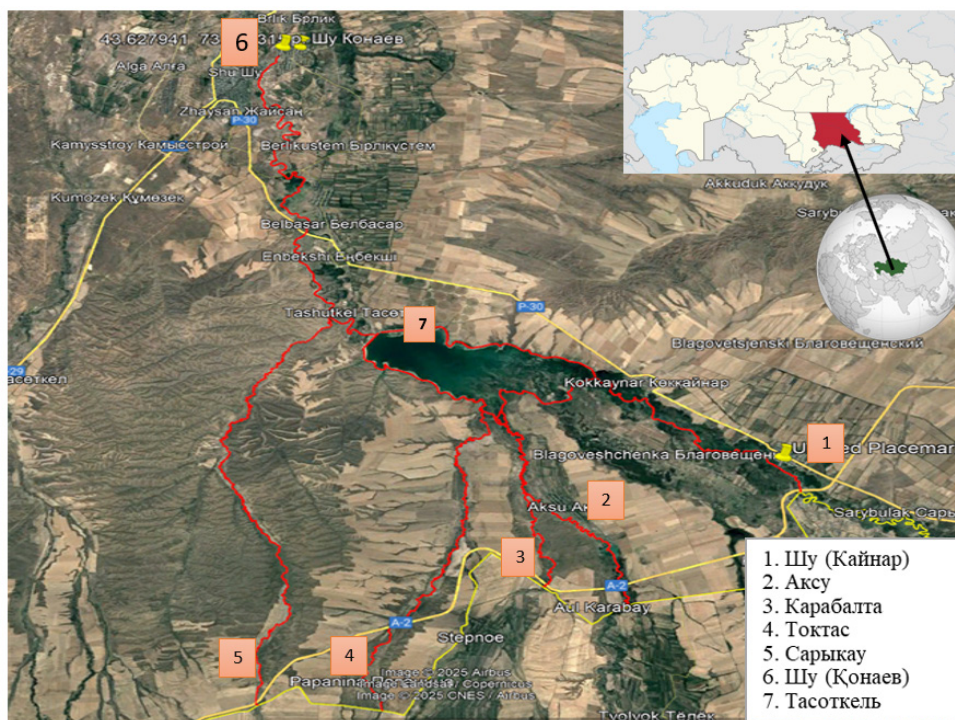
**Таблица 1**

*Географические и гидрологические характеристики исследуемых объектов*

объекты исследования	высота над уровнем море, м	координата		длина в части Казахстана, км	скорость течения, м/с	расход воды, м <sup>3</sup> /с	количество
		долгота	широта				
Шу (Кайнар)	526,32	43.291862	74.197591	30,00	1,28	70,0	62
Токтас	575,58	43.128624	73.879763	32,00	0,51	1,18	72
Аксу	530,10	43.250663	74.016463	20,09	1,50	14,2	65
Карабалта	546,41	43.224598	74.048832	26,46	1,06	0,45	66
Сарыкау	583,08	43.118456	73.798775	61,91	0,24	0,81	56
Шу (Конаев)	456,31	43.627941	73.811315	47,65	1,17	46,96	44
Тасоткель	499,00	43.383556	73.899202	18,00	нет данных	Нет данных	38

**Рисунок 1**

Схема Тасоткельского водохранилища и впадающих в него рек



Определение гипотетического солевого состава напрямую связано с растворимостью солей. Вначале связывали менее растворимые соли и далее соли с увеличивающейся растворимостью. В качестве примера рассмотрены данные по реке Токтас за октябрь 2022 года.

катионы, ммоль/дм <sup>3</sup> экв.		анионы, ммоль/дм <sup>3</sup> экв.	
Ca <sup>2+</sup>	4,53	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4,46
Mg <sup>2+</sup>	6,87	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	9,24
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	3,44	Cl <sup>-</sup>	1,14
Σ <sup>к</sup>	14,84	Σ <sup>а</sup>	14,84

При сложении величин сумма катионов равна сумме анионов. Далее, в соответствии с классификацией Левченко (Levchenko, 1953), на основе соединений солей в реке Токтас определяли их эквивалентные концентрации: Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> – 4,46; MgSO<sub>4</sub> – 6,87; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 2,30; NaCl – 1,14; CaSO<sub>4</sub> – 0,07 ммоль/дм<sup>3</sup> экв.

На основе эквивалентного состава рассчитывали абсолютное количество солей (в сумме должно быть 100 % экв.):

$$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 - 4,46 * 81 = 361,26 \text{ мг/дм}^3 (30,04\% \text{ экв.});$$

$$\text{MgSO}_4 - 6,87 * 60 = 410,40 \text{ мг/дм}^3 (46,27\% \text{ экв.});$$

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 - 2,30 * 71 = 163,30 \text{ мг/дм}^3 (15,53\% \text{ экв.});$$

$$\text{NaCl} - 1,14 * 58,5 = 66,69 \text{ мг/дм}^3 (7,67\% \text{ экв.});$$

$$\text{CaSO}_4 - 0,07 * 68 = 4,76 \text{ мг/дм}^3 (0,49\% \text{ экв.}).$$

На основе полученных данных проводили анализ изменений ионно-солевого состава воды исследуемых объектов в различные сезоны 2014–2023 гг. Итак, в воде р. Токташ по показателям за октябрь 2022 года выявлены пять видов солей: гидрокарбонат кальция, сульфат магния, сульфат натрия, хлорид натрия и сульфат кальция. По классификации О.А. Алекина вода относилась к сульфатному классу, группе магния второго типа, индекс S<sup>Mg</sup><sub>II</sub>.

### Результаты и их обсуждение

Значения pH речных вод во всех водоемах варьировали в пределах 7,10–8,50. Это свидетельствовало о том, что вода во все сезоны года сохраняла стабильную, чаще слабо щелочную реакцию.

По показателям жесткости наибольшие значения в течение большей части года зафиксированы в реках: Карабалта (6,46–22,28 мг-экв/дм<sup>3</sup>), Сарыкау (6,00–18,22 мг-экв/дм<sup>3</sup>) и Токтас (5,76–15,09 мг-экв/дм<sup>3</sup>). Максимальная жесткость в реке Карабалта отмечена в летний период 2014–2020 гг., 14,0–22,3 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Это связано со снижением уровня воды и повышением температуры. После 2020 года жесткость воды стабилизировалась в пределах 7,22–11,80 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Таким образом, вода реки Карабалта характеризовалась высокой жесткостью, за исключением июля 2016 года, когда был зарегистрирован единственный случай умеренной жесткости 4,46 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Вода рек Токтас и Сарыкау на протяжении всего года оставалась жесткой.

Общая жесткость воды реки Аксу варьировала от мягкой до умеренно жесткой, 4,04–10,59 мг-экв/дм<sup>3</sup>, составляя в среднем

7,63±0,15 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Жесткость воды в реке Шу увеличивалась вниз по течению. В верхнем участке, в районе поселка Кайнар, значения варьировали от 3,8 до 7,2 мг-экв/дм<sup>3</sup> (в среднем 5,48 мг-экв/дм<sup>3</sup>), тогда как в нижнем участке реки, на гидропосту Конаев, жесткость составляла 4,54–8,08 мг-экв/дм<sup>3</sup> (в среднем 6,15 мг-экв/дм<sup>3</sup>). В водохранилище Тасоткель значения жесткости находились в пределах 2,35–6,47 мг-экв/дм<sup>3</sup>, в среднем 5,29 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Жесткость воды в водохранилище Тасоткель мало отличалась от жесткости воды реки Шу, оставаясь в пределах средних величин.

По показателям насыщения воды кислородом все исследуемые объекты в течение года оставались в большинстве случаев очень чистыми или чистыми. Особенно высокое содержание кислорода наблюдалось в периоды низких температур воды (таблица 2).

Таблица 2

Предельные значения основных физических и гидрохимических показателей водных объектов за 2014–2023 гг.

Объекты исследования	t, °C	pH	O <sub>2</sub>	жесткость	минерализация
			мг/дм <sup>3</sup> % насыщение	мг-экв/дм <sup>3</sup> средние	мг/дм <sup>3</sup> средние
Тасоткель	2,0–28,0	7,40–8,40	<u>7,2–13,9</u> 58–113	<u>2,35–6,47</u> 5,29±0,12	<u>289,3–714,2</u> 556,9±11,0
Шу (Кайнар)	2,2–25,0	7,50–8,50	<u>8,1–12,4</u> 71–120	<u>3,80–7,20</u> 5,47±0,08	<u>408,9–994,8</u> 557,5±14,0
Аксу	1,4–29,2	7,10–8,50	<u>7,2–13,4</u> 69–104	<u>4,04–10,59</u> 7,63±0,15	<u>435,2–1244,5</u> 773,4±16,8
Карабалта	0,5–30,2	7,30–8,50	<u>6,5–14,0</u> 72–118	<u>4,64–22,28</u> 10,37±0,37	<u>539,0–2054,0</u> 1316,9±51,0
Токтас	0,6–30,2	7,20–8,50	<u>6,4–13,6</u> 74–115	<u>5,76–15,09</u> 9,52±0,24	<u>642,0–1959,0</u> 1050,0±38,0
Шу (Конаев)	1,6–25,2	7,50–8,50	<u>7,4–14,9</u> <u>58–103</u>	<u>4,34–8,01</u> 6,15±0,12	<u>447,2–897,8</u> 621,6±13,4
Сарыкау	1,0–31,2	7,80–8,35	<u>6,2–13,4</u> 73–135	<u>6,40–18,22</u> 10,19±0,30	<u>695,9–1796,4</u> 1156,0±34,6

В многолетнем цикле минерализация воды рек Токтас, Карабалта и Аксу колебалась в широких пределах от 435,2 до 2054,0 мг/дм<sup>3</sup>, то есть вода притоков изменялась от относительно повышенной солености до солоноватой. Минерализация воды реки Карабалта варьировала в пределах 539,0–2054,0 мг/дм<sup>3</sup>, в среднем составляла 1316,9±50,9 мг/дм<sup>3</sup>. В осеннее время года наблюдалось снижение градиента минерализации. В период с 2021 по 2023 год отмечалось заметное

увеличение минерализации в реках Токтас, Сарыкау, Карабалта и Аксу (рисунок 2).

Минерализация воды в водохранилище Тасоткель в 2014–2023 годах варьировала в пределах 289,3–714,2 мг/дм<sup>3</sup>, со средним значением 556,9±10,9 мг/дм<sup>3</sup>, причем наименьшее значение было отмечено зимой 2020 г. По более ранним данным (Кгура, 2012) в летние периоды 2002 г и 2007 г минерализация воды водохранилища не выходила за пределы 400,0 мг/дм<sup>3</sup>. За последние

десять лет минерализация воды в летнее время увеличилась в 1,42 раза.

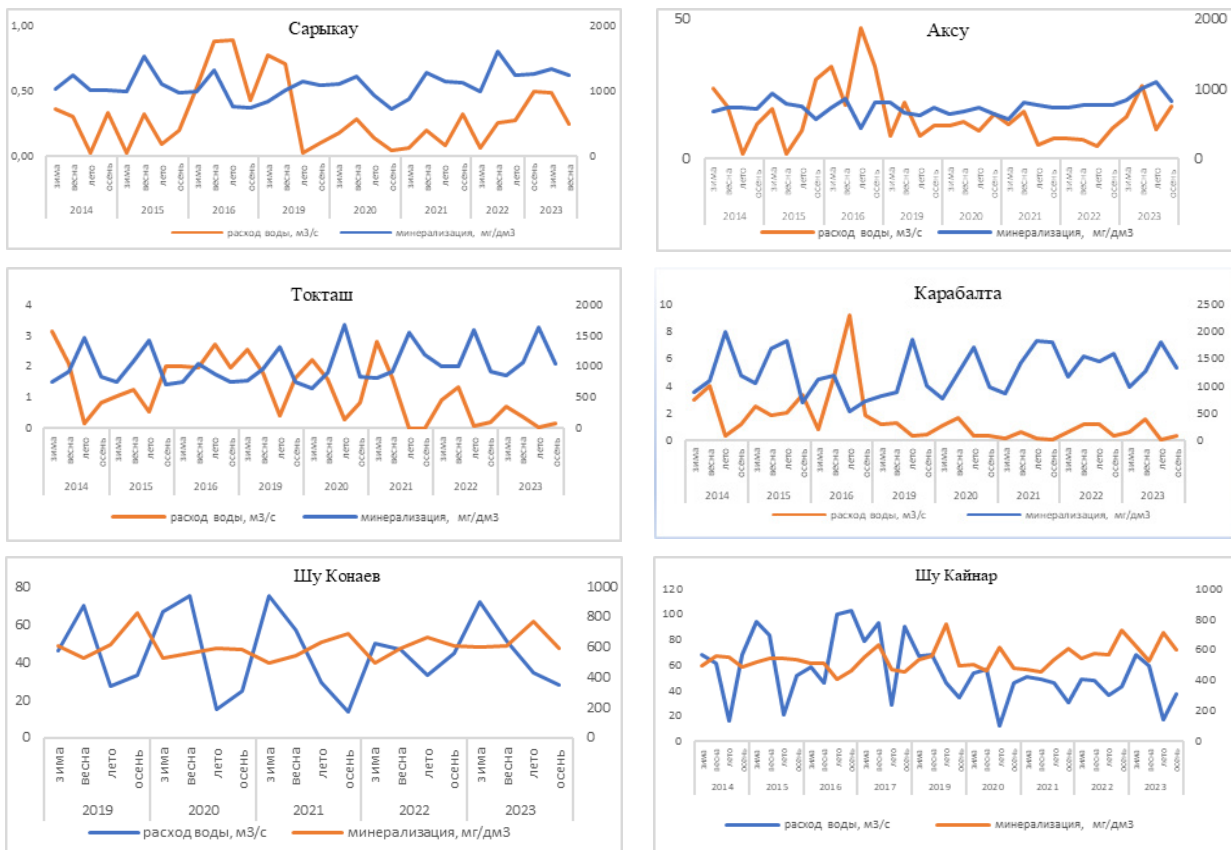
Минерализация воды в реке Шу и водохранилище Тасоткель имела близкие значения. Однако наблюдалось увеличение минерализации воды реки Шу на выходе из водохранилища. В исследуемый период было выявлено постепенное повышение минерализации вдоль течения реки, на 80,0 мг/дм<sup>3</sup>. Представляет интерес привести данные прежних лет за 1984–1992 гг. Так, в нижнем течении, в 0,3 км ниже села Уланбел, минерализация воды варьировала в пределах 684,0–6582,0 мг/дм<sup>3</sup>, при этом зафиксировано значительное увеличение концентрации хлорид-ионов. Одной из основных причин этого является то, что с территории Кыргызстана уже приходят воды после использования

в ирригационных целях [6, 24]. В районе города Токмак (Кыргызстан) минерализация воды в реке Шу имела относительно низкое значение (281,1 мг/дм<sup>3</sup>) (Matveeva et al., 2010).

Построение графиков зависимости общей минерализации от расхода воды рек позволило выявить следующее. Обычно при естественном режиме максимальное значение минерализации наблюдается при минимальном расходе воды. В нашем случае такая зависимость выявлена для рек: Токташ – в 12, Шу в 8, Карабалта, Аксу – в 7, Сарыкау – в 5 из 32 сезонов года, в основном в летне-осенний период (Рис. 2). В остальные сезоны многолетнего цикла режим рек, был нарушенный из-за хозяйственной деятельности. Отмечен рост минерализации по течению р. Шу.

**Рисунок 2**

*Изменение общей минерализации и расходов воды рек в многолетнем цикле (2014–2023 гг.)*



Согласно классификации А.О. Алекина в реках Карабалта и Сарыкау в течение года преобладает сульфатный класс воды. В реке Токтас сульфатные классы встречаются в 57 случаях из 72, а в реке Аксу – в 42 случаях из 65. Наличие карбонатных классов не зависит от времени года и изменений температуры воды, что объясняется поступлением карбонатных ионов за счет вымывания их из почв водосборного бассейна. В гидрохимии переход состава воды от карбонатного к сульфатному типу рассматривается как процесс метаморфизации химического состава, происходящий в прямом направлении (Valyashko et al., 1965; Veremzhanov, 1987; Nikanorov, 2011).

Воды Шу и Тасоткеля характеризовались преобладанием карбонатных ионов. Однако в 2019–2023 годах в районе поселка Конаев наблюдался переход состава воды от карбонатного к сульфатному классу, особенно в осенние и летние месяцы. В зимний период вода полностью относилась к карбонатному классу, второго типа.

Если минерализация воды водохранилища Тасоткель соответствовала показателям реки Шу в районе поселка Кайнар, однако по химическому составу вода характеризовалась поразному в течение годичного и многолетнего циклов. Индексы состава воды по Алекину О.А. встречались  $C_{II}^{Ca}$ ,  $S_{II}^{Ca}$ ,  $C_{II}^{Na}$ ,  $C_{I}^{Mg}$ ,  $S_{II}^{Na}$ ,  $S_{II}^{CaNa}$

$S_{II}^{Mg}$ . Так, в осенние периоды в воде Тасоткеля четко прослеживалась принадлежность сульфатного класса, что связано в определенной степени с влиянием состава воды рек Карабалта, Аксу и Токтас, в которой отмечено преобладание сульфатных ионов и ионов натрия или кальция (таблица 3). Вода р.Шу поступает в водохранилище чаще карбонатно-кальциевого состава (52 сезона из 62), а на выходе из водохранилища становится в большинстве случаев сульфатно-натриевой, кальциевой, магниевой (24 сезона из 44). Отмечено, что в воде р. Шу в районе поселка Конаев и водохранилища Тасоткель ионы  $SO_4^{2-}$  чаще встречались в летний период. Увеличение водного стока и объема воды в реках Карабалта, Токташ и Аксу, впадающих в водохранилище Тасоткель, а также снижение уровня воды в осенние месяцы приводило к увеличению доли ионов  $SO_4^{2-}$  и  $Na^+$  по сравнению с другими сезонами.

В летний период, когда вода интенсивно использовалась для сельского хозяйства и уровень водоема и водотоков снижался, в воде преобладали ионы  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  и  $Mg^{2+}$ . Это связано с прямым влиянием рек Аксу, Карабалта и Токташ (Рис. 3). В зимние и весенние месяцы ионный состав воды водохранилища соответствовал реке Шу, в этот период преобладали ионы  $HCO_3^-$  и  $Ca^{2+}$ .

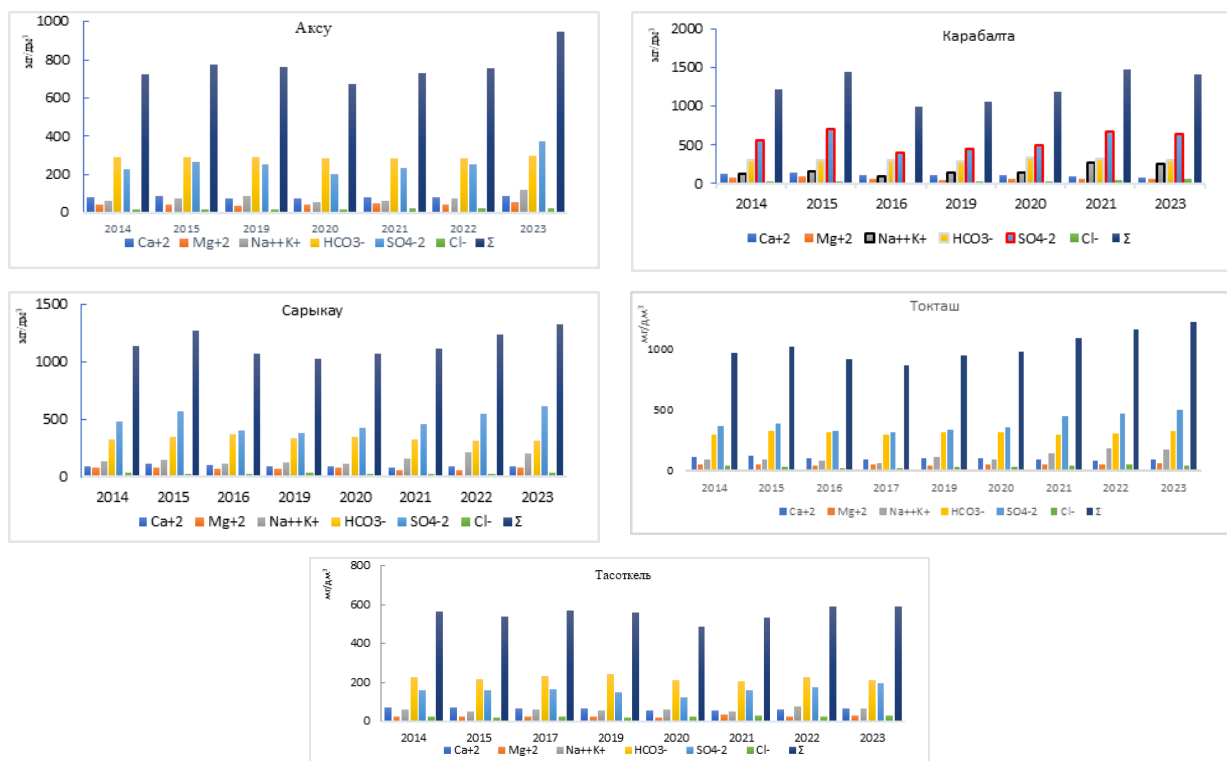
Таблица 3

Среднемноголетние показатели ионного состава водохранилища Тасоткель и основных впадающих в него рек за 2014–2023 гг., мг/дм<sup>3</sup>

Объект	$HCO_3^-$	$Na^++K^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$SO_4^{2-}$	Cl
Тасоткель	218,7±5,8	60,1±3,5	64,0±1,6	25,3±1,1	163,6±6,7	25,0±1,4
Карабалта	306,1±6,5	207,6±16,1	102,7±3,3	64,8±2,9	604,4±29,7	41,0±3,0
Шу (Кайнар)	238,7±2,9	54,6±3,6	70,6±0,9	23,8±0,6	149,0±6,6	22,8±0,9
Аксу	288,6±3,5	80,3±4,7	80,7±1,5	44,5±1,3	266,7±10,2	21,8±1,5
Токтас	315,9±5,1	133,8±12,0	101,7±2,1	54,1±2,5	411,5±23,5	40,2±2,6
Шу (Конаев)	227,2±6,7	66,2±3,8	76,2±1,3	28,6±1,1	187,8±7,9	29,6±1,6
Сарыкау	332,8±6,8	154,9±10,4	92,4±2,4	68,1±2,6	489,5±21,9	26,9±2,1

**Рисунок 3**

Изменение минерализации и ионного состава воды Тасоткельского водохранилища и его притоков в многолетнем цикле, 2014–2023 гг.



Изменения в ионном составе воды можно оценить по значению коэффициентов сравнения. Так, показатель  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  в воде р. Шу за 2019–2023 гг. постоянно меньше 1, причем в верхнем участке у п. Кайнар меньше (0,56), чем в нижнем участке (0,63). Как правило, большему значению общей минерализации соответствует и большее значение этого показателя. В воде Тасоткельского водохранилища за этот период соотношение  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  становится равным 0,71, что свидетельствует о влиянии притоков Карабалта, Аксу и Токташ, где этот показатель, соответственно, 1,00; 0,091 и 0,89. Значения коэффициента  $Mg^{2+}/Ca^{2+} > 1$  (1,04–1,58) выявлены в основном в осенне-зимний период 2014–2023 гг. за счет влияния грунтового питания и процессов, способствующих увеличению доли  $Mg^{2+}$  ионов в составе воды притоков.

Поскольку основным источником поступления сульфатов в воде, как полагает большинство исследователей, является гипс (а сульфаты натрия и магния появляются за счёт процессов катионного обмена), то в растворе он образует эквивалентное количество ионов

$Ca^{2+}$  и  $SO_4^{2-}$  [22, 23, 29]. Кальций привносится также в воды при растворении карбонатных пород. Поэтому чаще всего в природных водах  $C_{Ca^{2+}} > C_{SO_4^{2-}}$ . Однако обратимся к нашим расчётам. С 2021 по 2023 гг вода Тасоткельского водохранилища характеризовалась коэффициентом  $Ca^{2+}/SO_4^{2-}$  равным 0,82–0,85, а в 2014–2020 гг – 0,96–1,08. Такое соотношение свидетельствовало о метаморфизации воды, связанной с обменом  $Ca^{2+}$  на другие ионы, например,  $Na^+$ . Катионный обмен может быть изображён следующим уравнением реакции:  $2Na(ПК) + CaSO_4 = Ca(ПК) + Na_2SO_4$ , где ПК – поглощающий комплекс. Соотношение  $Ca^{2+}/SO_4^{2-}$ , равное 1, свидетельствовало о поступлении соответствующих ионов за счет растворения гипса. В воде притоков коэффициент  $Ca^{2+}/SO_4^{2-}$  постоянно меньше 1, который показывал возрастающую роль сульфатных ионов в формировании состава воды. Среднегодовые значения коэффициента  $Ca^{2+}/SO_4^{2-}$  в воде р. Шу в верхнем участке изменялись в пределах 0,96–1,33, чаще больше 1, а в нижнем участке – близки к единице. Это говорит о том, что в

нижнем участке р.Шу поступление ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в воду происходило в основном за счет гипса, а в верхнем участке – за счет вымывания кальция из гипса и известняка.

Коэффициент  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  для всех объектов больше 1. Это свидетельствовало о том, что источником хлоридных ионов являлся не захороненный  $\text{NaCl}$  (в таком случае  $C_{\text{Na}^+} = C_{\text{Cl}^-}$ ), а процесс выветривания полевых шпатов.

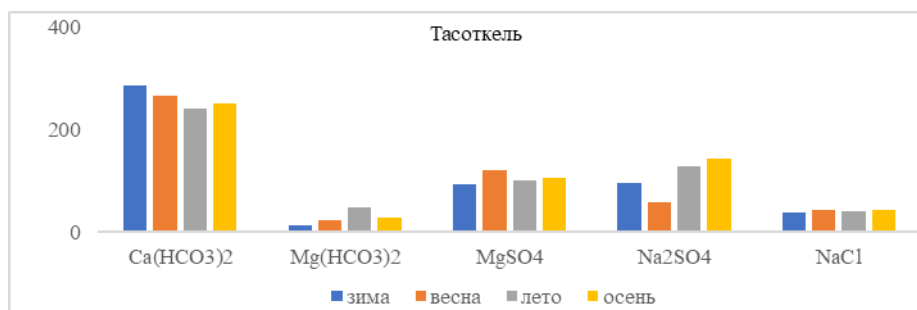
Коэффициент сравнения  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  позволяет судить о соотношении этих ионов. Расчёт пока-

зал, что в воде водохранилища и его притоков сульфаты преобладали, а хлориды имели подчинённое значение.

При расчёте гипотетического состава воды, то есть соотношения ионов, образующих стабильные соли при испарении воды, в водохранилище Тасоткель были выявлены основные соли: гидрокарбонаты кальция и магния, сульфаты магния и натрия, а также хлорид натрия. Опасные для почвы соли в больших количествах не зафиксированы (Рис. 4).

**Рисунок 4**

Показатели сезонных средних гипотетических изменений солевого состава водохранилища Тасоткель за 2014–2023 гг.



При упорядочивании среднегодовых показателей минеральных солей в порядке убывания в верхнем и нижнем течении реки Шу, а также в реках Аксу, Токтас и водохранилище Тасоткель среднегодовые значения были одинаковыми:  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 > \text{MgSO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{NaCl} > \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 > \text{CaSO}_4$ . В реках Сарыкау и Карабалта данный ряд определился следующим образом:  $\text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{MgSO}_4 > \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 > \text{NaCl} > \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 > \text{CaSO}_4$ .

Образование гипса отмечалось в воде рек Карабалта, Токтас и в нижнем течении реки Шу. При этом гипс ( $\text{CaSO}_4$ ) был обнаружен в различные сезоны года. Так, в реке Карабалта гипс отмечался зимой (0,40 мг/дм<sup>3</sup>) и осенью (0,06 мг/дм<sup>3</sup>), в реке Токтас – весной (0,03 мг/дм<sup>3</sup>), а в нижнем течении реки Шу – во все сезоны, кроме зимы. В воде водохранилища Тасоткель, а также рек Шу (Кайнар), Аксу и Сарыкау наличие гипса не зафиксировано (таблица 4).

**Таблица 4**

Среднемноголетняя концентрация гипотетических солей за 2014–2023 гг.

Объект	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{MgSO}_4$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{NaCl}$	$\text{CaSO}_4$
	мг/дм <sup>3</sup> / % экв.					
Шу (Кайнар)	285,01	27,84	94,15	106,07	37,22	0,00
	46,42	4,98	20,67	19,55	8,38	0,00
Карабалта	402,66	4,76	305,96	513,26	69,06	7,94
	27,28	0,36	27,59	37,91	6,22	0,64
Аксу	324,34	52,00	172,06	179,86	34,87	0,00
	37,45	6,69	26,70	23,60	5,56	0,00
Токтас	404,87	7,67	267,03	293,45	65,60	0,45
	35,11	0,79	30,41	26,28	7,36	0,05

Продолжение таблицы

Объект	Ca (HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Mg (HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaCl	CaSO <sub>4</sub>
	мг/дм <sup>3</sup> / % экв.					
Тасоткель	<u>260,79</u>	<u>28,00</u>	<u>105,13</u>	<u>106,26</u>	<u>41,28</u>	<u>0,00</u>
	42,81	5,01	23,26	19,56	9,36	0,00
Сарыкау	<u>370,86</u>	<u>61,62</u>	<u>280,72</u>	<u>377,63</u>	<u>44,12</u>	<u>0,00</u>
	28,38	5,23	28,85	32,85	4,69	0,00
Шу (Конаев)	<u>305,62</u>	<u>2,74</u>	<u>126,79</u>	<u>132,33</u>	<u>62,56</u>	<u>8,04</u>
	42,21	0,42	23,47	20,75	11,88	1,27

Если рассматривать частоту встречаемости отдельных солей, то первые четыре соединения (Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl) выявлялись во все сезоны года. Однако частота встречаемости гидрокарбоната магния и сульфата кальция варьировала в зависимости от водоема или водотока. В Тасоткеле образование гипса наблюдалось осенью и зимой. В реке Карабалта в период 2014–2021 годов гипс встречался во все сезоны, однако в 2022 году был зафиксирован только в декабре, а в 2023 году – лишь в сентябре. В реке Токтас гипс присутствовал во все сезоны года (в 43 пробах воды из 72), тогда как в реке Сарыкау его встречаемость гораздо меньше, в 6 пробах воды из 56. В нижнем течении реки Шу гипс чаще всего появлялся летом и осенью, в отличие от верхнего участка. Хлорид магния был обнаружен в реке Карабалта в январе 2020 года, а в реке Токтас – осенью 2014 и 2023 годов.

Количество различных солей в речной воде изменялось не только в течение годового цикла, но и на протяжении многолетнего периода. Это связано с влиянием гидрологических факторов (расход воды, скорость течения, водный сток, попуски), поступлением солей с водосборного бассейна во время паводков, атмосферными осадками, а также физико-химическими процессами, происходящими в системе «вода–донные отложения – почва–растения».

В почвах бассейна реки Шу и ее водосборной территории минералы, содержащие сульфат натрия (глауберит, мирабилит) и сульфат магния (кизерит, эпсомит), встречаются крайне редко, а карбонаты кальция и магния, гипс более распространены (Chu Valley Soils, 1971; Seitkaziev & Maimakova, 2020; Mustafaev, 2023). В регионе найдены подземные воды различного химического состава, включая сульфатно-хлоридно-натриевые (Smolyar & Burov, 2002; Absametov et al., 2017; Tazhiyev, 2023). Кроме того, допол-

нительным источником поступления сульфатов натрия и калия могут являться вещества, применяемые в агротехнике возделывания сельскохозяйственных культур (удобрения, ядохимикаты, мелиоранты и др.) и вымываемые из почв водосборного бассейна.

### Заключение

Анализ изменений показателей состава воды в 2014–2023 годах показал, что уровень pH во всех исследуемых водных объектах оставался стабильным на протяжении года и колебался от нейтральных до слегка щелочных значений (7,10–8,40). Жесткость воды в водохранилище Тасоткель и реки Шу средняя, соответственно, 5,29±0,12 и 5,47±0,08 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Реки Карабалта, Сарыкау и Токтас чаще имели очень жесткую воду, до 15,09–22,28 мг-экв/дм<sup>3</sup>.

Среднегодовалый уровень минерализации водохранилища Тасоткель составил 556,9±10,9 мг/дм<sup>3</sup>. Выявлено влияние рек Токтас, Карабалта и Аксу на ионно-солевой состав и минерализацию воды Тасоткеля. В осенний период, когда объем воды рек увеличивался, вода водохранилища Тасоткель относилась к сульфатному классу, а в остальные сезоны года класс сохранялся карбонатно-кальциевым. Это свидетельствовало о том, что влияние впадающих в него рек проявлялось в основном в периоды повышения их водности. Осенью объем водохранилища Тасоткель достигал минимального уровня. По течению р. Шу минерализация повышалась в среднем на 80,0 мг/дм<sup>3</sup>, что вызвано влиянием более минерализованной воды впадающей в нее реки Сарыкау.

Расчитанные коэффициенты сравнения свидетельствовали об изменениях ионного состава воды во всех изученных объектах. Так, значения коэффициента Ca<sup>2+</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> изменялись от < 1 до

> 1, что свидетельствовало о метаморфизации воды, связанной с обменом  $\text{Ca}^{2+}$  на другие ионы, например,  $\text{Na}^+$ . Большшему значению показателя  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  соответствовало большее значение общей минерализации.

В порядке убывания среднегодового содержания минеральные соли в воде рек Шу, Аксу, Токтас и водохранилища Тасоткель располагались в следующий ряд:  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 > \text{MgSO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{NaCl} > \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 > \text{CaSO}_4$ . В реках Сарыкау и Карабалта данный ряд определился следующим образом:  $\text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{MgSO}_4 > \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 > \text{NaCl} > \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 > \text{CaSO}_4$ .

Содержание солей в воде рек Токтас, Карабалта, Аксу и Сарыкау в большинстве случаев превышало 1 г/л, что является неблагоприятным фактором при использовании на орошение. Преобладание сульфатов натрия и магния в воде рек Сарыкау и Карабалта может привести к образованию солейотложений при техническом и бытовом использовании воды.

Бассейн реки Шу расположен в зоне бурых, серо-бурых и такырных почв, что делает этот регион предрасположенным к засолению. Однако высокое содержание гидрокарбоната кальция, наличие гипса и низкий уровень минерализации

воды р. Шу оказывают положительное влияние на состояние почвы.

### Благодарности

Мы признательны РГП «Казгидромет» за поддержку в предоставлении гидрохимических данных.

Исследование выполнено в рамках проекта BR24993060 «Разработка информационной системы для ведения кадастра диких животных Западного Тянь-Шаня с целью их сохранения и устойчивого использования». Проект поддержан Министерством науки и высшего образования Комитетом науки Республики Казахстан.

### Вклад авторов

Романова С.М.: разработка концепции, методология, научное руководство, управление проектом, редактирование и доработка рукописи.

Серикова А.С.: проведение исследования, сбор и обработка данных, валидация данных

Махмутова Р.Е.: проведение исследования, сбор и обработка данных, валидация данных

### Литература

- Absametov, M. K., Mukhamedzhanov, M. A., Sydykov, Zh. S., & Murtazin, E. Zh. (2017). *Podzemnye vody Kazakhstana – strategicheskii resurs vodnoi bezopasnosti*.
- Alekin, O. A. (1970). *Osnovy gidrokhimii*. Gidrometeoizdat.
- Ayagan, B. G. (Ed.). (2003). *Taraz. Zhambyl oblysy: Entsiklopediya*. Kazak Entsiklopediyasy.
- Batabergenova, M. Sh. (1978). *Gidrogeologicheskie usloviya i formirovanie podzemnykh vod...* (Abstract of candidate dissertation).
- Beremzhanov, B. A. (1987). *Khimiya prirodnykh solei*. Mektep.
- Chowdary, V. M., Rao, N. H., & Sarma, P. B. S. (2005). Decision support framework for assessment of non-point-source pollution of groundwater in large irrigation projects. *Agricultural Water Management*, 75(3), 194–225.
- Cruz, J. V., Dias, M. I., Silva, M. O., & Prudencio, M. I. (2013). Groundwater composition and pollution due to agricultural practices. *Applied Geochemistry*, 29, 162–173.
- Esembekova, G. B., & Esengeldieva, L. K. (2019). *Vodnyi i solevoi rezhim serozemnykh pochv yuga Kazakhstana*. Yuzhno-Kazakhstanskii gosudarstvennyi universitet im. M. Auezova.
- Kadyrov, V. K., Pirmatov, A., & Karmanchuk, A. S. (1985). Osnovnye rezultaty gidrokhimicheskikh issledovaniy. In *Kompleksnaya avtomatizatsiya meliorativnykh sistem* (pp. 117–123).
- Kazhydromet. (2014–2023). *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr Respubliki Kazakhstan. Poverkhnostnye vody sushy*.
- Kazhydromet. (2014–2023). *Informatsionnyi byulleten' o sostoyanii okruzhayushchei sredy*.
- Kaziev, K., Pak, L., Chernova, A., & Lubyanykh, N. (1971). Vliyanie khimicheskogo sostava stochnykh vod g. Frunze na kachestvo vody r. Chu i perspektivy ikh ispol'zovaniya. *Voprosy vodnogo khozyaistva*, 20, 82–86.
- Klimenko, O. E., Yevtushenko, A. P., & Klimenko, N. I. (2022). Changes in salt composition of soils under irrigation with brackish water in the steppe Crimea. *Eurasian Soil Science*, 55(12), 1829–1841.
- Kovda, V. A. (2008). *Problemy opustynivaniya i zasoleniya pochv aridnykh regionov mira*. Nauka.
- Krupa, E. G. (2012). *Zooplankton limnicheskikh i loticheskikh ekosistem Kazakhstana*. Palmarium Academic Publishing.
- Krutov, D. A. (2020). Seismousilenie gruntovoi plotiny: Proekt i raschetnoe obosnovanie. *Prirodoobustroistvo*, 1, 79–88.
- Kunshygar, D. Zh., & Kulebaev, K. M. (2011). Gidrokhimiya rek Shu, Talas, Asy. *Geografiya i vodnye resursy*, 2, 42–46.
- Levchenko, V. M. (1953). O klassifikatsii prirodnykh vod. *Gidrokhimicheskie materialy*, 21, 16–18.
- Mamontov, V. G., Gladkov, A. A., & Kuzelev, M. M. (2012). *Prakticheskoe rukovodstvo po khimii pochv*. RGAU–MSKhA.

- Matveeva, I. V., Uralbekov, B. M., Abishev, T. B., Al'kenova, G. T., & Burkitbaev, M. M. (2010). Khimicheskaya kharakteristika prirodnikh vod doliny reki Shu. *Vestnik KazNU. Seriya khimicheskaya*, 2(58), 238–244.
- Minashina, N. G. (1974). *Orosshaemye pochvy pustyni i ikh melioratsiya*. Kolos.
- Mukhamedzhanov, M. A., & Tleuova, Zh. T. (2024). Ekologicheskie problemy i zagryaznenie pit'evykh podzemnykh vod Yuzhnogo Kazakhstana. *Vodnye resursy*, 28.
- Mustafaev, Zh. (2023). Landshaftno-ekologicheskoe raionirovanie basseina reki Shu. *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 4, 17–28.
- Mustafaev, Zh. S., Kozykeeva, A. T., & Kamaliev, A. M. (2019). Klimaticheskii profil' vodosbornogo basseina reki Shu. *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2(93), 41–54.
- Nekrasov, B. A. (1987). *Formirovanie ekspluatatsionnykh zapasov podzemnykh vod...* (Abstract of candidate dissertation).
- Nikanorov, A. M. (2008). *Gidrokimiya* (3rd ed.). Gidrometeoizdat.
- Nikanorov, A. M. (2011). *Regional'naya gidrokimiya*. NOK.
- Pochvy doliny Chu*. (1971).
- Samibaeva, A. Zh. (2018). Georiski basseina reki Kara-Balta Kirgistan. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kirgystana*, 3, 85–88.
- Seitkaziev, A. S., & Maimakova, A. K. (2020). Ekologicheskaya otsenka serozemnykh pochv. *Vestnik Universiteta Shakarima*, 3(91), 281–285.
- Smolyar, V. A., & Burov, B. V. (2002). *Vodnye resursy Kazakhstana*. Fylym.
- Starodubtsev, V. M., & Truskavetskiy, S. R. (2007). Degradatsiya pochv v del'takh rek. *Problemy osvoeniya pustyn'*, 26–29.
- Tazhiyev, S. R. (2023). *Resursy podzemnykh vod Kazakhstanskoi chasti predgorii Kirgizskogo Alatau* (Doctoral dissertation).
- Valyashko, M. G., Polivanova, A. I., Zherebtsova, I. K., & Metkikh, B. I. (1965). *Geokimiya i genezis rassolov*. Nauka.
- Zaurbek, A. K. (2005). Vodnyi balans prirodookhrannykh popuskov r. Shu. *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 1, 88–93.

**Сведения об авторах:**

- С.М. Романова – доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории гидробиологии и экотоксикологии РГП на ПХВ «Институт зоологии» МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: sofiyarom@mail.ru).*
- А.С. Серикова – младший научный сотрудник лаборатории гидробиологии и экотоксикологии РГП на ПХВ «Институт зоологии» МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: aizada.serikova@zool.kz).*
- Р.Е. МахмUTOва – младший научный сотрудник лаборатории гидробиологии и экотоксикологии РГП на ПХВ «Институт зоологии» МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: rabat.makhutova@zool.kz).*

**Information about authors:**

- S. Romanova – Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Hydrobiology and Ecotoxicology, «Institute of Zoology» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sofiyarom@mail.ru).*
- A. Serikova – Junior researcher at the Laboratory of Hydrobiology and Ecotoxicology, «Institute of Zoology» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aizada.serikova@zool.kz).*
- R.E. Makhmutova – junior researcher at the Laboratory of Hydrobiology and Ecotoxicology, «Institute of Zoology» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: rabat.makhutova@zool.kz).*

**Авторлар туралы мәлімет:**

- С.М. Романова – география ғылымдарының докторы, ҚР ҒЖБМ ҒК «Зоология институты» ШЖҚ РМК гидробиология және экотоксикология зертханасының бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: sofiyarom@mail.ru).*
- А.С. Серикова – ҚР ҒЖБМ ҒК «Зоология институты» ШЖҚ РМК гидробиология және экотоксикология зертханасының кіші ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: aizada.serikova@zool.kz).*
- Р.Е. МахмUTOва – ҚР ҒЖБМ ҒК «Зоология институты» ШЖҚ РМК гидробиология және экотоксикология зертханасының кіші ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: rabat.makhutova@zool.kz).*

Поступила 13 февраля 2025 года

Принята 25 марта 2026 года

М.М. Юсифова\* , Ш.Н. Ализаде 

Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

\*e-mail: mehluqe\_yusifli@mail.ru

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА БИОЭНЕРГИИ ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В ВОСТОЧНО-ЗАНГЕЗУРСКОМ ЭКОНОМИЧЕСКОМ РАЙОНЕ АЗЕРБАЙДЖАНА

Быстрый рост мирового спроса на энергию и истощение запасов ископаемого топлива подчеркивают важность биомассы – сельскохозяйственных побочных продуктов – как возобновляемого источника энергии. Благоприятные почвенно-климатические условия Восточно-Зангезурского экономического района, крупного сельскохозяйственного региона, занимающего важное место в экономике Азербайджана, создали широкие возможности для развития биоэнергетики, как альтернативного источника энергии в регионе. В целях внедрения устойчивого управления сельскохозяйственными отходами в этом экономическом районе, объявленной «Зеленой зоной», была поставлена задача определить потенциал производства биоэнергии из растительных остатков. Расчет производства биогаза и потенциала биоэнергии из растительных остатков проводился на основе методологии BEFS Rapid Appraisal. Было установлено, что в Восточно-Зангезурском экономическом районе ежегодно образуется 91431,65 т растительных отходов, из которых наибольшее количество отходов остается на полях зерновых и бобовых культур (49384 т/год), пшеницы (38751 тонна/год) и сахарной свеклы (1424,9 т/год). Было установлено, что экономический район имеет потенциал для производства 101592,992 МВт·ч/год биоэнергии из всех растительных отходов, из которых 43058,111 МВт·ч/год биоэнергии может быть получено из остатков пшеницы, 54871,261 МВт·ч/год из остатков зерновых и бобовых культур и 1583,443 МВт·ч/год из остатков сахарной свеклы. Учитывая потенциал биогаза в сокращении выбросов, связанных с отходами, в качестве углеродно-нейтральной альтернативы ископаемому топливу, годовой потенциал биогаза в экономическом регионе был оценен в 18 286 330 м<sup>3</sup>, что может сократить выбросы углекислого газа на 307 210 тонн CO<sub>2</sub>-эквивалента в год и способствовать снижению последствий изменения климата.

**Ключевые слова:** отходы растениеводства, биоэнергетика, сокращение выбросов углерода.

M.M. Yusifova\*, Sh.N. Alizade

Baku State University, Faculty of Ecology and Soil Science, Baku, Azerbaijan

\*e-mail: mehluqe\_yusifli@mail.ru

### Prospects for Bioenergy Production from Crop Waste in the East Zangezur Economic Region of Azerbaijan

The rapid growth of global energy demand and the depletion of fossil fuel reserves highlight the importance of biomass–agricultural byproducts–as a renewable energy source. The favorable soil and climate conditions of the East Zangezur economic region, a major agricultural area that plays a significant role in the Azerbaijani economy, have created significant opportunities for the development of bioenergy as an alternative energy source in the region. To implement sustainable agricultural waste management in this economic region, designated a “Green Zone,” the objective was to determine the potential for bioenergy production from crop residues. Biogas production and bioenergy potential from crop residues were calculated using the BEFS Rapid Appraisal methodology. It was found that 91431.65 tons of plant waste are generated annually in the East Zangezur economic region, of which the largest amount of waste remains in the fields of grain and legume crops (49384 tons/year), wheat (38751 tons/year) and sugar beet (1424.9 tons/year). It was found that the economic region has the potential to produce 101592.992 MWh/year of bioenergy from all plant waste, of which 43058.111 MWh/year of bioenergy can be obtained from wheat residues, 54871.261 MWh/year from grain and legume residues and 1583.443 MWh/year from sugar beet residues. Considering the potential of biogas to reduce waste-related emissions as a carbon-neutral alternative to fossil fuels, the annual biogas potential in the economic region was estimated at 18,286,330 m<sup>3</sup>, which could reduce carbon dioxide emissions by 307,210 tonnes of CO<sub>2</sub> equivalent per year and contribute to climate change mitigation.

**Keywords:** plant wastes, bioenergy, carbon emission reduction.

М.М. Юсифова\*, Ш.Н. Ализаде

Баку мемлекеттік университеті, экология және топырақтану факультеті, Баку, Әзірбайжан

\*e-mail: mehluqe\_yusifli@mail.ru

### Әзірбайжанның Шығыс Зангезур экономикалық аймағындағы дақыл қалдықтарынан биоэнергия өндірудің перспективалары

Әлемдік энергияға деген сұраныстың тез өсуі және қазба отын қорларының азаюы биомасаның – ауыл шаруашылығының қосалқы өнімдерінің – жаңартылатын энергия көзі ретіндегі маңыздылығын көрсетеді. Әзірбайжан экономикасында маңызды рөл атқаратын ірі ауыл шаруашылығы аймағы болып табылатын Шығыс Зангезур экономикалық аймағының қолайлы топырақ-климаттық жағдайлары аймақта балама энергия көзі ретінде биоэнергияны дамыту үшін айтарлықтай мүмкіндіктер туғызды. «Жасыл аймақ» деп белгіленген бұл экономикалық аймақта ауыл шаруашылығы қалдықтарын тұрақты басқаруды енгізудің мақсаты дақыл қалдықтарынан биоэнергия өндіру әлеуетін анықтау болды. Дақыл қалдықтарынан биогаз өндіру және биоэнергия әлеуеті BEFS жедел бағалау әдіснамасын қолдана отырып есептелді. Шығыс Зангезур экономикалық аймағында жыл сайын 91431,65 тонна өсімдік қалдықтары түзілетіні анықталды, оның ішінде қалдықтардың ең көп мөлшері дәнді және бұршақ дақылдары (жылына 49384 тонна), бидай (жылына 38751 тонна) және қант қызылшасы (жылына 1424,9 тонна) алқаптарында қалады. Экономикалық аймақтың барлық өсімдік қалдықтарынан жылына 101592,992 МВт/сағ биоэнергия өндіру әлеуеті бар екені анықталды, оның ішінде 43058,111 МВт/сағ биоэнергияны бидай қалдықтарынан, 54871,261 МВт/сағ дәнді және бұршақ дақылдарының қалдықтарынан және 1583,443 МВт/сағ қант қызылшасының қалдықтарынан алуға болады. Биогаздың қазба отындарына көміртегі-бейтарап балама ретінде қалдықтармен байланысты шығарындыларды азайту әлеуетін ескере отырып, экономикалық аймақтағы жылдық биогаз әлеуеті 18 286 330 м<sup>3</sup> деп бағаланды, бұл көмірқышқыл газының шығарындыларын жылына 307 210 тонна СО<sub>2</sub> эквивалентіне азайтуға және климаттың өзгеруін азайтуға ықпал етуге мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** дақыл қалдықтары, биоэнергия, көміртегі шығарындыларын азайту.

### Введение

В результате глобализации, расширения международных экономических связей, повышения уровня жизни и роста населения мира проблемы энергетической безопасности становятся все более острыми. Хотя существующие запасы углеводородов могут удовлетворить текущий спрос, их быстрое истощение представляет потенциальную угрозу глобальной энергетической безопасности в ближайшие 40–50 лет. Антропогенные экологические проблемы, особенно последствия изменения климата, еще больше подчеркивают важность расширения использования альтернативных источников энергии. В этом контексте технологическое совершенствование производства энергии из возобновляемых источников, таких как солнечная, ветровая и биомасса, имеет особое значение (Де Вит & Фаидж, 2010).

Преобразование сельскохозяйственных отходов в биоэнергию снижает экологические риски, способствует энергетической безопасности, подтверждает устойчивое управление отходами и обеспечивает доступ к чистым, доступным и надежным источникам энергии. Использование инновационных технологий для мониторинга

предварительной обработки сырья, оптимизации параметров процесса преобразования и измерения объемов производства биоэнергии позволит улучшить экосистему производства и использования биоэнергии (Авогбеми и др., 2024).

Расширение использования возобновляемых источников энергии и рост глобальных экологических проблем подталкивают страны к коллективным действиям. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA) поддерживает расширение сектора возобновляемой энергии, помогая странам разрабатывать соответствующую политику, привлекать инвестиции и предоставлять практические рекомендации по эффективному использованию ресурсов (<https://content.govdelivery.com/accounts/USERE/bulletins/345078e>).

Учитывая прогнозируемое увеличение численности населения мира до 10 миллиардов к 2050 году, ожидается рост мирового сельского хозяйства и ежегодного образования миллионов тонн возобновляемых отходов. Будущая интеграция биопродуктов, полученных из сельскохозяйственных отходов, в агропромышленные системы может снизить образование отходов, повысить эффективность использования ресурсов и устойчивость на протяжении всей цепоч-

ки создания стоимости, а также способствовать развитию экономики замкнутого цикла, минимизируя воздействие на окружающую среду и повышая производительность сельского хозяйства (Грофф и др., 2025).

Согласно базе данных Европейской ассоциации биогаза за 2023 год, сельскохозяйственный сектор вносит значительный вклад в производство биогаза и биометана в Европе: 67% биогаза и 64% биометана получают из сельскохозяйственных культур (<https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/2021-country-reports/>). Это демонстрирует значительную роль сельскохозяйственного сырья, такого как навоз, остатки урожая и другие отходы. В недавно опубликованном отчете Guidehouse «Биогаз 2040 и далее: реалистичный и устойчивый путь к климатической нейтральности» прогнозируется, что к 2040 году сельское хозяйство будет обеспечивать 82% потенциала биогаза: 43% из остатков урожая, 20% из сельскохозяйственных отходов и 19% из навоза. Это демонстрирует устойчивую интеграцию сельскохозяйственного сектора и производства возобновляемого газа (<https://www.europeanbiogas.eu/news/turning-farm-waste-into-renewable-energy-the-alfa-story/>).

Модели государственно-частного партнерства (ГЧП) широко используются в странах по всему миру для содействия производству энергии из биомассы. Эти партнерства в основном реализуются в областях исследований, разработок и инноваций. Кроме того, во многих странах субсидии, гранты и государственные соглашения о закупке электроэнергии играют важную роль в поддержке частного сектора. В Европейском Союзе в рамках программы «Горизонт 2020» было создано государственно-частное партнерство в области биооснованных отраслей промышленности (ГЧП) Европейским Союзом и Консорциумом биооснованных отраслей промышленности (<https://www.etipbioenergy.eu/advanced-bioenergy/>). За период 2014–2020 годов в рамках этого партнерства было объединено 975 миллионов евро финансирования ЕС (программа «Горизонт 2020») и 2,7 миллиарда евро инвестиций частного сектора, что в общей сложности составило 3,7 миллиарда евро. Цель инициативы – обеспечить устойчивое снабжение биомассой путем создания новых цепочек поставок, проведения исследований, повышения эффективности переработки на биофабриках, формирования рынков биопродуктов и разработки соответствующих политических инструментов (ИРЕНА, 2022).

В США Министерство энергетики поддерживает разработку и коммерциализацию биоэнергетических технологий через Управление биоэнергетических технологий (ВЕТО). ВЕТО сотрудничает с университетами и частными компаниями для финансирования исследовательских проектов, пилотных установок и демонстрационных проектов по улучшению биотоплива и биопродуктов ([https://openei.org/wiki/Solar\\_and\\_Wind\\_Energy\\_Resource\\_Assessment\\_\(SWERA\)](https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA))).

Социально-экономические последствия использования биомассы не являются однозначно конструктивными. Высокие инвестиционные и капитальные затраты, технологическая зрелость биотоплива, крупномасштабные поставки биомассы, а также политические и нормативные вопросы относятся к числу ключевых проблем. Несмотря на эти проблемы, при наличии правильных стратегий и решений полная переработка биомассы достижима (Раина и др., 2024).

Бразильская программа *RenovaBio* направлена на содействие производству биотоплива путем установления национальных целевых показателей по выбросам углерода и выпуска углеродных кредитов, называемых СВЮ. Эта инициатива поддерживает выполнение национальных требований к биотопливу и сокращение выбросов парниковых газов посредством государственно-частного партнерства. На сегодняшний день BNDES предоставила финансовую поддержку в размере 195 миллионов долларов США в рамках программы *RenovaBio* (<https://greenfinancelac.org/resources/news/bndes-renovabio-finances-energy-and-environmental-efficiency-improvements-at-biofuel-plants-in-brazil>).

Сельскохозяйственный сектор производит значительное количество биомассы, включая неиспользованные части фруктов и овощей. Примерно 14% овощей и фруктов ежегодно становятся отходами в глобальном масштабе, что приводит к существенному накоплению пищевых отходов. Поэтому эффективное использование пищевых отходов, таких как овощи и фрукты, может стать способом получения биотоплива и снижения зависимости от ископаемого топлива. В работе Дей и др. (2024) обобщены результаты исследований по разработке биотоплива с использованием различных технологий биоконверсии из овощей и фруктов в качестве сырья.

В работе Саху и др. (2025) исследуется потенциал использования биомассы тика (*Tectona*

*grandis*) для производства биоэнергии, одновременно решается проблема заражения тиковых плантаций насекомыми-вредителями. Исследуется потенциальная интеграция производства биоэнергии со стратегиями борьбы с вредителями, и подчеркиваются экономические и экологические преимущества этих синергетических подходов, предполагая, что стратегическое использование отходов тика может обеспечить двойные преимущества: устойчивую утилизацию отходов и снижение численности вредителей.

Уллах и др. (2025) в своих исследованиях рассматривают взаимосвязь между глобальной продовольственной безопасностью и производством биоэнергии, с учетом проблем, связанных с ростом населения, изменением климата и социально-экономическим неравенством, различные аспекты продовольственной безопасности, охватывающие доступность, использование и стабильность, а также биоэнергия как возобновляемый источник энергии, получаемый из биологических материалов, тщательно анализируют проблемы устойчивости, связанные с биоэнергетикой, такие как изменения в землепользовании, выбросы парниковых газов и ограниченность ресурсов.

В работе Мурму и др. (2025) показывается, что кормовые культуры могут использоваться для производства биоэнергии, поскольку фермеры уже имеют опыт в методах управления и располагают необходимой инфраструктурой, а также предполагают, что к 2030 году для производства биомассы потребуется около 22,3 миллиона гектаров пахотных земель и пастбищ. Перевод этих площадей под производство биоэнергии может вынудить традиционный сектор кормового животноводства искать новые пахотные земли. А если производство биоэнергии будет поощряться на сельскохозяйственных угодьях, оно может в конечном итоге конкурировать с выпасом крупного рогатого скота.

В исследовании Зиммер и др. (2025) представлена экономическая оценка мобильных установок для предварительной обработки остатков лесозаготовок в Чили. Результаты показывают, что мобильные установки не могут сравниться по экономии масштаба с крупнейшими коммерческими предприятиями, но их модульная конструкция выгодна при меньших мощностях. В Чили они были бы наиболее подходящими для более удаленных мест и для децентрализованных концепций использования.

Саркар и др. (2023) предприняли попытку рассмотреть устойчивое использование сельскохозяйственных отходов для производства биоэнергии, особенно в азиатских странах, таких как Китай, Индия, Вьетнам, Индонезия, Япония, Бангладеш, Шри-Ланка и др. Рассмотрены доступность различных сельскохозяйственных отходов, их потенциал для производства биоэнергии и логистика в ряде азиатских стран, а также проведен SWOT-анализ.

В работах Павая и др. (2025) показывается, что использование биомассы сорняков для получения возобновляемых биоресурсов может стать устойчивым и экономически эффективным подходом. Наземные сорняки, такие как *Parthenium hysterophorus* и *Lantana camara*, представляют собой серьезную проблему в различных системах землепользования по всему миру. В этой работе обобщен потенциал биомассы *Parthenium u L. camara* в производстве биоэнергии в рамках системы переработки отходов в полезные ресурсы. Также обсуждаются инновационные, экономически эффективные и устойчивые стратегии управления и снижения количества сорной биомассы в контексте производства биоэнергии.

Шахзад и др. (2024) в своем обзорной работе рассматривают потенциал передовых технологий преобразования биомассы, с акцентом на термохимические и биохимические процессы как ключевые методы оптимизации стратегий управления сельскохозяйственными отходами. В то время как биологические процессы ограничены длительным временем обработки и низким выходом, термохимические методы сталкиваются с проблемами, связанными с высокими затратами на обработку и температурными требованиями. В обзоре также сравниваются преимущества и проблемы каждого метода для оценки их общей эффективности и пригодности.

Виджаянти и др. (2025) в своих исследованиях использовали вид папоротника (*Stenochlaena palustris*), широко распространен в заболоченных районах Юго-Восточной Азии, которую местные общины обычно используют для приготовления пищи и лекарств только молодые листья, выбрасывая старые листья и стебли, что приводит к накоплению отходов. Впервые был проведен пиролиз этих отходов с целью изучения их потенциала в качестве источника энергии и химических веществ. Кроме того, был проведен эксперимент по пиролизу для исследования влияния температуры на выход продукта и распределение его химических соединений. Соче-

тание кинетических и пиролизных свойств позволили сделать вывод, что остатки *Stenochlaena palustris* потенциально могут стать полезным источником биоэнергии или химических веществ посредством пиролиза.

Джарвинен и др. (2025) в своей работе представили анализ технологий и устойчивых уровней использования биомассы и отходов для производства энергии, а также применений биоэнергетики в области улавливания и хранения углерода, также рассматривается производство материалов и химических веществ таким образом, чтобы это способствовало достижению целей как в области климата, так и в области охраны природы. В заключение они приходят к выводу, что устойчивое использование биомассы ограничено ее значительными потребностями в земельных ресурсах и последующим негативным воздействием на окружающую среду.

### Материалы и методы исследования

С учетом исследовательских методологий, применяемых в области биоэнергетики, оценка биоэнергетических ресурсов Азербайджана проводится по следующим направлениям (<https://www.area.gov.az/az/page/yasil-teknologiyalar/biokutle>):

1. Растительные отходы: В Азербайджане биомассу можно получить из растительных отходов, образующихся при выращивании однолетних сельскохозяйственных культур (зерновых, кукурузы, хлопка и др.). Эти отходы могут быть использованы для производства биогаза или твердого биотоплива.

2. Фруктовые и десертные отходы: Фруктовые отходы, образующиеся в регионах выращивания фундука и других плодовых культур, особенно скорлупа фундука, могут быть использованы в качестве сырья для производства энергии или топливных брикетов.

3. Животноводческие отходы: Навоз является одним из основных источников производства биогаза в процессе анаэробного разложения. Полученный биогаз может быть использован для производства электроэнергии и тепла.

4. Лесные отходы: Обрезанные и срубленные части древесины, образующиеся в ходе лесохозяйственной деятельности, рассматриваются как потенциальное сырье для производства биоэнергии.

5. Бытовые сточные воды: Эффективная очистка бытовых сточных вод и их использова-

ние в производстве энергии требует применения современных технологий очистки. Этот процесс играет важную роль как в управлении отходами, так и в обеспечении энергетической безопасности.

6. Твердые бытовые отходы: В международной практике твердые бытовые отходы рассматриваются в качестве сырья для биоэнергетики только при наличии сортировочной инфраструктуры (Отчет об оценке биоэнергетического потенциала Азербайджана, 2024).

Наиболее надежной и широко используемой методологией оценки потенциала производства биогаза из растительных остатков является методология BEFS (Биоэнергетика и продовольственная безопасность), которая также используется в наших исследованиях.

Растительные отходы оцениваются для определения количества потенциального сырья из сельскохозяйственной продукции и отходов переработки, пригодного для производства биоэнергии. В данном случае основное внимание уделяется продуктам, которые производятся регулярно и в больших объемах. Согласно подходу BEFS, использование сельскохозяйственных остатков в целях биоэнергетики не должно оказывать негативного воздействия на продовольственную безопасность, защиту экологического баланса и социально-экономическую стабильность фермерских хозяйств, а, наоборот, должно создавать добавленную стоимость. При оценке сырья для биоэнергетики учитываются три основных показателя: доступное количество сырья; экономическая ценность (альтернативное использование, затраты на сбор и логистику и т.д.); энергетическое качество.

Сельскохозяйственные отходы обычно используются для различных целей, но при переработке в энергию они могут создавать более высокую экономическую ценность. По этой причине методология BEFS рекомендует рассматривать для производства биоэнергии только неиспользованные или неэффективно используемые отходы. То есть, в качестве основы берется расчет реального объема, пригодного для энергетических целей, после вычета отходов, предназначенных для защиты плодородия почвы и других необходимых целей.

Применение этого подхода включает следующие этапы:

- определение среднегодового количества растительных остатков,
- определение отходов, которые должны оставаться на поле для защиты почвы,

- оценка части, предназначенной для более ценных альтернативных целей,
- расчет общего объема отходов, которые могут быть направлены на производство биоэнергии.

Доступные растительные остатки рассчитываются по следующей формуле (BEFS RA, 2014):

$$РОБЭ = \sum PO_{\text{общее}} - PO_s - ROI_{(i-j)} \quad (1)$$

Где:

РОБЭ (тонн/год) – объем растительных остатков, пригодных для производства биоэнергии,

PO<sub>общее</sub> (тонн/год) – общее количество растительных остатков, образовавшихся за год,

PO<sub>s</sub> (тонн/год) – остатки, предназначенные для ухода за почвой и других неэнергетических целей,

ROI<sub>(i-j)</sub> – остатки, предназначенные для других альтернативных целей.

Поскольку некоторые виды растений производят более одного типа остатков, при расчете

их биоэнергетического потенциала следует учитывать каждую категорию остатков.

Одним из основных показателей, характеризующих биоэнергетическое сырье, является его способность преобразовываться в энергию. Теплотворная способность каждого типа сырья – точнее, низшая теплотворная способность (НТП) – отражает совокупное воздействие физико-химических факторов, таких как углерод, водород, кислород, азот и сера, а также влажность, летучие вещества и связанный углерод. В исследованиях BEFS НТП считается основным показателем, определяющим энергетическое качество сырья. Здесь различают два типа низшей теплотворной способности (НТП):

1. НТП, получаемая при непосредственном сжигании биомассы или в виде брикетов;
2. Показатель НТП топлива, получаемого из биомассы, такого как биогаз, синтетический газ и биоуголь.

В таблице 1 приведены низшие теплотворные способности различных видов биомассы.

**Таблица 1**

*Низшая теплотворная способность (НТП) различных видов биомассы (Отчет о расчете биоэнергетического потенциала в зеленых энергетических зонах, 2024)*

Сырье	Низшая теплотворная способность (НТП)	Сжигание (брикеты/пеллеты, мкг/кг)	Газификация (мкг/кг)
Хлопковая нить	14,5	14,45	18,26
Стебель хлопка	13,63	13,63	16,33
Скорлупа фундука	17,21	18,42	19,93
Шелуха фундука	17,24	18,42	19,93
Шелуха арахиса	15	20,1	19
Кукурузный початок	15,11	20,49	19,08
Кукурузная шелуха	13,31	6,35	17,68
Стебель кукурузы	16,75	22,03	20,36
Рисовая шелуха	13,8	20,03	18,07
Стебель сорго	15,81	23,68	19,63
Солома сорго	16,38	17,25	20,07
Солома ячменя	14,5	16,29	17,5
Пшеничная шелуха	17,8	16,34	21,18
Пшеничная солома	16,63	13,42	20,27

Для сравнения, низшая теплотворная способность некоторых традиционных видов топлива составляет: сырая нефть – 44 МДж/кг, дизельное топливо – 45 МДж/кг, бензин – 46 МДж/кг, природный газ – 55 МДж/кг.

В процессе производства биоэнергии учитываются как электрическая, так и тепловая формы энергии, получаемой в результате переработки биомассы, и определяется потенциальный объем производства на единицу энергии. На этом этапе в качестве основы берутся состав и теплотворная способность топливных газов (биогаза, отходящих газов, природного газа и т. д.).

На основе представленной выше теоретической и методологической основы считается, что оценка биоэнергетического потенциала не должна ограничиваться только количественными показателями ресурсов, а должна проводиться сбалансированным образом с учетом защиты агробиоразнообразия и продовольственной безопасности (Садигов & Маджнунлу, 2023).

Планирование биоэнергетических проектов в чувствительных к природным и сельскохозяйственным условиям районах, таких как Восточно-Зангезурский экономический регион, должно координироваться с факторами землепользования, экосистемных услуг и социально-экономической устойчивости (Гулиев, 2023). Применение методологии BEFS показывает, что более целесообразно привлекать для производства биоэнергии только неиспользуемые или неэффективные ресурсы биомассы. Такой подход позволяет предотвратить ослабление агробиоразнообразия и конкуренцию с производством продуктов питания. На мой взгляд, оценки, основанные на интегрированных пространственных, экономических и энергетических моделях, формируют более реалистичные и применимые результаты для региона. Следовательно, оценка биоэнергетического потенциала на научной основе может стать важным инструментом принятия решений в долгосрочных стратегиях устойчивого развития Восточно-Зангезурского экономического района.

### Результаты исследования и их обсуждение

Восточно-Зангезурский экономический район расположен в восточной части Зангезурского плато, окружен Зангезурским горным хребтом в Малом Кавказе, и занимает общую площадь 744 800 га. В состав этого экономического региона входят административные районы Зангилян,

Губадли, Джабраил, Лачин и Калбаджар (Рисунок). Предгорья и равнины исследуемой территории, высота которых достигает 300-400 м, характеризуются жарким летом и мягкой зимой. Средняя температура теплых месяцев составляет 24°-26°С, а средняя температура холодных месяцев – 1,0°-3,9°С. Климат низменных и среднегорных районов умеренный, со средней температурой 12-10°С в теплые месяцы и 1-2°С в холодные (Абдурахманов, 2023).

**Рисунок 1**

*Карта расположения исследуемой территории*



При характеристике растительного покрова объекта исследования в высокогорной зоне района встречаются альпийские и субальпийские луга, в среднегорной зоне широко распространены широколиственные леса и послелесные луговые кустарники, а в предгорьях и низменных горных зонах – степные и сухостепные растения (Ибадуллаева и др., 2023).

Почвенный покров Восточно-Зангезурского экономического района можно охарактеризовать следующим образом: в высокогорной зоне распространены различные подтипы горно-луговых почв, в среднегорной зоне – бурые горно-лесные и коричневые горно-лесные почвы, в средне- и низкогорных районах – горно-черноземы, горно-серо-коричневые почвы, а в предгорьях и равнинах распространены различные подтипы и видовое разнообразие серо-коричневых, серо-бурых, сероземов, сероземно-луговых, пойменных аллювиально-луговых почв (Юсифова & Ализаде, 2025а).

Исследуемая территория подходит для развития зерноводства, виноградарства, картофеле-

водства, табаководства, плодоводства, частично шелководства и животноводства. Низменный и среднегорный климат позволяет выращивать здесь сельскохозяйственные культуры в богарных условиях.

***Оценка потенциала производства биоэнергии из растительных остатков сельскохозяйственных культур в Восточно-Зангезурском экономическом районе***

Использование биоэнергии в сельском хозяйстве в основном основано на растениеводстве и животноводстве, что способствует внедрению интегрированной модели производства биоэнергии, охватывающей выращивание сельскохозяйственных культур, животноводство и производство биоэнергии. Однако точный вклад таких интегрированных систем в смягчение различных экологических проблем, связанных с растениеводством и животноводством, остается неясным.

Тревожный рост глобальной зависимости от ископаемого топлива, такого как уголь, нефть и природный газ, привел к истощению этих ресурсов. Быстрая индустриализация и рост населения существенно увеличили спрос на энергию. Доступ к чистой и экологически устойчивой энергии имеет решающее значение для устойчивого развития человеческого общества и для удовлетворения этого постоянно растущего спроса (Юсифова & Ализаде, 2025б). Биомасса представляет собой многообещающий альтернативный источник для производства чистой энергии. Среди наиболее жизнеспособных вариантов возобновляемой энергии для создания более устойчивой энергетической системы – использование растительных отходов.

Восточно-Зангезурский экономический регион – это крупный сельскохозяйственный регион, занимающий важное место в экономике Азербайджана. Благоприятные почвенно-климатические условия создали широкие возможности для развития сельского хозяйства в регионе. Следует отметить, что до оккупации в этом регионе были широко развиты различные отрасли сельского хозяйства – зерновое, виноградарство, табаководство, кормовое земледелие, картофелеводство, овощеводство, хлопководство и животноводство (Велиев, 2020).

Для расчета потенциала производства биоэнергии из растительных остатков в Восточно-Зангезурском экономическом районе в пер-

вую очередь был рассмотрен уровень развития сельского хозяйства и его основные тенденции в регионе. На основе данных Государственного статистического комитета был проведен анализ состояния использования земельных ресурсов территории под сельскохозяйственные культуры (<https://stat.gov.az/source/agriculture/>).

Животноводство в исследуемой области более развито, чем сельское хозяйство: пастбища и загоны занимают 209,8 тыс. га, а пахотные земли – в 3,5 раза меньше, 59,3 тыс. га. Наибольшая площадь обрабатываемых земель приходится на Джабраильский (20,5 тыс. га) и Губадлинский (15,0 тыс. га) районы. Площадь земель под многолетними культурами очень мала, всего 11 тыс. га. Наибольшее количество многолетних культур (7,2 тыс. га) и пахотных земель (20,5 тыс. га) находится на территории Джабраильского района (Мамедов и др., 2025).

Специалисты Аграрного исследовательского центра при Министерстве сельского хозяйства Азербайджанской Республики составили таблицы, отражающая прогнозируемые пахотные земли на период после освобождения территории в Восточно-Зангезурском экономическом районе. Согласно этим данным, наибольшая площадь планируется к засеванию на объекте исследования под зерновые культуры (21 800 га), 6 500 га – под фрукты и ягоды, а 1 400 га – под картофель, овощи и дыни. (<https://agrodata.az/>).

В настоящее время в исследуемом экономическом районе зерновые, особенно пшеница, занимают основное место в структуре посевов в 2024 году и доминируют как по площади посевов, так и по общему объему производства. Одновременно наблюдается высокая урожайность картофеля и овощных культур, что свидетельствует об эффективности орошения и агротехнических мероприятий. Хотя урожайность сахарной свеклы относительно высока, площадь посевов остается ограниченной. Площади под плодовые и виноградарские культуры имеют потенциал для расширения, но показатели урожайности пока находятся на среднем уровне. В целом, повышение урожайности является главным приоритетом для увеличения производства сельскохозяйственной продукции в регионе (таблица 2).

В Азербайджане выращивают 14 видов растений, пригодных для производства современного твердого биотоплива или биоэнергии (таблица 3).

**Таблица 2**

Основные сельскохозяйственные культуры, возделываемые в Восточно-Зангезурском экономическом районе (Сельское хозяйство Азербайджана, 2024)

Культуры	Годовой объем производства, тонн/год	Площадь обрабатываемых земель, га	Производительность, тонн/га
Пшеница (озимая и яровая)	31 000,5	29 286,8	1,06
Злаки и зернобобовые (всего)	39 507,2	32 774,4	1,21
Картофель	622,5	39,2	15,9
Овощи	1 214,5	92,5	15,7
Бахчевые	19,9	6,1	3,3
Фрукты и ягоды	1 326,5	294,0	4,5
Виноград	237,6	35,7	5,9
Сахарная свекла	1 424,9	159,9	16,5
Подсолнечник (в качестве зерна)	33,0	30,0	1,1

**Таблица 3**

Виды культур и растительных остатков, пригодных для производства биоэнергии в Азербайджане

Сельскохозяйственные культуры	Вид остатка	Сельскохозяйственные культуры	Вид остатка
Пшеница	солома	Хлопок	Стебель
	шелуха		нить
Ячмень	солома	Табак	Стебель
	шелуха		шелуха
Кукуруза	стебель	Чай	листья
	початок		Сахарная свекла
	шелуха	Рожь	солома
Подсолнечник	Стебель	Просо	солома
	шелуха		шелуха
Жмых	шелуха	Сорго	шелуха
Рис	солома	Овес	солома
	шелуха		шелуха

Оценка образования растительных остатков и их пригодности для производства биоэнергии проводилась с использованием методологического подхода BEFS Rapid Appraisal. На основе национальных статистических данных были определены общий объем основных растительных остатков, их текущее использование и доля, которая потенциально может быть выделена для целей биоэнергетики.

На основе результатов расчетов было установлено, что, согласно официальной статистике, в 2024 году по всей стране было собрано приблизительно 2 297 731 тонн пшеничной соломы, 1 158 269 тонн ячменной соломы, 704 593 тонны стеблей хлопка и 440 745 тонн стеблей кукурузы-

зы. Было отмечено, что приблизительно 25 процентов соломы, собранной с пшеницы и ячменя (574 432,96 тонны и 289 567,24 тонны соответственно), оставалось на полях для поддержания плодородия почвы и повышения урожайности, а остальная часть в основном использовалась в качестве корма для животных и подстилки в стойлах. Аналогичный подход был применен к стеблям хлопка и кукурузы, и было принято, что в среднем 25 процентов этих остатков оставались на полях. На основе полученных статистических данных была составлена таблица распределения доступных растительных остатков для производства биоэнергии в Восточно-Зангезурском экономическом районе (таблица 4).

**Таблица 4**

Распределение доступных растительных остатков для производства биоэнергии в Восточно-Зангезурском экономическом районе

Сырье	Площадь посевов, га	Общее количество растительных остатков, тонн/год	Остаток растительных остатков на поле		Остаточный урожай, т/га
			%	тонн/год	
Пшеница	29 286,8	38 751	25%	9 688	1,32
Зерновые и бобовые	32 774,4	49 384	25%	12 346	1,51
Картофель	39,2	311	25%	77,75	7,93
Овощи	92,5	607	25%	151,75	6,56
Бахчевые	6,1	19,9	25%	4,975	3,26
Фрукты и ягоды	294	663,25	25%	165,8	2,26
Виноград	35,7	237,6	25%	59,4	6,66
Сахарная свекла	159,9	1 424,9	25%	356,2	8,91
Подсолнечник	30	33	25%	8,25	1,10

**Расчет потенциала производства биоэнергии из растительных остатков**

Расчет потенциала производства биоэнергии производился следующим образом:

$$\text{Потенциал производства биоэнергии} = \text{Количество доступных для производства биоэнергии остатков} \times \text{Коэффициент преобразования остатков в электрическую энергию} \times \text{Коэффициент полезной работы}_{\text{остатки} - \text{электрическая энергия}} \quad (2)$$

Принятые показатели:  
 Энергетическая емкость = 16 МДж/кг  
 Коэффициент полезной работы (пессимистический сценарий) = 25 % = 0,25  
 Преобразование энергии:  
 1 МДж = 0,2778 кВт·ч

Результаты расчета потенциала производства биоэнергии из растительных остатков в Восточно-Зангезурском экономическом районе представлены в таблице 5.

**Таблица 5**

Потенциал производства биоэнергии из растительных остатков в Восточно-Зангезурском экономическом районе

Тип растения	Количество растительных остатков, тонн/год	Ресурсный потенциал		Потенциал производства биоэнергии	
		МДж/год	МВт·ч/год	МДж/год	МВт·ч/год
Пшеница	38 751	620 016 000	172 232. 445	155 004 000	43 058. 111
Зерновые и бобовые	49 384	790 144 000	219 485. 043	197 536 000	54 871. 261
Картофель	311	4 976 000	1 382. 893	1 244 000	345. 723
Овощи	607	9 712 000	2 698. 354	2 428 000	674. 588
Бахчевые	19,9	318 400	88. 464	79 600	22. 116
Фрукты и ягоды	663,25	10 612 000	2 948. 014	2 653 000	737. 003
Виноград	237,6	3 801 600	1 056. 312	950 400	264. 078
Сахарная свекла	1 424,9	22 798 400	6 333. 770	5 699 600	1 583. 443
Подсолнечник	33	528 000	146. 678	132 000	36. 669
Итого	91431.65	1462906400	406371.973	360027	101592.992

Следует отметить, что расчеты проводились на основе одного и того же методологического подхода. Во всех случаях нижняя теплотворная

способность принималась равной 16 МДж/кг, а коэффициент полезной работы – 25%. Полученные результаты отражают теоретический потен-

циал производства биоэнергии и носят предварительный оценочный характер.

### **Роль биоэнергии в сокращении парниковых газов**

Получение биоэнергии из сельскохозяйственных отходов является одной из стратегий устойчивого управления отходами благодаря многочисленным преимуществам. Производство биоэнергии, которое обещает снизить зависимость от ископаемого топлива и сократить выбросы парниковых газов, конкурирует с пахотными землями и ресурсами, имеющими решающее значение для производства продуктов питания (Садигов и др., 2025).

Учитывая все это, мы провели нижеследующие расчеты, чтобы определить, насколько сокращаются выбросы парниковых газов при использовании биоэнергии, полученной из отходов растениеводства в Восточно-Зангезурском экономическом районе:

Предполагается, что из 1 тонны сырья в результате использования растительных остатков в процессе анаэробного сбраживания получается 200 м<sup>3</sup> биогаза. Годовой объем растительных остатков, доступных для целей биоэнергетики в Восточно-Зангезурском экономическом районе, составляет 91 431,65 тонн. На этой основе годовой объем биогаза рассчитывается следующим образом:

$$O_{\text{бр}} = 91\,431.65 \times 200 = 18\,286\,330 \text{ м}^3/\text{год} \quad (3)$$

С учетом содержания метана в биогазе и потенциала глобального потепления парниковых газов, снижение выбросов определялось следующим коэффициентом пересчета:

$$1 \text{ м}^3 \text{ биогаз} \Rightarrow 0.0168 \text{ т CO}_2\text{-экв}$$

В этом случае снижение выбросов в результате использования растительных остатков в энергетических целях:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{-экв} &= 18\,286\,330 \times 0.0168 = \\ &= 307\,210 \text{ т CO}_2\text{-экв/год} \end{aligned} \quad (4)$$

Было определено, что на основе существующей базы данных по отходам сельскохозяйственных культур в Восточно-Зангезурском экономическом районе возможно производство приблизительно 18,29 млн м<sup>3</sup> биогаза, что может привести к сокращению выбросов углекислого газа на 307 210 тонн CO<sub>2</sub>-экв/год.

### **Выводы**

Было установлено, что в Восточно-Зангезурском экономическом районе ежегодно образуется 91431,65 тонн растительных отходов, из которых 54,01% приходится на зерновые и бобовые культуры (49384 тонны/год), 42,3% (38751 тонна/год) и 1,56% (1424,9 тонны/год) – на сахарную свеклу.

Согласно расчетам, из растительных отходов, образующихся в данном экономическом районе, можно производить 101 592,992 МВт·ч биоэнергии в год, из которых 43 058,111 МВт·ч/год биоэнергии может быть получено из остатков пшеницы, 54 871,261 МВт·ч/год из остатков зерновых и бобовых культур, 1 583,443 МВт·ч/год из остатков сахарной свеклы, а оставшиеся 2 080,117 МВт·ч/год биоэнергии могут быть получены из отходов других растений (картофеля, овощей, фруктов, подсолнечника и т. д.).

Согласно расчетам, проведенным для определения роли биоэнергетического потенциала исследуемого региона в сокращении выбросов углекислого газа, годовой потенциал биогаза в Восточно-Зангезурском экономическом районе составляет 18 286 330 м<sup>3</sup>, что может привести к сокращению выбросов углекислого газа на 307 210 тонн CO<sub>2</sub>-экв/год.

Для смягчения экологических угроз и обеспечения энергетической безопасности производство биоэнергии на основе сельскохозяйственных отходов в Восточно-Зангезурском экономическом районе, может открыть новые перспективы в устойчивом энергетическом производстве с точки зрения возобновляемости, экологичности, экономической эффективности и социальной приемлемости. В качестве альтернативного источника энергии это также может помочь снизить количество парниковых газов, выделяемых при сжигании ископаемого топлива, следовательно, это может способствовать достижению седьмой и тринадцатой Целей устойчивого развития (ЦУР), которая заключается в обеспечении доступа к надежной, современной и устойчивой энергии для всех и борьбе с изменениями климата.

### **Финансирование**

Данное исследование проводилось без целевого финансирования и в рамках собственной научной инициативы авторов.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в отношении данной исследовательской работы. Опубликованные результаты полностью отражают научную позицию авторов и выполнены без влияния третьих лиц.

## Вклад авторов

*Махлуга Юсифова: разработка концепции, научное руководство, рецензирование и редактирование текста;*

*Шамс Ализаде: исследование, обработка данных, анализ, написание текста.*

## Литература

- Абдурахманов, Ф.Т. (2023). Анализ климатических показателей Восточно-Зангезурского региона и оценка роли агроклиматических ресурсов в развитии сельскохозяйственных угодий. *Научные труды Нахчыванского университета*, 4, 229-236 [на Азерб.]
- Велиев, А.Г. (2020). Оценка потенциала сельскохозяйственных почв на оккупированных территориях. *Сельскохозяйственная экономика*, 3 (33), 60-70. [на Азерб.]
- Гулиев, Е.А. (2023). *Роль Карабахского и Восточно-Зангезурского экономических регионов в устойчивом развитии Азербайджана*. Монография. Баку: Кооперативное издательство. [на Азерб.]
- Отчет о расчете биоэнергетического потенциала в зеленых энергетических зонах*. (2024). Центр сельскохозяйственных исследований, Баку. [на Азерб.]
- Отчет об оценке биоэнергетического потенциала Азербайджана*. (2024). Центр сельскохозяйственных исследований. Баку. [на Азерб.]
- Сельское хозяйство Азербайджана*. (2024). Статистический вестник. АРДСК, Баку. [https://www.stat.gov.az/menu/6/statistical\\_yearbooks/source/agriculture\\_2024.zip](https://www.stat.gov.az/menu/6/statistical_yearbooks/source/agriculture_2024.zip) [на Азерб.]
- Awogbemi, O., Von Kallon, D.V., Ray, R.C. (2024). *Conversion of Agriculture Residues for Bioenergy Production*. In: Arora, J., Joshi, A., Ray, R.C. (eds) *Transforming Agriculture Residues for Sustainable Development. Waste as a Resource*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-61133-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61133-9_12)
- BEFS Rapid appraisal (BEFS RA)*. (2014). User Manual. FAO.
- De Wit, M. & Faaij, A. (2010). European biomass resource potential and costs. *Biomass and Bioenergy*, 34(2), 188- 202. doi:10.1016/j.biombioe.2009.07.011.
- Dey, D., Kundu, K., Singh, D. (2024). *Bioenergy Production from Vegetable and Fruit Waste*. In: Arya, R.K., Verros, G.D., Verma, O.P., Hussain, C.M. (eds) *From Waste to Wealth*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-7552-5\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-99-7552-5_11)
- Groff, M.C., Flores, L.F., Vaidya, K. & Priyanka, P.P. (2025). *Agricultural Renewable Residues for a Sustainable Agro-Industrial Production*. In: Shaaban, M. (eds) *Soils and Sustainable Agriculture. Frontier Studies in Soil Science*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-91114-9\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-031-91114-9_34) pp.809-836
- Ibadullayeva, S., Gurbanov, E., Abdiyeva, R., Abiyev, Y. (2023). Geobotanical zoning of Karabakh and East Zangezur. *Journal of Life Sciences & Biomedicine*, 5(78), 49-53. <https://doi.org/10.59849/2710-4915.2023.2.49>
- IRENA. (2022). *REmap 2030 Full Report*. <https://www.irena.org/publications/2014/Jun/REmap-2030-Full-Report>.
- Järvinen, M., Paulomäki, H., Kasteren, H., Oksanen, E., Herzon, I., Forsius, M., Akujärvi, A., Holmberg, M., Juntila, V., Pekkonen, M., Schulz, T., Kujala, H. & Arasto, A. (2025). *Bioenergy and Waste*. In: Järvinen, M., Paulomäki, H. (eds) *Designing Renewable Energy Systems within Planetary Boundaries*. Green Energy and Technology. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-69856-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-69856-9_6)
- Mammadov, G.Sh., Mammadova, S.Z., Yusifova, M.M., Osmanova, S.A., Mammadov Z.R., Aghayeva S.A., Gasimov, A.M. & Alizade, Sh.N. (2025). Assessment of Modern Natural-Ecological, Land and Agricultural Resources of the East Zangezur Economic Region of the Republic of Azerbaijan. *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 14(5), 787-797. <https://doi.org/10.47278/journal.ijab/2025.171>
- Murmu, K., Murmu, S., Sarkar, A. & Moulick, D. (2025). *Perennial Forage Cropping System and Bioenergy Production*. In: Singhal, R.K., Indu, El Sabagh, A., Dwivedi, K.K. (eds) *Forage Crops in the Bioenergy Revolution*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2536-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2536-9_4)
- Pawaiya, A., Chaudhary, M., Suthar, S. (2025). *The Potential Utility of Terrestrial Weed Biomass in Bioenergy Production*. In: Mandpe, A., Paliya, S., Shah, M.P. (eds) *Sustainable Waste Management. Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-85685-3\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-85685-3_14) pp 211–221
- Raina, N., Chuetor, S., Elalami, D., Saida Tayibi, S. & Barakat, B. (2024). Biomass Valorization for Bioenergy Production: Current Techniques, Challenges, and Pathways to Solutions for Sustainable Bioeconomy. *Bioenergy Research*, 17, 1999–2028. <https://doi.org/10.1007/s12155-024-10792-x>
- Sadigov, R.A. & Macnunlu, U.Kh. (2023). Acquisition of value-added products from plant-based wastes. *UNEC Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(1), 69–79. <https://doi.org/10.61640/ujeas.2023.0509>.
- Sadigov, R.A., Nazarova, M.K., Garayeva, I.E., Mammadova, G.I., Hasanova, T.A. & Muhammad M. (2025). Modern research of using alternative energy resources in Azerbaijan. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 14(3), 907-915. <http://doi.org/10.11591/ijaas.v14.i3.pp907-915>.

Sahu, M., Ikram, M., Pal, P. & Sharma, A. (2025). Bioenergy Production from Teak Residues: Assessing the Role in Controlling Insect Pest Infestations. *BioEnergy Research*, 18, 53. <https://doi.org/10.1007/s12155-025-10849-5>

Sarkar, J.D., Sarkar, A.K. & Mondal, P. (2023). *Sustainable Manipulation of Agricultural Residues in Bioenergy Production*. In: Rakshit, A., Biswas, A., Sarkar, D., Meena, V.S., Datta, R. (eds) *Handbook of Energy Management in Agriculture*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-7736-7\\_36-1](https://doi.org/10.1007/978-981-19-7736-7_36-1)

Shahzad, H.M.A., Asim, Z., Khan, S.J. Zukhruf Asim, Sher Jamal Khan, Fares Almomani, Khaled A. Mahmoud, Muhammad Raza Ul Mustafa & Kashif Rasool (2024). Thermochemical and biochemical conversion of agricultural waste for bioenergy production: an updated review. *Discover Environment*, 2, 134. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00171-w>

Ullah, Z., Iqbal, J., Abbasi, B.A., Ali, I., Ijaz Sh., Yaseen, T., Munir, M., Ashraf, Z., Ul Haq, B. & Mahmood, T. (2025). *Global Food Security and Bioenergy Production*. In: Singhal, R.K., Indu, El Sabagh, A., Dwivedi, K.K. (eds) *Forage Crops in the Bioenergy Revolution*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2536-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2536-9_2)

Wijayanti, H., Putra, M.D., Mardina, P., Juwita, R., Madani, Z.D.A., Hendrawan, R.D., Sari, A.D.J. & Ramadina, A.A. (2025). Sustainable valorization of *Stenochlaena palustris* residues to bioenergy and green chemicals via pyrolysis: thermal decomposition, kinetic analysis, and product distributions. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 23097–23113. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-37016-9>

Yusifova, M. & Alizade Sh. (2025). Prospects for the use of soil resources in the East Zangezur economic region of Azerbaijan in Agriculture. *11th Eurasian Soil Congress "Innovations in Soil Science and Plant Nutrition under Climate Change"*, September 1-4, Samsun, Turkiye, 71-80. [https://www.fesss.org/upload\\_pic/1b91ebcc923c737dbec602769587fee7.pdf](https://www.fesss.org/upload_pic/1b91ebcc923c737dbec602769587fee7.pdf)

Yusifova, M.M. & Alizade, Sh.N. (2025). Assessment of solar energy potential in Zangilan, Kalbajar and Qubadli districts of Azerbaijan on the spring equinox. *Eurasian Journal of Ecology*, 82 (1), 45-54. <https://doi.org/10.26577/EJE202582104>

Zimmer, T., Glöser-Chahoud, S. & Schultmann, F. (2025). *Techno-Economic Analysis of Mobile Production Plants for Bioenergy Carriers*. In: Braun, A.C., Espinosa Gutiérrez, G., Tröger, D., Hirth, T. (eds) *Eco-Industrial Development as an Industrial Strategy*. Green Energy and Technology. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-73576-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-73576-9_14)

<https://content.govdelivery.com/accounts/USERE/bulletins/345078e>

<https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/2021-country-reports/>

<https://www.area.gov.az/az/page/yasil-teknologiyalar/biokutle>

<https://agrodata.az/>

<https://stat.gov.az/source/agriculture/>

<https://www.europeanbiogas.eu/news/turning-farm-waste-into-renewable-energy-the-alfa-story/>

<https://www.etipbioenergy.eu/advanced-bioenergy/>

[https://openei.org/wiki/Solar\\_and\\_Wind\\_Energy\\_Resource\\_Assessment\\_\(SWERA\)](https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA))

<https://greenfinancelac.org/resources/news/bndes-renovabio-finances-energy-and-environmental-efficiency-improvements-at-biofuel-plants-in-brazil>

#### **Сведения об авторах:**

Юсифова Махлуга Маил кызы – кандидат биологических наук, доцент, заведующая кафедрой географической экологии Бакинского государственного университета (Баку, Азербайджан, e-mail: [mehluqe\\_yusifli@mail.ru](mailto:mehluqe_yusifli@mail.ru)).

Ализаде Шамс Низами кызы – докторант кафедры географической экологии Бакинского государственного университета (Баку, Азербайджан, e-mail: [alizade.shams@mail.ru](mailto:alizade.shams@mail.ru)).

#### **Information about authors:**

Yusifova Mahluga Mail gizi – PhD of Biological Sciences, Ass. Prof., Head of the Department of Geographical Ecology, Baku State University (Baku, Azerbaijan, e-mail: [mehluqe\\_yusifli@mail.ru](mailto:mehluqe_yusifli@mail.ru)).

Alizade Shams Nizami gizi – PhD student of the Department of Geographical Ecology, Baku State University (Baku, Azerbaijan, e-mail: [alizade.shams@mail.ru](mailto:alizade.shams@mail.ru)).

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

Юсифова Махлуга Маил кызы – биология ғылымдарының докторы, доцент, Баку мемлекеттік университетінің географиялық экология кафедрасының меңгерушісі (Баку, Әзірбайжан, e-mail: [mehluqe\\_yusifli@mail.ru](mailto:mehluqe_yusifli@mail.ru)).

Ализаде Шамс Низами қызы – Баку мемлекеттік университетінің географиялық экология кафедрасының аспиранты (Баку, Әзірбайжан, e-mail: [alizade.shams@mail.ru](mailto:alizade.shams@mail.ru)).

Поступила 12 января 2026 года

Принята 25 марта 2026 года

**A. Kabdulmazhituly<sup>1\*</sup>, A.A. Rysmagambetova<sup>2</sup>,  
Zh. Rakhimzhan<sup>1</sup>, A.K. Murzalimova<sup>3</sup>, R.M. Tazitdinova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>«Shakarim University» NJSC, Semey, Kazakhstan

\*e-mail: akabdulmazhituly@bk.ru

## COMPARATIVE ASSESSMENT OF HEAVY METAL CONTENT IN SOILS OF INDUSTRIAL ZONES IN UST-KAMENOGORSK

In the city of Ust-Kamenogorsk, which is the largest industrial center of the East Kazakhstan region, long-term activities of non-ferrous metallurgy and thermal energy enterprises lead to the accumulation of heavy metals in the soil and form foci of sustainable man-made pollution. Among such pollutants, lead (Pb), cadmium (Cd), copper (Cu) and zinc (Zn) are especially dangerous because they persist in the soil for a long time, accumulate in Biosystems and pose a serious threat to the ecosystem and human health. The purpose of the study is to determine the actual concentration of heavy metals in the soil in the industrial zones of Ust-Kamenogorsk and compare them with the maximum permissible concentrations (MPC) approved in the Republic of Kazakhstan, as well as assess the level of environmental risk in the region. At the same time, the results obtained make it possible to compare the concentrations recorded in industrial areas with natural levels in the background area, which is important in assessing the real scale of the man-made load.

The scientific and practical significance of the study is that it provides new data reflecting the real state of the soil in an area with a high level of industrial pollution and forms the necessary scientific basis for planning environmental measures. The methodology was to take samples from a soil layer at a depth of 0-20 cm, prepare them to use the acid dissolution method according to ISO 11466 standard and determine the concentrations of Pb, Cd, Cu and Zn using atomic absorption spectrometry (AAS).

The results showed that in soils in the industrial zone, the content of Pb and Cd exceeds MPC by 5-11 times, Zn and Cu-by 2-5 times, respectively, and the concentrations in the background zone correspond to the standards. Comparison with natural levels detected in the background area proves that the accumulation of heavy metals was formed as a result of man-made impacts characteristic only of industrial points and clearly shows the spatial differences between the sources of pollution. This proves the High man-made impact of industrial facilities and the presence of a risk of heavy metal migration in the region. The value of the study lies in the fact that it provides quantitative data that allows you to determine the exact proportion of polluting sources, conduct environmental monitoring and plan restoration work.

The practical significance of the work lies in the fact that the results obtained can be used in the development of programs for environmental assessment of industrial territories, Zoning By risk levels and remediation.

**Keywords:** heavy metals, soil pollution, atomic absorption spectrometry, maximum permissible concentration, Ust-Kamenogorsk.

A. Қабдулмәжитұлы<sup>1\*</sup>, А.А. Рысмагамбетова<sup>2</sup>, Ж. Рахымжан<sup>1</sup>,  
А.К. Мурзалимова<sup>3</sup>, Р.М. Тазитдинова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

<sup>2</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>«Шәкәрім университеті» КеАК, Семей, Қазақстан

\*e-mail: akabdulmazhituly@bk.ru

### Өскемен қаласының өнеркәсіптік аймақтарындағы топырақтардағы ауыр металдардың мөлшерін салыстырмалы бағалау

Шығыс Қазақстан облысының ірі өнеркәсіптік орталығы болып табылатын Өскемен қаласында түсті металлургия және жылу энергетика кәсіпорындарының ұзақ жылдық қызметі топырақта ауыр металдардың жиналуына әкеліп, тұрақты техногендік ластану ошақтарын қалыптастыруда. Мұндай ластаушылардың ішінде қорғасын (Pb), кадмий (Cd), мыс (Cu) және мырыш (Zn) ерекше қауіпті, себебі олар топырақта ұзақ сақталып, биожүйелерге жинақталып, экожүйе мен адам денсаулығына елеулі қауіп төндіреді. Зерттеудің мақсаты – Өскемен қаласының

мақтарындағы топырақтағы ауыр металдардың нақты концентрациясын анықтап, оларды Қазақстан Республикасында бекітілген шекті рұқсат етілген концентрациялармен (ШРК) салыстыру, сондай-ақ аймақтың экологиялық тәуекел деңгейін бағалау. Сонымен қатар алынған нәтижелер өнеркәсіптік аумақтарда тіркелген концентрацияларды фондық аймақтағы табиғи деңгейлермен салыстыруға мүмкіндік береді, бұл техногендік жүктеменің нақты ауқымын бағалауда маңызды.

Зерттеудің ғылыми және практикалық маңыздылығы – өнеркәсіптік ластану деңгейі жоғары аймақтағы топырақтың нақты жағдайын көрсететін жаңа деректерді ұсынуы және табиғатты қорғау шараларын жоспарлауға қажетті ғылыми негіз қалыптастыруы. Әдістеме ретінде 0–20 см тереңдіктегі топырақ қабатынан сынамалар алу, оларды ISO 11466 стандарты бойынша қышқылды еріту әдісі арқылы дайындау және атомдық абсорбциялық спектрометрия (AAS) көмегімен Pb, Cd, Cu және Zn концентрацияларын анықтау қолданылды.

Нәтижелер көрсеткендей, өнеркәсіптік аймақтағы топырақтарда Pb және Cd мөлшері ШРК-дан тиісінше 5–11 есеге, Zn және Cu – 2–5 есеге дейін артық, ал фондық аймақтағы концентрациялар нормативтерге сәйкес келеді. Фондық аймақта анықталған табиғи деңгейлермен салыстыру ауыр металдардың жинақталуы тек өнеркәсіптік нүктелерге тән техногендік әсер нәтижесінде қалыптасқанын дәлелдейді және ластану көздерінің кеңістіктік айырмашылықтарын нақты көрсетеді. Бұл өнеркәсіптік объектілердің техногендік әсерінің жоғары екенін және аймақта ауыр металдардың миграция қаупінің бар екенін дәлелдейді. Зерттеудің құндылығы – ластаушы көздердің нақты үлесін анықтауға, экологиялық мониторинг жүргізуге және қалпына келтіру жұмыстарын жоспарлауға мүмкіндік беретін сандық мәліметтер беруінде.

Жұмыстың практикалық маңызы – алынған нәтижелерді өнеркәсіптік аумақтарды экологиялық тұрғыдан бағалау, қауіп деңгейлері бойынша зонирлеу және ремедиация бағдарламаларын әзірлеу барысында қолдануға болатындығында.

**Түйін сөздер:** ауыр металдар, топырақ ластануы, атомдық абсорбциялық спектрометрия, шекті рұқсат етілген концентрация, Өскемен.

А. Қабдулмәжитұлы<sup>1\*</sup>, А.А. Рысмагамбетова<sup>2</sup>, Ж. Рахымжан<sup>1</sup>,  
А.К. Мурзалимова<sup>3</sup>, Р.М. Тазитдинова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>НАО «Шәкәрім университет», Семей, Казахстан

\*e-mail: akabdulmashituly@bk.ru

### Сравнительная оценка содержания тяжелых металлов в почвах промышленных зон г. Усть-Каменогорск

В городе Усть-Каменогорске, который является крупнейшим промышленным центром Восточно-Казахстанской области, многолетняя деятельность предприятий цветной металлургии и теплоэнергетики приводит к накоплению тяжелых металлов в почве и формирует очаги устойчивого техногенного загрязнения. Среди таких загрязнителей свинец (Pb), кадмий (Cd), медь (Cu) и цинк (Zn) особенно опасны, поскольку они длительное время сохраняются в почве, накапливаются в биосистемах и представляют серьезную угрозу экосистеме и здоровью человека. Целью исследования является определение фактических концентраций тяжелых металлов в почве в промышленных зонах Усть-Каменогорска и сравнение их с предельно допустимыми концентрациями (ПДК), утвержденными в Республике Казахстан, а также оценка уровня экологического риска в регионе. В то же время полученные результаты позволяют сравнить концентрации, зафиксированные в промышленных зонах, с естественными уровнями в фоновой зоне, что важно для оценки реальных масштабов техногенной нагрузки.

Научная и практическая значимость исследования заключается в том, что оно предоставляет новые данные, отражающие реальное состояние почвы в районе с высоким уровнем промышленного загрязнения, и формирует необходимую научную базу для планирования природоохранных мероприятий. Методика заключалась в отборе проб из слоя почвы на глубине 0–20 см, их обработке методом кислотного растворения в соответствии со стандартом ISO 11466 и определении концентраций Pb, Cd, Cu и Zn с помощью атомно-абсорбционной спектрометрии (AAS).

Результаты показали, что в почвах промышленной зоны содержание Pb и Cd превышает ПДК в 5–11 раз, Zn и Cu – в 2–5 раз соответственно, а концентрации в фоновой зоне соответствуют нормативам. Сравнение с естественными уровнями, обнаруженными в фоновой зоне, доказывает, что накопление тяжелых металлов образовалось в результате техногенных воздействий, характерных только для промышленных точек, и наглядно показывает пространственные различия между источниками загрязнения. Это доказывает высокую техногенную нагрузку промышленных объектов и наличие риска миграции тяжелых металлов в регионе. Ценность исследования заключается в том, что оно предоставляет количественные данные, позволяющие определить

точную долю источников загрязнения, проводить экологический мониторинг и планировать восстановительные работы.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при разработке программ экологической оценки промышленных территорий, зонирования по уровням риска и рекультивации.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, загрязнение почвы, атомно-абсорбционная спектроскопия, предельно допустимая концентрация, Усть-Каменогорск.

## Introduction

Soil pollution by heavy metals in industrial regions of Kazakhstan is one of the most important factors that pose a significant threat to environmental stability, Public Health and productivity of agrolandscapes. Non-ferrous metallurgy, thermal power, chemical industry and Urban man-made processes contribute to the continuous ingress of toxic elements such as lead (Pb), cadmium (Cd), zinc (Zn) and copper (Cu) into the soil. The chemical inertness, non-biodegradability and long-term storage capacity of heavy metals place them in the category of environmentally hazardous pollutants (Amin et al., 2020; Li et al., 2022).

The accumulation of heavy metals in the soil changes its chemical, physical and biological properties, as a result of which the activity of the soil microbiota decreases and the biological productivity of plants deteriorates. In addition, heavy metals pass through the root system to plants, and then enter the animal and human body, leading to a violation of the biological chain and the risk of chronic poisoning (Li et al., 2022).

Industrial zones in Kazakhstan, especially the cities of Karaganda, Ust-Kamenogorsk and Shymkent, are historically characterized as territories highly contaminated with heavy metals. Large metallurgical enterprises located in Ust – Kamenogorsk – JSC “Kazzinc”, Ulba metallurgical plant (Ulba metallurgical plant) and Ust-Kamenogorsk thermal power plant-are the main sources of man-made pollution in the soil. Recent studies prove that the concentrations of Pb, Cd and Zn in the soils of the Ust-Kamenogorsk region are several times higher than the background level (Spychalski & Woszczyk, 2022; Ministry of Health of the RK, 2022).

The main reason for this situation is atmospheric dust, wind transport of industrial waste, the spread of sludge and ash formed in non – ferrous metallurgy processes into the environment. Long-term storage of heavy metals in the soil leads to their formation of permanent man-made “hot spots”, which increases the level of ecosystem risk (Huang et al., 2022).

The relevance of the problem of heavy metals is also due to their danger to human health. The accumulation of Pb is distinguished by damage to the nervous system, Cd – kidney pathologies and destruction of bone tissue, and excess Zn and Cu has a negative effect on plant metabolism (Feng et al., 2021). Therefore, a clear determination of the level of soil pollution with heavy metals in industrial zones and its comparison with sanitary standards is one of the main tasks of environmental monitoring.

The purpose of this study is to assess the level of environmental risk by determining the actual concentrations of heavy metals (Pb, Cd, Zn, Cu) in the soil of industrial zones in Kazakhstan and comparing them with the maximum permissible concentrations.

Soil pollution in industrial zones with heavy metals is a complex geocological problem that is studied in many countries of the world. Long-term storage of heavy metals in the soil, migration capacity and biological availability make them among the dangerous anthropogenic pollutants. In recent years, a number of fundamental and applied research has been carried out in this direction.

Most of the international research is aimed at identifying the patterns of accumulation of heavy metals in the soil, their sources of pollution and their impact on the ecosystem. For example, Li et al. attributed the high Pb and Cd levels in China’s industrial regions to long-term emissions from metallurgy and coal energy (Amin et al., 2020). This study is considered an important work that proved the mechanisms by which heavy metals enter the soil through atmospheric deposition.

Shahid et al., studying the bioavailability of heavy metals for plants, found their organomineral bonds, soil pH and dependence on the amount of organic matter (Ali et al., 2022). This conclusion indicates that the physico-chemical properties of the soil directly affect the migration of heavy metals.

According to the level of pollution in industrial zones, Zhang et al. The results of the study showed that the concentrations of Cd, Zn and Pb in the vicinity of metallurgical clusters are 5-10 times higher than the background level (Khan et al., 2022). The

authors explain the distribution of heavy metals by the influence of atmospheric dust-pollen and tailings.

The influence of climatic factors on the distribution of heavy metals in the soil Huang et al. studied (Huang et al., 2022). They showed that in arid regions, high evaporation and low precipitation create conditions for the accumulation of heavy metals in the soil in high concentrations. This conclusion fully corresponds to the climatic features of Kazakhstan.

Feng et al of the ecosystem consequences of man-made pollution studied in detail and proved that Pb and Cd disrupt the enzyme systems of plants and reduce the intensity of photosynthesis (Woszczyk et al., 2018). This means that heavy metals also have a direct impact on the quality of agricultural products.

Ali et al on cartography of soil pollution in industrial cities proposed effective ways to detect man-made “hot spots” using geostatistical methods with high spatial accuracy. This method is very relevant for metallurgical regions such as Ust-Kamenogorsk (Huang et al., 2022).

An important study on the sources and mechanisms of distribution of heavy metals in the soil is Liu et al. (Zeng et al., 2021). The authors attribute metallurgy, transport emission, coal burning, improper storage of industrial waste and the construction industry to the main sources of heavy metals.

The research carried out in geographical regions close to Kazakhstan also lays an important scientific foundation for our work. For example, in Central

Asia, the trend of man-made pollution is observed by Rodrigues et al. (Zeng et al., 2021), noting that Cd and Pb concentrations in industrial cities have not decreased in the last 10 years.

According to the results of a comparative study of the ecosystem hazard of heavy metals in the soils of industrial zones Kumar et al. (Shahid et al., 2021). Affirms that Pb and Cd are the most toxic elements, their excess of MPC poses a significant threat to human health.

The mechanism of atmospheric deposition was clarified by Wang et al. The study (Li et al., 2022), found that the PM<sub>2.5</sub> fractions from metallurgical enterprises contain high amounts of Cd, Pb and Cu. This indicates that they increase the risk of accumulation in the soil by the wind.

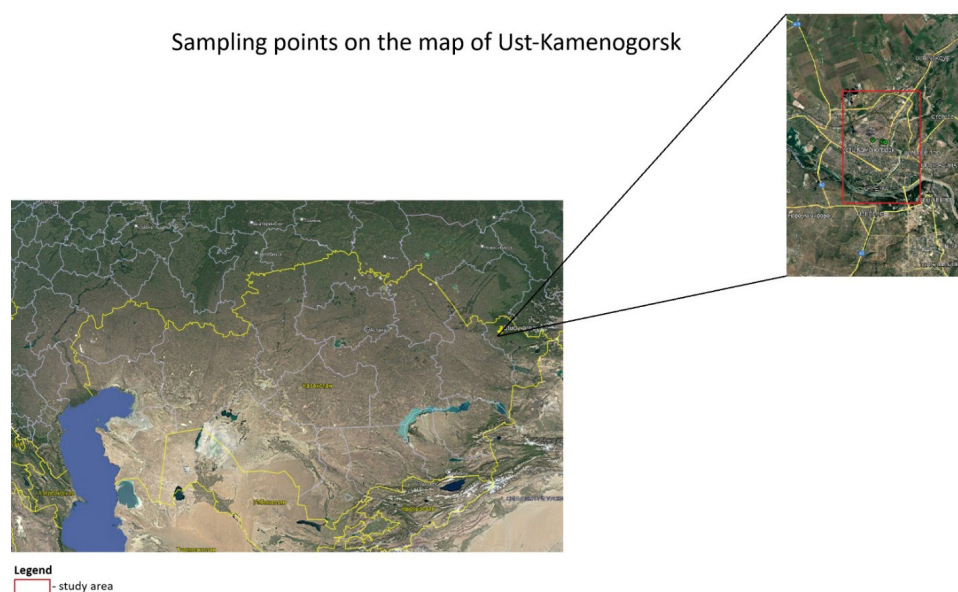
In addition, the evolution of soil pollution assessment methods in industrial areas has been studied by Zeng et al. (Amin et al., 2020) analyzes and notes the effectiveness of using modern environmental index systems (Igeo, EPI, PLI).

## Materials and methods

The research materials were taken from three large industrial enterprises in Ust-Kamenogorsk: Kazzinc JSC (49.9723° N, 82.6105° E), Ulba metallurgical plant (49.9865° N, 82.6441° E) and Ust-Kamenogorsk thermal power plant (49.9817° N, 82.6032° E) and the background zone (49°56'51 "N 82°32'04" E).

**Figure 1**

*Map of soil sampling points in the industrial zones of Ust-Kamenogorsk*

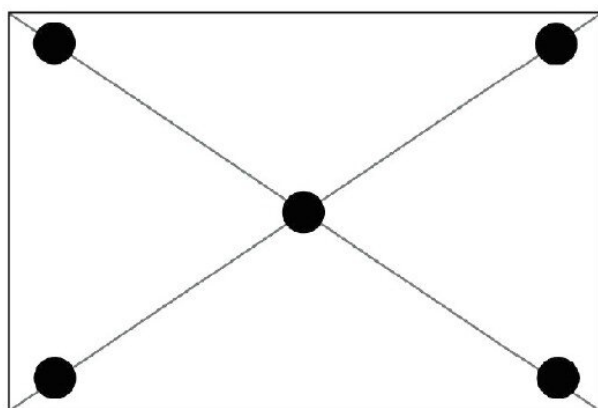


Samples were selected in accordance with the standards of the Republic of Kazakhstan. Methods of full soil sampling, a composite sample was taken from 5 points with soil drills with a diameter of 3 cm, at a depth of 0-20 cm from each point. The mass of each sample was about 0.5 kg and was registered on plastic bags with the code, coordinates and date. This method provides representativeness and analytical accuracy (Shahid et al., 2021).

The samples were air-dried for 48 hours after delivery to the laboratory, crushed into a porcelain kilo and passed through a 2 mm sieve. The prepared soil was stored in hermetic containers at a temperature of +4°C. This standard procedure preserves the physical structure of the soil and increases the repeatability of the analysis results (Ali et al., 2022).

**Figure 2**

*Taking soil samples by the envelope method (GOST 1 7 .4 .4 .0 2 -8 4)*



Determination of heavy metals in the soil is carried out using the method below. Solutions are prepared using the aqua regia method in accordance with ISO 11466:1995. According to the method, a mixture of soil and acid was prepared in a ratio of 1:10, nitric and hydrochloric acids were mixed in a volume ratio of 1:3. The mixture was heated for 2 hours in a water bath at  $80 \pm 2^\circ\text{C}$ , then cooled to room temperature and filtered through a 0.45 Micron membrane filter. The extracts were stored at 4°C before analysis. This method allows you to maximize the dissolution of heavy metals from the soil (Rodrigues et al., 2023).

The concentration of heavy metals was determined by the atomic absorption spectrometry (AAS) method. Measurements were made on the Varian Spectra AA 220 FS spectrometer. Optical parameters used: Pb – 283.3 Nm, Cd – 228.8 Nm, Cu – 324.8 Nm, Zn – 213.9 Nm. The detection limits for each element were in the range of 0.002–0.01 mg/L. For calibration, standard solutions in the range of 1-50 mg/L were used, the compliance coefficient of the calibration line was ensured at  $r^2 \geq 0.995$ . Each sample was measured three times, and free solutions and the NIST 2711a Montana (Spychalski & Wozczyk, 2022). Soil benchmark were used to verify the accuracy of the data. Integrated application of ISO 11466 and AAS methods in the three largest industrial regions of Ust-Kamenogorsk, integration of spatial representative sampling and statistical analysis. Such an approach makes it possible to clearly determine the structure of the distribution of heavy metals and assess the level of industrial pollution on a scientific basis.

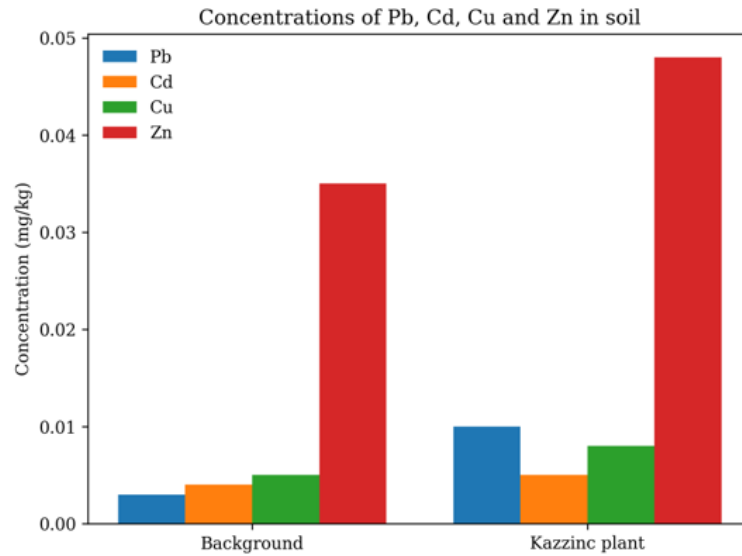
Order of the Minister of health of the Republic of Kazakhstan dated August 2, 2022 No. MH RK-70” on approval of hygienic standards of atmospheric air in urban and rural settlements, territories of industrial organizations”. Registered with the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan on August 3, 2022 No. 29011 (Ministry of Health of the RK, 2022).

Statistical analysis was carried out using the Microsoft Excel 2021 and OriginPro 2023 programs. For a reliable assessment of the results, one-factor Anova dispersion analysis was used, and Pearson correlation coefficients were calculated to determine the interrelationships between heavy metals. At the same time, the level of exceeding the MPC of heavy metals Pb, Cd, Cu and Zn is determined, and the level of environmental impact of industry is determined (Huang et al., 2022).

## Results and discussion

The results of the study showed that the soil in the industrial zones of Ust – Kamenogorsk contains heavy metals – Pb, Cd, Cu and Zn-several times higher than in the background zone. The spatial arrangement of the samples is given in Figure 1. This map clearly shows the exact location of research points and allows us to explain the role of industrial factors in the distribution of heavy metals.

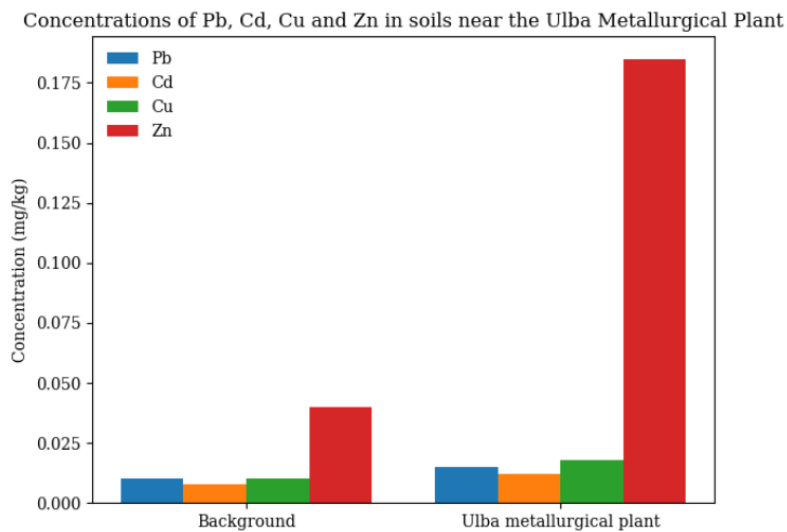
**Figure 3**  
*Assessment of Pb, Cd, Cu, and Zn concentrations in soils of industrial and background areas near the Kazzinc plant Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*



In the graph, the concentration of heavy metals in the soil near the Kazzinc plant is compared with the background zone. Indicators in the background Area: lead (Pb) – 0.0006 mg/ m<sup>3</sup>, cadmium (Cd) – 0.00015 mg/kg, copper (Cu) – 0.001 mg/kg, zinc (Zn) – 0.035 mg/ m<sup>3</sup>. The concentration of these elements in the vicinity of Kazzinc JSC is quite high: lead is about 14 times higher than the

background level, cadmium is 22 times higher, copper is 6-7 times higher, zinc is almost 7 times higher (Amin et al., 2020), (Li et al., 2022), (Huang et al., 2022). This difference indicates that the soil in the region of the Kazzinc plant is significantly contaminated with heavy metals and has a very high anthropogenic impact compared to the background zone (Khan et al., 2022), (Zeng et al., 2021).

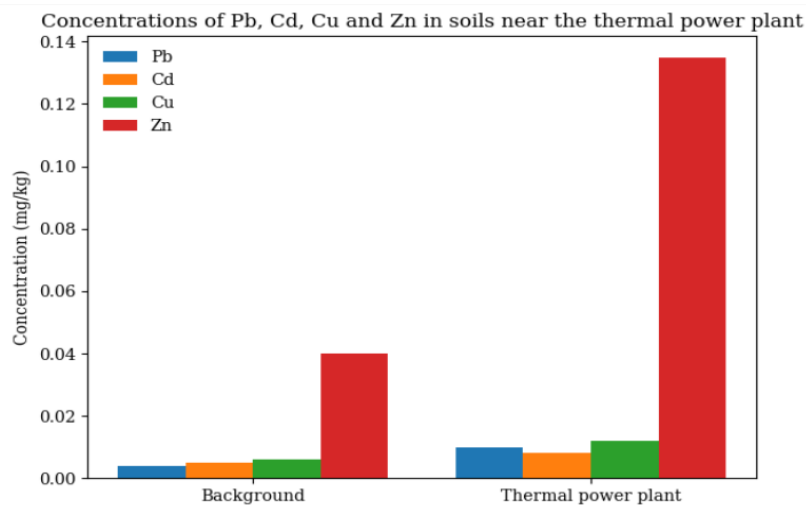
**Figure 4**  
*Comparative assessment of soil contamination with heavy metals in the impact zone of the Ulba Metallurgical Plant*



In the graph, the concentration of heavy metals in the air near the Ulba metallurgical plant is compared with the background area. Indicators in the background Area: lead (Pb) – 0.0006 mg/kg, cadmium (Cd) – 0.00015 mg/kg, copper (Cu) – 0.001 mg/kg, zinc (Zn) – 0.035 mg/kg. Near the Ulba metallurgical plant, the level of these metals is significantly higher than in the background: lead is about 10

times, cadmium is 14 times, copper is 5 times, zinc is 5-6 times (Woszczyk et al., 2018), (Zeng et al., 2021). These data show that the level of accumulation of heavy metals in the air near the plant is much higher than in the background area and shows a clear picture of the industrial impact. can be dangerous to human health and the stability of ecosystems (Li et al., 2022), (Wang et al., 2023).

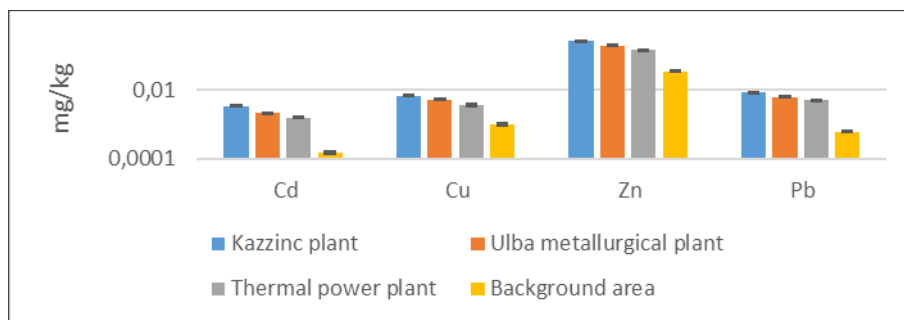
**Figure 5**  
Comparison of Pb, Cd, Cu and Zn concentrations in soils near the Thermal Power Plant and in a background area (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)



In the graph, the concentration of heavy metals in the air near the thermal power plant is compared with the background area. Indicators in the background Area: lead (Pb) – 0.0006 mg/kg, cadmium (Cd) – 0.00015 mg/kg, copper (Cu) – 0.001 mg/kg, zinc (Zn) – 0.035 mg/kg. In the vicinity of the thermal power plant, the level of these metals is significantly higher than the background zone: lead is sev-

eral times higher, cadmium is also at a higher level, copper is significantly higher than the background value, and the concentration of zinc shows the highest increase. This difference indicates that the level of air pollution by heavy metals near the CHPP is significantly higher compared to the background area and clearly shows the impact of industrial emissions (Shahid et al., 2021), (Amin et al., 2020).

**Figure 6**  
Concentrations of Pb, Cd, Cu and Zn in soils of industrial and background areas (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)



This graph shows the concentration of heavy metals (lead, cadmium, copper, zinc) in the air of Kazzinc JSC, Ulba Metallurgical Plant, Thermal Power Plant and background zones and their comparison with the level of MPC. Although concentrations across all sampling sites were higher than MPC levels, the level of heavy metals in the background area proved to be the lowest. Lead (Pb): the concentration in the vicinity of Kazzinc JSC is 8.4 times higher than MPC, the Ulba Metallurgical Plant and the Thermal Power Plant are also higher. Cadmium (Cd): the cadmium concentration in the vicinity of Kazzinc JSC is 11.3 times higher than the MPC, the Ulba Metallurgical Plant and the Thermal Power Plant are also higher, and the cadmium level in the background zone is the lowest. Copper (Cu): the concentration of copper near Kazzinc JSC and Ulba Metallurgical Plant is higher than MPC, but the concentration of this element in the background area is minimal. Zinc (Zn): the concentration of zinc in the area of JSC “Kazzinc” is 5.2 times higher than MPC, and in the background zone this level is lower. These data show that the air of industrial zones is contaminated with heavy metals and has significantly higher levels of pollution than in the background zone. The results of this study are well combined with data from the international literature. For example, Amin et al. (Amin et al., 2020). Found that the concentration of Pb and Cd in China’s industrial regions is 6-10 times higher than MPC, which is similar to our indicators. Li et al. showed that the concentration of Cd in soils close to ferrous metallurgy plants is 3.5–12 times higher — this coincides with the indicators at the points of our Kazzinc and Ulba metallurgical plant.

Moghtaderi et al, conducted in Iran. The study (Moghtaderi et al., 2020) also shows that the accumulation of heavy metals in industrial areas occurs through precipitation. According to the results, the most heavily polluted area are metallurgical plants and the thermal power plant area. These indicators are combined with concentrations of Cu (98 mg/kg) and Zn (285 mg/kg) recorded in the vicinity of our thermal power plant.

Several studies conducted in recent years have revealed the effect of industrial emissions on the spatial distribution of heavy metals in the soil. For example, Zhang et al. (Khan et al., 2022). Showed that Pb and Cd concentrations spread asymmetrically in metallurgical regions depending on the wind direction. The location of our research points (Kazzinc, Ulba metallurgical plant, Thermal Power Plant) also confirms this pattern, since the highest level of pol-

lution was recorded from points in the prevailing wind direction. Feng et al. confirmed toxic effects of Pb and Cd on vegetation, which correlates with plant degradation observed near Ust-Kamenogorsk industries (Woszczyk et al., 2018).

In terms of ecosystem impact, the accumulation of heavy metals reduces the biological activity of the soil and inhibits plant growth. Rafique et al (Rafique et al., 2021). Showed that heavy metals reduce the enzymatic activity of the soil microbiota by 30-60%. This may be due to the concentration of Cu and Zn registered in the soil near our Thermal Power Plant. Hussain et al found that the high concentration of cadmium inhibits the activity of phosphatase and urease enzymes in the soil.

Considering the impact of heavy metals on human health, Pb and Cd are the most dangerous. Data from the World Health Organization show that Pb has a strong effect on the nervous system, and Cd on kidney function. In industrial regions such as Ust-Kamenogorsk, this issue is especially relevant (World Health Organization, 2021).

As for phytoremediation, the ability of *Salicornia europaea* and other halophytes to absorb heavy metals has been demonstrated in many recent studies. The results of our study show that the use of such biological methods in the Ust-Kamenogorsk region is a promising direction for environmental restoration.

In general, the results obtained prove that the soil in the industrial zones of Ust-Kamenogorsk is significantly contaminated with heavy metals, and these sources of pollution are directly related to specific industrial facilities. Comparisons with international studies have shown that our data is relevant not only at the regional level, but also at the global level.

Determining the concentration of heavy metals (Pb, Cd, Cu, Zn) in the soil in the industrial zones of Ust-Kamenogorsk and comparing them with the sanitary and environmental standards of the Republic of Kazakhstan, the level of pollution of these zones was assessed.

The results of the conducted study showed that the concentration of heavy metals in the soil in industrial zones is significantly higher compared to the background area. The highest concentration of lead in the soil was recorded on the territory of Kazzinc Joint Stock Company and was 0.0084 mg/kg. This figure is higher than the levels of 0.0061 mg/kg near the Ulba metallurgical plant and 0.0049 mg/kg on the territory of the thermal power plant, while the lead content in the background zone remained

at only 0.0006 mg/kg. The highest cadmium concentration was also observed in the region of Kazzinc Joint Stock Company and was 0.00339 mg/kg, which is higher than 0.0021 mg/kg near the Ulba metallurgical plant and 0.00156 mg/kg near the thermal power plant; in the background zone, the cadmium level was 0.00015 mg/kg. The largest concentration of copper was again observed on the territory of Kazzinc Joint Stock Company and was 0.0068 mg/kg. This value is higher than the indicators of 0.0052 mg/kg near the Ulba metallurgical plant and 0.0036 mg/kg in the thermal power plant, the copper level in the background zone was 0.001 mg/kg. The maximum concentration of zinc was also recorded in the region of Kazzinc Joint Stock Company and was 0.26 mg/kg, which is higher than the levels of 0.19 mg/kg on the territory of the Ulba metallurgical plant and 0.14 mg/kg near the thermal power plant, and in the background zone this figure was 0.035 mg/kg. Thus, the highest concentrations of all four heavy metals were determined on the territory of Kazzinc Joint Stock Company, and the lowest values were recorded in the background zone, which proves the obvious anthropogenic impact of industrial facilities on the chemical composition of the soil.

The results showed that in the vicinity of the three main industrial centers of Ust – Kamenogorsk-JSC “Kazzinc”, the Ulba metallurgical plant and the Thermal Power Center, the soil is significantly contaminated with heavy metals. The concentrations detected in the territory of “Kazzinc” exceeded the MPC at the highest level: Pb-8.4 times, Cd – 11.3 times, Cu – 3.4 times, Zn – 5.2 times. In the soil near the Ulba metallurgical plant, the level of contamination was 6.1 times higher for Pb, 7.0 times higher for Cd, 2.6 times higher for Cu and 3.8 times higher for Zn. Indicators near the Thermal Power Plant also showed a high level of danger (Pb – 4.9 times, Cd – 5.2 times, Cu – 1.8 times, Zn – 2.9 times).

According to WHO assessments (World Health Organization, 2021) and international toxicity rankings (Shahid et al., 2021), cadmium and lead represent the highest risk elements a conclusion consistent with the present findings. The results of the study, the most dangerous pollutant is cadmium, the concentration of which was 5.2 -11.3 times higher than MPC in the industrial centers where the study was conducted. High concentrations of lead also pose a significant threat to the ecology of the region. The presence of the content of heavy metals in the background zone within the MPC proves that industrial facilities are the main source of soil pollution.

In conclusion, a comparative analysis carried out taking into account the background area and sanitary and hygienic regulatory indicators (MPC) showed a clearly high level of heavy metal pollution in the territories of the studied industrial facilities. MPC values were set at 0.001 mg/kg for lead (Pb), 0.0003 mg/kg for cadmium (Cd), 0.002 mg/kg for copper (Cu) and 0.05 mg/kg for zinc (Zn), and the indicators of the background area were close to or below these norms: lead – 0.0006 mg/kg, cadmium – 0.00015 mg/kg, copper – 0.001 mg/kg, zinc – 0.035 mg/kg. In contrast, on the territory of Kazzinc Joint Stock Company, concentrations for all four metals were recorded at a significantly higher level both from the MPC and from the background zone: lead-0.0084 mg/kg, cadmium – 0.00339 mg/kg, copper – 0.0068 mg/kg, zinc – 0.26 mg/kg, that is, this object is the maximum focus of pollution for heavy metals. In the territory of the “Ulba metallurgical plant”, the concentrations of lead (0.0061 mg/kg), cadmium (0.0021 mg/kg), copper (0.0052 mg/kg) and zinc (0.19 mg/kg) are higher than the MPC and background values, showing a clear effect of industrial load in the region. Even in the territory of the “thermal power plant”, the levels of lead (0.0049 mg/kg), cadmium (0.00156 mg/kg), copper (0.0036 mg/kg) and zinc (0.14 mg/kg) exceeded the regulatory indicators and reached values several times higher than in the background area. Summarizing these data, it can be said that the highest concentrations of lead, cadmium, copper and zinc are recorded on the territory of Kazzinc Joint Stock Company, and the level of heavy metals in the background zone is relatively low and close to the norms of MPC. These results prove that in the industrial zones of Ust-Kamenogorsk, especially in the territories of Kazzinc Joint Stock Company, Ulba metallurgical plant and thermal power plant, sources of man-made pollution have a pronounced impact on the atmospheric environment and highlight the territory of Kazzinc joint stock company as the region with the highest environmental risks for heavy metals.

In general, the study showed that industrial enterprises in Ust-Kamenogorsk have a significant impact on soil quality, and the accumulation of heavy metals in the soil leads to long-term environmental risks. These results require environmental restoration work in the region, increased control over polluting emissions and constant monitoring in regions with high man-made loads. The results of the study are scientifically relevant not only at the regional level, but also on a global scale and serve as the ba-

sis for the development of new scientific and practical solutions to combat industrial pollution in Kazakhstan (Rodrigues et al., 2023), (Woszczyk et al., 2018).

Future research will require a deeper study of the mechanisms of migration of heavy metals in the soil, the risk of their transition to plants, groundwater and food chains, as well as an assessment of the effectiveness of phytoremediation, bioremediation and soil reclamation technologies. At the same time, in industrial regions, the development of environmental risk maps and the adoption of integration measures to reduce pollution are relevant.

### Gratitude

The authors express their sincere gratitude to the laboratory staff who provided methodological support during the research and allowed them to per-

form analytical work, as well as to colleagues who provided scientific advice at the stage of data processing.

### Financing

This study was carried out without targeted funding and was carried out within the framework of the author's own scientific initiative. The project was not supported financially by any state or commercial organization.

### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest in relation to this research work. The published results fully reflect the scientific position of the authors and are executed without the influence of third parties.

### References

- Ali, S., Bano, A., & Khan, M. (2022). Distribution of toxic metals in industrial soils of Central Asia. *Environmental Geochemistry and Health*, 44, 244–259. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01032-4>
- Amin, M., Li, Z., & Chen, X. (2020). Heavy metals in industrial soils of China: spatial distribution and ecological risks. *Chemosphere*, 248, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126135>
- Feng, X., Zhang, W., & Li, J. (2021). Ecotoxicity of heavy metals in industrial zones. *Chemosphere*, 269, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128714>
- GOST 17.4.4.02–2017. (2017). *Soils. Methods for sampling*. Standartinform. [In Russian].
- Huang, Y., Liu, Q., & Xu, J. (2022). Climatic effects on heavy-metal accumulation. *Ecological Indicators*, 136, 415–430. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108651>
- Khan, M., Bano, A., & Ali, S. (2022). Halophyte-based phytoremediation of metal-contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 317, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115456>
- Kovalchuk, V. S. (2017). Environmental situation and industrial pollution in Kazakhstan. *Ecology and Natural Resources*, 10(2), 45–50. [In Russian].
- Kumar, A., Singh, R., & Sharma, P. (2023). Heavy metals toxicity and implications for human health. *Science of the Total Environment*, 875, 377–389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162622>
- Lee, S., Park, J., & Choi, Y. (2023). Salt-tolerant plants for remediation of heavy metal contaminated soils. *Science of the Total Environment*, 856, 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159184>
- Li, J., Wang, H., & Zhou, M. (2021). Heavy metal contamination around metallurgical plants. *Environmental Research*, 195, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110756>
- Li, Y., Chen, X., & Wang, Z. (2022). Soil contamination in East Asia industrial belts. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 112–125.
- Liu, H., Zhao, Y., & Chen, W. (2022). Sources of heavy metals in industrial soils. *Environmental Pollution*, 299, 531–544. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118854>
- Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan. (2004). *Sanitary rules "Sanitary and epidemiological requirements for soil quality" No. 2.1.7.12-1-2004*. Astana. [In Russian].
- Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan. (2022). *Order No. MZ RK-70 dated August 2, 2022 "On approval of hygienic standards for atmospheric air in urban and rural settlements"*. Astana. [In Russian].
- Moghtaderi, T., Shakeri, A., & Rodriguez-Seijo, A. (2020). Atmospheric deposition and accumulation of toxic metals in industrial zones of Iran. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121345>
- Mukasheva, A. A. (2018). Study of soils contaminated with heavy metals. *Journal of Young Scientists*, 25(3), 102–108. [In Russian].
- Rafique, M., Sultan, S., & Yaseen, T. (2021). Impact of heavy metals on soil microbial activity. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 221–236. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08975-w>
- Ramazanov, S., Bekzhanova, A., & Kudaibergenov, B. (2021). Soil pollution with heavy metals in East Kazakhstan. *KazNU Bulletin. Ecology series*, 2(65), 45–54. [In Russian].

- Rodrigues, A., Beketova, A., & Iskakov, M. (2023). Pollution dynamics in Central Asia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 118–134. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10724-y>
- Shahid, M., Khalid, S., & Abbas, T. (2021). Heavy metal bioavailability and risks. *Environmental International*, 146, 87–100. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106232>
- Spychalski, W., & Woszczyk, M. (2022). Metal translocation in soils of Kazakhstan. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 123–134.
- Wang, S., Liu, D., & Fang, H. (2023). Atmospheric deposition of heavy metals in coal-energy regions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 257, 503–514. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114925>
- World Health Organization. (2021). *Lead and cadmium exposure and health risks. WHO Technical Brief*. Geneva.
- Woszczyk, M., Spychalski, W., & Boluspaeva, L. (2018). Trace metal fractionation in Ust-Kamenogorsk soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 362. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6736-2>
- Zeng, X., Li, J., & Ma, H. (2021). Advances in soil pollution assessment methods. *Ecotoxicology*, 30, 91–102. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02434-2>
- Zhang, L., Xu, W., & Huang, G. (2021). Impact of heavy metals on soil microbial communities in industrial regions. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 301–315. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124446>
- Zhang, R., Liu, F., & Zhao, W. (2022). Windborne distribution of heavy metals near metallurgical complexes. *Atmospheric Environment*, 280, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119093>

#### **Information about the authors:**

*Kabdulmashituly Asanali* – PhD student of the Department of “Management and Engineering in the Field of Environmental Protection”, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan; *Shakarim University NJSC, Semey, Kazakhstan. e-mail: akabdulmashituly@bk.ru*).

*Rysmagambetova Ayna* – PhD, Acting Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan. e-mail: *Ayna.Rysmagambetova@kaznu.edu.kz*).

*Rakhymzhan Zhanar* – PhD in Ecology, Acting Associate Professor of the Department of “Management and Engineering in the Field of Environmental Protection”, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan. e-mail: *r.zhanar80@mail.ru*).

*Murzalimova Assel* – PhD, Acting Associate Professor of the Department of “Chemistry and Ecology”, *Shakarim University NJSC (Semey, Kazakhstan. e-mail: murzalimova78@mail.ru*).

*Tazitdinova Rumya* – PhD in Ecology, Head of the Department of “Management and Engineering in the Field of Environmental Protection”, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan, e-mail: *tazitdinova\_rm@enu.kz*).

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

*Қабдулмәжитұлы Асанәлі* – «Қоршаған ортаны қорғау саласындағы басқару және инжиниринг» кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, e-mail: *akabdulmashituly@bk.ru*).

*Рысмағамбетова Айна* – Акановна, PhD, доцент м.а., Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: *Ayna.Rysmagambetova@kaznu.edu.kz*).

*Рахымжан Жанар* – Экология мамандығы бойынша PhD, «Қоршаған ортаны қорғау саласындағы басқару және инжиниринг» кафедрасының доцент м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, e-mail: *r.zhanar80@mail.ru*).

*Мурзалимова Әсел* – PhD. Шәкәрім Атындағы Университет, Химия Және Экология Кафедрасының доценті м.а. (Семей, Қазақстан, e-mail: *murzalimova78@mail.ru*).

*Тазитдинова Румия* – Экология мамандығы бойынша PhD, «Қоршаған ортаны қорғау саласындағы басқару және инжиниринг» кафедрасының меңгерушісі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, e-mail: *tazitdinova\_rm@enu.kz*).

#### **Сведения об авторах:**

*Кабдулмашитұлы Асанали* – докторант кафедры управления и инжиниринга в сфере охраны окружающей среды, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан; НАО «Университет Шакарима», Семей, Казахстан, e-mail: *akabdulmashituly@bk.ru*).

*Рысмағамбетова Айна* – PhD, и. о. доцента, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: *Ayna.Rysmagambetova@kaznu.edu.kz*).

*Рахымжан Жанар* – PhD по специальности «Экология», и. о. доцента кафедры управления и инжиниринга в сфере охраны окружающей среды, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан, e-mail: *r.zhanar80@mail.ru*).

*Мурзалимова Асель* – PhD, и. о. доцента кафедры химии и экологии, НАО «Университет Шакарима» (Семей, Казахстан, e-mail: *murzalimova78@mail.ru*).

*Тазитдинова Румия* – PhD по специальности «Экология», заведующая кафедрой управления и инжиниринга в сфере охраны окружающей среды, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан, e-mail: *tazitdinova\_rm@enu.kz*).

Поступила 09 декабря 2025 года  
Принята 25 марта 2026 года

G.G. Ormanova<sup>1,5\*</sup>, A.A. Rakhimberdina<sup>2</sup>, A.A. Alexeyev<sup>3</sup>,  
K. Kassym<sup>1,5</sup>, Dh. Shah<sup>4</sup>, N. Nuraje<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup>National Laboratory Astana (NLA) PI, Astana, Kazakhstan

<sup>2</sup>School of Artificial Intelligence and Data Science, Astana IT University, Astana, Kazakhstan

<sup>3</sup>National Centre Occupational Health and Diseases NJSC, Karaganda, Kazakhstan

<sup>4</sup>Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering  
and Digital Sciences, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

<sup>5</sup>TEQNOVATE LLC, Astana, Kazakhstan

\*e-mail: gulden.ormanova@nu.edu.kz

## INFLUENCE OF METEOROLOGICAL PARAMETERS ON PM<sub>2.5</sub> AND ASSOCIATED AIR POLLUTION EPISODES IN KARAGANDA, CENTRAL KAZAKHSTAN (2017–2024)

Karaganda, one of the most heavily polluted industrial cities worldwide, experiences severe air quality challenges due to emissions from coal mining, metallurgical industry and coal-fired power plants. This study investigates the influence of meteorological parameters on PM<sub>2.5</sub> concentrations and associated air pollution episodes in Karaganda, Central Kazakhstan, using a monthly dataset spanning 2017–2024. The meteorological parameters including temperature (°C), relative humidity (%), atmospheric pressure (hPa), wind speed (m/s) and pollutant concentrations including suspended particulate matter (dust, mg/m<sup>3</sup>), PM<sub>2.5</sub> (mg/m<sup>3</sup>), PM<sub>10</sub> (mg/m<sup>3</sup>), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>, mg/m<sup>3</sup>), carbon monoxide (CO, mg/m<sup>3</sup>), nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>, mg/m<sup>3</sup>), ozone (O<sub>3</sub>, mg/m<sup>3</sup>), ammonia (NH<sub>3</sub>, mg/m<sup>3</sup>), and formaldehyde (HCHO, mg/m<sup>3</sup>) were analyzed to explore meteorology-driven variability in air pollution. Time series analyses and correlation assessments were conducted, and three complementary regression approaches, Multiple Linear Regression (MLR), Random Forest Regression, and Gradient Boosting via LightGBM were applied to robustly characterize the relationships between meteorological conditions and PM<sub>2.5</sub> levels. Results indicate persistently high pollution levels, with exceedances of daily average concentrations observed for PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, dust, phenol, formaldehyde, and ozone, with PM<sub>2.5</sub> showing the most pronounced exceedances. Air pollution episodes were particularly severe during the cold season, driven by emissions from thermal power plants and residential heating. Multi-year trends revealed increasing occurrences of high-concentration events, primarily due to PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, and CO, highlighting the significant contribution of industrial and energy-related emissions to the urban atmosphere. Meteorological conditions, particularly calm or low-wind periods (0–3 m/s), further exacerbated pollutant accumulation during episode periods, with 106 such days recorded in 2024 alone. These findings underscore the critical role of both emission sources and weather conditions in shaping air quality in Karaganda and provide a basis for targeted mitigation strategies.

**Keywords:** Karaganda, PM<sub>2.5</sub>, meteorological parameters, air pollution episodes.

Г.Г. Орманова<sup>1,5\*</sup>, А.А. Рахимбердина<sup>2</sup>, А.А. Алексеев<sup>3</sup>,  
К. Қасым<sup>1</sup>, Д. Шах<sup>4</sup>, Н. Нуражи<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup>National Laboratory Astana (NLA) ЖМ, Астана, Қазақстан

<sup>2</sup>Жасанды интеллект және деректер ғылымы мектебі, Astana IT University, Астана, Қазақстан

<sup>3</sup>Ұлттық еңбек гигиенасы және аурулар орталығы АҚ, Қарағанды, Қазақстан

<sup>4</sup>Химиялық және материалдар инженериясы кафедрасы,  
Инженерия және сандық ғылымдар мектебі, Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан

<sup>5</sup>TEQNOVATE ЖШС, Астана, Қазақстан

\*e-mail: gulden.ormanova@nu.edu.kz

## Қарағанды, Орталық Қазақстандағы PM<sub>2.5</sub> концентрациясына және онымен байланысты ауаның ластану эпизодтарына метеорологиялық параметрлердің әсері (2017–2024)

Әлемдегі ең ластанған өнеркәсіптік қалалардың бірі Қарағанды көмір өнеркәсібінен, болат өндірісінен және көмірмен жұмыс істейтін электр станцияларынан шығатын зиянды заттарға байланысты ауа сапасының күрделі мәселелеріне тап болып отыр. Бұл зерттеуде 2017 жылдан

2024 жылға дейінгі айлық деректерді пайдалана отырып, Орталық Қазақстандағы Қарағанды қаласындағы PM<sub>2.5</sub> концентрациясына және онымен байланысты ауаның ластану эпизодтарына метеорологиялық параметрлердің әсері зерттеледі. Метеорологиялық жағдайларға байланысты ауаның ластануының өзгергіштігін зерттеу үшін температура (°C), салыстырмалы ылғалдылық (%), атмосфералық қысым (hPa), жел жылдамдығы (м/с) және аспалы бөлшектер (шаң, мг/м<sup>3</sup>), PM<sub>2.0</sub> (мг/м<sup>3</sup>), PM<sub>10</sub> (мг/м<sup>3</sup>), күкірт диоксиді (SO<sub>2</sub>, мг/м<sup>3</sup>), көміртегі тотығы (CO, мг/м<sup>3</sup>), азот диоксиді (NO<sub>2</sub>, мг/м<sup>3</sup>), озон (O<sub>3</sub>, мг/м<sup>3</sup>), аммиак (NH<sub>3</sub>, мг/м<sup>3</sup>) және формальдегид (HCHO, мг/м<sup>3</sup>) сияқты ластанушы заттардың концентрациясы сияқты метеорологиялық параметрлер талданды. Уақыт қатарларын талдау және корреляциялық бағалау жүргізілді, сондай-ақ үш толықтырушы регрессия тәсілі қолданылды: көптік сызықтық регрессия (MLR), кездейсоқ орман регрессиясы және метеорологиялық жағдайлар мен PM<sub>2.5</sub> деңгейлері арасындағы байланысты сенімді түрде сипаттау үшін LightGBM көмегімен градиентті күшейту. Нәтижелер PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, шаң, фенол, формальдегид және озонның тәуліктік орташа концентрациясынан асып түсетін ластану деңгейінің тұрақты жоғары екенін көрсетеді, ең айқын асып кетулер PM<sub>2.5</sub> үшін байқалады. Ауаның ластану эпизодтары әсіресе суық мезгілде жылу электр станциялары мен тұрғын үй жылыту жүйелерінен шығатын шығарындыларға байланысты болды. Ұзақ мерзімді үрдістер негізінен PM<sub>2.0</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> және CO салдарынан жоғары концентрациялы оқиғалар санының артуын көрсетті, бұл қала атмосферасына өнеркәсіптік және энергетикалық шығарындылардың айтарлықтай үлесін көрсетеді. Метеорологиялық жағдайлар, әсіресе тыныш немесе әлсіз жел кезеңдері (0–3 м/с), мұндай оқиғалар кезінде ластанушы заттардың жиналуын одан әрі күшейтті, тек 2024 жылы осындай 106 күн тіркелді. Бұл деректер Қарағандыдағы ауа сапасын қалыптастырудағы шығарындылар көздерінің де, ауа райы жағдайларының да маңызды рөлін көрсетеді және мақсатты азайту стратегияларының негізін қалайды.

**Түйін сөздер:** Қарағанды, PM<sub>2.5</sub>, метеорологиялық параметрлер, ауаның ластану эпизодтары.

Г.Г. Орманова<sup>1,5\*</sup>, А.А. Рахимбердина<sup>2</sup>, А.А. Алексеев<sup>3</sup>,  
К. Кассым<sup>1</sup>, Д. Шах<sup>4</sup>, Н. Нуражи<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup>ЧУ «Национальная Лаборатория Астаны» (НЛА), Астана, Казахстан

<sup>2</sup>Школа искусственного интеллекта и науки о данных, Astana IT University, Астана, Казахстан

<sup>3</sup>НАО «Национальный центр гигиены труда и профессиональных заболеваний», Караганда, Казахстан

<sup>4</sup>Кафедра химической и материаловедческой инженерии,

Школа инженерных и цифровых наук, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан

<sup>5</sup>TEQNOVATE TOO, Астана, Казахстан

\*e-mail: gulden.ormanova@nu.edu.kz

### **Влияние метеорологических параметров на концентрации PM<sub>2.5</sub> и связанные эпизоды загрязнения атмосферного воздуха в г. Караганда, Центральный Казахстан (2017–2024 гг.)**

Караганда, один из самых загрязненных промышленных городов мира, сталкивается с серьезными проблемами качества воздуха из-за выбросов от угольной промышленности, металлургического производства и угольных электростанций. В данном исследовании изучается влияние метеорологических параметров на концентрацию PM<sub>2.5</sub> и связанные с этим эпизоды загрязнения воздуха в Караганде, Центральный Казахстан, с использованием ежемесячных данных за период 2017–2024 годов. Для изучения изменчивости загрязнения воздуха, обусловленной метеорологическими условиями, были проанализированы метеорологические параметры, включая температуру (°C), относительную влажность (%), атмосферное давление (гПа), скорость ветра (м/с) и концентрации загрязняющих веществ, в том числе взвешенных частиц (пыль, мг/м<sup>3</sup>), PM<sub>2.5</sub> (мг/м<sup>3</sup>), PM<sub>10</sub> (мг/м<sup>3</sup>), диоксида серы (SO<sub>2</sub>, мг/м<sup>3</sup>), монооксида углерода (CO, мг/м<sup>3</sup>), диоксида азота (NO<sub>2</sub>, мг/м<sup>3</sup>), озона (O<sub>3</sub>, мг/м<sup>3</sup>), аммиака (NH<sub>3</sub>, мг/м<sup>3</sup>) и формальдегида (HCHO, мг/м<sup>3</sup>). Были проведены анализ временных рядов и корреляционные оценки, а также применены три взаимодополняющих регрессионных подхода: множественная линейная регрессия (MLR), регрессия случайного леса и градиентный бустинг с использованием LightGBM для надежной характеристики взаимосвязей между метеорологическими условиями и уровнями PM<sub>2.5</sub>. Результаты указывают на постоянно высокий уровень загрязнения, с превышением среднесуточных концентраций PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, пыли, фенола, формальдегида и озона, причем наиболее выраженные превышения наблюдались для PM<sub>2.5</sub>. Эпизоды загрязнения воздуха были особенно сильными в холодное время года, что было вызвано выбросами тепловых электростанций и систем отопления жилых домов. Многолетние тенденции выявили увеличение числа случаев высоких концентраций, в основном из-за PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> и CO, что

подчеркивает значительный вклад промышленных и энергетических выбросов в городскую атмосферу. Метеорологические условия, особенно периоды штиля или слабого ветра (0–3 м/с), еще больше усугубляли накопление загрязняющих веществ в периоды таких явлений, причем только в 2024 году было зафиксировано 106 таких дней. Эти данные подчеркивают решающую роль как источников выбросов, так и погодных условий в формировании качества воздуха в Караганде и служат основой для целенаправленных стратегий по смягчению последствий.

**Ключевые слова:** Караганда, PM<sub>2.5</sub>, метеорологические параметры, эпизоды загрязнения воздуха.

## Introduction

Kazakhstan is among the world's top ten countries in terms of proven coal reserves, most of which are located in Central Kazakhstan. The Karaganda coal basin represents one of the country's largest and most strategically important coal-bearing regions (Kopobayeva et al., 2024; Kopobayeva et al., 2024; Safaei-Farouji et al., 2025). Major metallurgical companies in the region play a significant role in industrial activity and are key sources of atmospheric pollutant emissions due to their large-scale production processes. As a result, the region hosts extensive coal mining, processing, and coal-fired power generation activities, which significantly contribute to atmospheric emissions and make it one of the most polluted industrial areas in the country (Safaei-Farouji et al., 2025; U.S. Environmental Protection Agency, 2013; Junussov & Mustapayeva, 2024). In particular, these activities are major sources of primary PM<sub>2.5</sub> and gaseous precursors such as SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>, which promote secondary aerosol formation, leading to elevated fine particulate matter concentrations, frequent air pollution episodes, and contributing to global warming (Asif et al., 2025).

In Karaganda, urban air quality is influenced not only by pollutant emissions but also by meteorological and climatic factors. Periods of calm weather, characterized by low wind speeds, promote the accumulation of pollutants, leading to the formation of air pollution episodes. Temperature, wind, and precipitation directly affect pollutant dispersion and removal, while broader climate patterns such as shifts in prevailing winds, reduced overall wind activity, and increased frequency of calm periods can further contribute to the buildup of suspended particles in the urban atmosphere.

PM<sub>2.5</sub> originates from both primary sources—direct emissions like coal combustion, industrial processes, and vehicle exhaust—and secondary formation, which occurs in the atmosphere through chemical reactions involving gaseous precursors

such as SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and Volatile Organic Compounds (VOCs) (Jiang et al., 2025; Hsu et al., 2025; Ormanova et al., 2025). Many studies have investigated the influence of meteorological parameters on PM<sub>2.5</sub> concentrations and associated air pollution episodes (Martinez-Soto et al., 2025; Wei & Sobrino, 2025; Rakhimberdina et al., 2025). For example, analyses of meteorological factors such as wind speed, temperature, humidity, and atmospheric pressure have been used to quantify their correlations with PM<sub>2.5</sub> levels in urban environments, demonstrating how weather conditions modulate pollutant accumulation and dispersion (Wabinyai et al., 2026; Wang et al., 2025). Research across China has shown that temperature, humidity, and wind exert strong influences on PM<sub>2.5</sub> variability, with significant spatial and seasonal heterogeneity (Gao et al., 2023; Chen et al., 2020). In addition, studies focusing on high pollution episodes in regional basins have identified key meteorological factors such as atmospheric boundary layer height, temperature inversions, and wind patterns that contribute to the onset and persistence of PM<sub>2.5</sub> pollution episodes (Shi et al., 2020; Zhang et al., 2020). PM<sub>2.5</sub> pollution episodes are defined as multi-day events during which fine particulate matter concentrations substantially exceed daily air quality standards, frequently associated with enhanced emissions, secondary particle formation, and unfavorable dispersion conditions (Wang et al., 2018).

However, before this study, there has been a significant knowledge gap in understanding the influence of meteorological parameters on PM<sub>2.5</sub> concentrations and associated air pollution episodes in Karaganda region. Addressing this gap is essential for characterizing the city's air quality dynamics and for providing a scientific basis for the development of targeted mitigation strategies.

*This study aims* to quantitatively assess the influence of meteorological parameters on PM<sub>2.5</sub> concentrations and associated air pollution episodes in Karaganda from 2017 to 2024.

## Materials and methods

**Study area.** Karaganda, located in Central Kazakhstan, originated in 1857 with the establishment of the Ivanovsky coal mine, marking the beginning of the city's development around coal mining. The region hosts large industrial enterprises involved in coal mining, machinery manufacturing, metal processing, and the food industry. Currently, Karaganda experiences some of the most severe environmental conditions in the region. According to data from the Department of Ecology of the Karaganda Region, in 2024 there are 332 enterprises in the region that emit pollutants into the environment. The total annual emissions from stationary sources amount to 585,000 tons. The major sources of air pollution include motor vehicles, solid waste landfills, combined heat and power plants (CHPs), a foundry and mechanical plant, railway enterprises, and motor transport companies. The main sources of pollution include the enterprises "Kazakhmys" Corporation LLC, "ArcelorMittal Temirtau" JSC, and "TEMK" (KhMZ) JSC which are among the major mining and metallurgical enterprises operating in the area as well as road transport, municipal solid waste landfills, the combined heat and power plant, the foundry and mechanical plant, railway transport facilities, and other vehicle-related enterprises (Environmental Status Bulletin of the Karaganda Region, 2017–2024).

The residential sector also contributes significantly to urban air pollution, particularly in areas affected by emissions from household stoves and small boilers. The highest contributions are observed in the districts of Maikuduk, Prishakhtinsk, and Kirzavod-1 and -2, where low chimney heights in private households limit pollutant dispersion. In contrast, industrial facilities, schools, hospitals, and combined heat and power (CHP) plants are equipped with taller stacks, allowing pollutants to disperse at higher altitudes. Another concern is the lack of control over fuel quality; many residents use low-grade coal that does not meet certified standards, and some rely on 'Nedelka' stoves, which are believed to emit more soot than conventional household stoves.

The climate in Karaganda is sharply continental, characterized by harsh winters, hot summers, and relatively low annual precipitation, with snowstorms and blizzards common during winter.

**Data collection and assessment.** In this study, monthly meteorological and air quality data for Karaganda for the period 2017–2024 were obtained from RSE "Kazhydromet" (Republican State Enterprise "Kazakhstan Hydrometeorological Service") <https://www.kazhydromet.kz/en/>. The meteorological parameters included temperature (°C), relative humidity (%), atmospheric pressure (hPa), and wind speed (m/s). Air quality measurements comprised suspended particulate matter (dust, mg/m<sup>3</sup>), PM<sub>2.5</sub> (mg/m<sup>3</sup>), PM<sub>10</sub> (mg/m<sup>3</sup>), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>, mg/m<sup>3</sup>), carbon monoxide (CO, mg/m<sup>3</sup>), nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>, mg/m<sup>3</sup>), ozone (O<sub>3</sub>, mg/m<sup>3</sup>), ammonia (NH<sub>3</sub>, mg/m<sup>3</sup>), and formaldehyde (HCHO, mg/m<sup>3</sup>). Air quality monitoring in Karaganda is conducted at 7 observation stations, including 4 manual sampling posts and 3 automatic monitoring stations [19]. The dataset provided monthly observations over this eight-year period, which were used to assess temporal trends, seasonal variations, and relationships between meteorological conditions and pollutant concentrations. These data allowed for a comprehensive analysis of air pollution patterns in Karaganda and the identification of factors influencing atmospheric quality in both industrial and residential areas.

**Modelling framework.** Prior to modelling, the dataset underwent systematic preprocessing to ensure numerical consistency and temporal coherence. Numeric formatting was standardized by converting decimal commas into decimal points, followed by type casting of all predictor variables to continuous numeric form. A unified temporal index was reconstructed by combining month and year fields into a single datetime variable, enabling chronological ordering and time-series operations. To capture cyclical seasonal behavior, temporal features were encoded using trigonometric transformations:

$$\begin{aligned} month_{sin} &= \sin\left(\frac{2\pi m}{12}\right), \\ month_{cos} &= \cos\left(\frac{2\pi m}{12}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

This representation preserves continuity between calendar boundaries and avoids artificial discontinuities inherent in categorical encoding. Because particulate matter exhibits temporal persistence, autoregressive predictors were

introduced to account for carryover effects, including a one-month lag of  $PM_{2.5}$  to capture short-term memory and a twelve-month lag to represent seasonal recurrence patterns. Observations with undefined lag values were excluded to maintain modelling integrity.

To robustly characterize relationships between meteorological conditions and particulate concentrations, three complementary regression approaches were implemented. The selection reflects a balance between interpretability, nonlinear modelling capacity, and predictive performance. The modelling task was formulated as a supervised regression problem where  $PM_{2.5}$  concentration ( $mg/m^3$ ) serves as the response variable. Meteorological predictors were selected based on established atmospheric transport and dispersion theory and include air temperature ( $^{\circ}C$ ), relative humidity (%), atmospheric pressure (hPa), wind speed (m/s). These variables represent key mechanisms governing pollutant accumulation, vertical mixing, hygroscopic growth of aerosols, and horizontal transport.

**Multiple Linear Regression.** A standardized multiple linear regression model was adopted as a transparent baseline. After feature scaling, the model estimates relationships of the form:

$$PM_{2.5} = \beta_0 + \sum_{i=1}^p (\beta_i X_i + \varepsilon) \quad (2)$$

where:

$PM_{2.5}$  – observed concentration of fine particulate matter ( $mg/m^3$ ) at a given time step;

$\beta_0$  – intercept term, representing the baseline  $PM_{2.5}$  concentration when all predictors are equal to zero;

$\sum_{i=1}^p$  – summation operator indicating that the model aggregates contributions from all predictors, where  $p$  denotes the total number of independent variables;

$\beta_i$  – regression coefficient associated with the  $i$ -th predictor, quantifying the magnitude and direction of its influence on  $PM_{2.5}$  concentration;

$X_i$  – the  $i$ -th predictor variable (e.g., temperature, relative humidity, atmospheric pressure, wind speed);

$p$  – total number of predictors included in the model;

$\varepsilon$  – stochastic error term capturing unexplained variability, measurement noise, and the influence of omitted factors.

This approach enables direct interpretation of coefficient magnitudes and directional influence of predictors. Although limited in capturing nonlinear interactions, it provides an essential reference for assessing added value of more complex algorithms.

**Random Forest Regression.** A Random Forest ensemble was employed to model nonlinear relationships and feature interactions without imposing parametric assumptions. This method constructs multiple decision trees via bootstrap resampling of observations, randomised feature selection, and ensemble averaging. Such an architecture effectively captures threshold behavior and multivariate dependencies commonly observed in atmospheric systems.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

where:

$y_i$  – observed  $PM_{2.5}$  concentration;

$\hat{y}_i$  – predicted concentration;

$\bar{y}$  – mean of the observed concentration;

$n$  – number of observations.

**Gradient Boosting via LightGBM.** To achieve high predictive accuracy, a gradient boosting model based on LightGBM was implemented. This algorithm iteratively minimizes residual error by sequentially fitting weak learners to gradient updates:

$$F_{t+1}(x) = F_t(x) + \gamma_t h_t(x) \quad (4)$$

where:

$F_t(x)$  – the current ensemble prediction function at iteration  $t$ ; it represents the aggregated output of all previously constructed weak learners;

$F_{t+1}(x)$  – the updated ensemble function after incorporating the new weak learner at iteration  $t+1$ ;

$x$  – the vector of input features (meteorological variables, seasonal encodings, and lagged  $PM_{2.5}$  values);

$h_t(x)$  – the weak learner fitted at iteration  $t$ , typically a decision tree trained to approximate the negative gradient of the loss function (i.e., the residuals);

$\gamma_t$  – the learning rate (or step size) applied to the weak learner, controlling the magnitude of its contribution to the ensemble model.

LightGBM's histogram-based optimization and leaf-wise growth strategy provide computational efficiency and enhanced modelling capacity for

structured environmental datasets. Within the modelling hierarchy, this approach functions as the primary performance-oriented learner.

**Forecasting methodology.** Model assessment followed a temporally consistent validation protocol to reflect real-world forecasting deployment. Data were split along the time axis, reserving the final twelve months for testing. This approach prevents information leakage and evaluates model generalization under forward-prediction conditions. To further assess robustness, expanding-window cross-validation was applied using TimeSeriesSplit. In each fold, the training horizon grows while validation advances chronologically, providing stability estimates across temporal regimes.

Model accuracy and explanatory strength were evaluated using complementary measures, including Root Mean Square Error (RMSE), which emphasizes large deviations; Mean Absolute Error (MAE), which measures the average magnitude of error; the coefficient of determination ( $R^2$ ), which captures explained variance; and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Together, these metrics quantify predictive precision, stability, and descriptive adequacy.

Future PM<sub>2.5</sub> concentrations for 2025–2026 were estimated using recursive multi-step prediction. Since meteorological observations for future periods are unavailable, a climatological scenario was adopted whereby monthly mean meteorological values derived from historical records were assigned to corresponding forecast months. This procedure approximates expected seasonal atmospheric conditions without reliance on external climate projections. Lagged pollutant features were updated iteratively using model-generated predictions, allowing dynamic propagation of temporal dependencies throughout the forecast horizon.

**Uncertainty quantification.** To account for predictive uncertainty, interval estimates were constructed using the cross-validated RMSE of the best-performing model. Assuming approximate normality of residuals, bounds were computed as:  $\hat{y}_i \pm 1.96 * RMSE$ . While ensemble models do not inherently produce probabilistic outputs, this pragmatic approximation provides interpretable confidence envelopes suitable for applied environmental forecasting contexts. Interpretation of model behavior was conducted through complementary analyses. Feature importance

rankings derived from ensemble methods identify dominant meteorological drivers, while standardized linear coefficients reveal directional relationships between predictors and pollutant levels. Together these perspectives enhance transparency and support environmental inference beyond predictive accuracy alone.

## Results and discussion

Between 2017 and 2024, pollution levels in Karaganda have remained consistently high. The descriptive statistics indicate clear seasonal variability in both meteorological parameters and air pollutant concentrations across the sampling period (Table-1). The mean air temperature was  $4.44 \pm 12.33$  °C, ranging from  $-18.1$  to  $23.9$  °C, reflecting strong seasonal contrast between winter and summer months. Lower temperatures were observed during the winter months (approximately December–February), accompanied by higher relative humidity ( $63.54 \pm 11.41\%$ , range: 41–82%) and reduced atmospheric mixing conditions. The mean wind speed was  $2.68 \pm 0.41$  m/s (1.9–4.2 m/s), and the mean atmospheric pressure was  $954.12 \pm 5.53$  hPa (942.4–966.0 hPa), indicating relatively stable synoptic conditions during certain periods (Figure 1). These meteorological factors favor pollutant accumulation near the surface due to temperature inversions, a shallow planetary boundary layer, and limited dispersion.

Elevated concentrations of particulate matter and combustion-related pollutants were primarily associated with the cold season. The mean concentration of PM<sub>2.5</sub> was  $0.136 \pm 0.136$  mg/m<sup>3</sup> (0.000–1.200 mg/m<sup>3</sup>), while PM<sub>10</sub> averaged  $0.132 \pm 0.107$  mg/m<sup>3</sup> (0.000–0.790 mg/m<sup>3</sup>). Suspended particulate matter (dust) showed a mean of  $0.125 \pm 0.063$  mg/m<sup>3</sup> (0.010–0.330 mg/m<sup>3</sup>). The relatively high maximum values suggest episodic pollution events, most likely occurring during winter. Combustion-related gaseous pollutants also showed substantial variability: CO averaged  $1.25 \pm 0.60$  mg/m<sup>3</sup> (0.03–4.00 mg/m<sup>3</sup>), SO<sub>2</sub> averaged  $0.024 \pm 0.006$  mg/m<sup>3</sup> (0.010–0.046 mg/m<sup>3</sup>), and NO<sub>2</sub> averaged  $0.041 \pm 0.019$  mg/m<sup>3</sup> (0.014–0.150 mg/m<sup>3</sup>). These elevated concentrations during colder months are consistent with increased coal-based heating, thermal power generation, and residential solid fuel combustion, combined with unfavorable dispersion conditions.

**Table 1**  
Descriptive statistics for parameters (N=96)

Variable	Mean	Std	Min	25%	Median	75%	Max
Date	6.702	3.47	1.202	3.952	6.702	9.452	12.202
Temperature (°C)	4.441	12.331	-18.1	-7.125	6.05	16.95	23.9
Relative Humidity (%)	63.542	11.407	41.0	54.0	64.5	73.0	82.0
Atmospheric Pressure (hPa)	954.119	5.533	942.4	950.575	954.9	958.325	966.0
Wind Speed (m/s)	2.683	0.412	1.9	2.4	2.6	2.9	4.2
Suspended particulate matter (dust), mg/m <sup>3</sup>	0.125	0.063	0.01	0.087	0.122	0.153	0.33
PM <sub>2.5</sub> , mg/m <sup>3</sup>	0.136	0.136	0.0	0.05	0.12	0.187	1.2
PM <sub>10</sub> , mg/m <sup>3</sup>	0.132	0.107	0.0	0.048	0.12	0.18	0.79
Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> ), mg/m <sup>3</sup>	0.024	0.006	0.01	0.02	0.021	0.027	0.046
Carbon monoxide (CO), mg/m <sup>3</sup>	1.249	0.602	0.03	0.915	1.155	1.411	4.0
Nitrogen dioxide (NO <sub>2</sub> ), mg/m <sup>3</sup>	0.041	0.019	0.014	0.03	0.038	0.042	0.15
Ozone (O <sub>3</sub> ), mg/m <sup>3</sup>	0.035	0.068	0.0	0.018	0.03	0.041	0.68
Ammonia (NH <sub>3</sub> ), mg/m <sup>3</sup>	0.009	0.008	0.0	0.005	0.01	0.01	0.057
Formaldehyde (HCHO), mg/m <sup>3</sup>	0.013	0.01	0.0	0.01	0.01	0.013	0.1

In contrast, warmer months (approximately May–September) were characterized by higher temperatures and improved atmospheric mixing, resulting in generally lower concentrations of primary combustion pollutants such as PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, and SO<sub>2</sub>. However, O<sub>3</sub> exhibited a mean concentration of  $0.035 \pm 0.068$  mg/m<sup>3</sup> (0.000–0.680 mg/m<sup>3</sup>), with higher levels expected during warmer periods due to enhanced photochemical activity driven by stronger solar radiation and elevated temperatures. Photochemical reactions involving NO<sub>x</sub> and VOCs promote secondary ozone formation under these conditions. Additional reactive pollutants included NH<sub>3</sub> with a mean of  $0.009 \pm 0.008$  mg/m<sup>3</sup> (0.000–0.057 mg/m<sup>3</sup>) and HCHO at  $0.013 \pm 0.010$  mg/m<sup>3</sup> (0.000–0.100 mg/m<sup>3</sup>), which may contribute to secondary aerosol and photochemical processes.

Figures 1 and 2 present a time series analysis of meteorological parameters alongside pollutant concentrations, providing a comprehensive understanding of temporal variations in air quality in Karaganda.

The correlation matrix reveals structured relationships between meteorological conditions and pollutant concentrations, indicating that

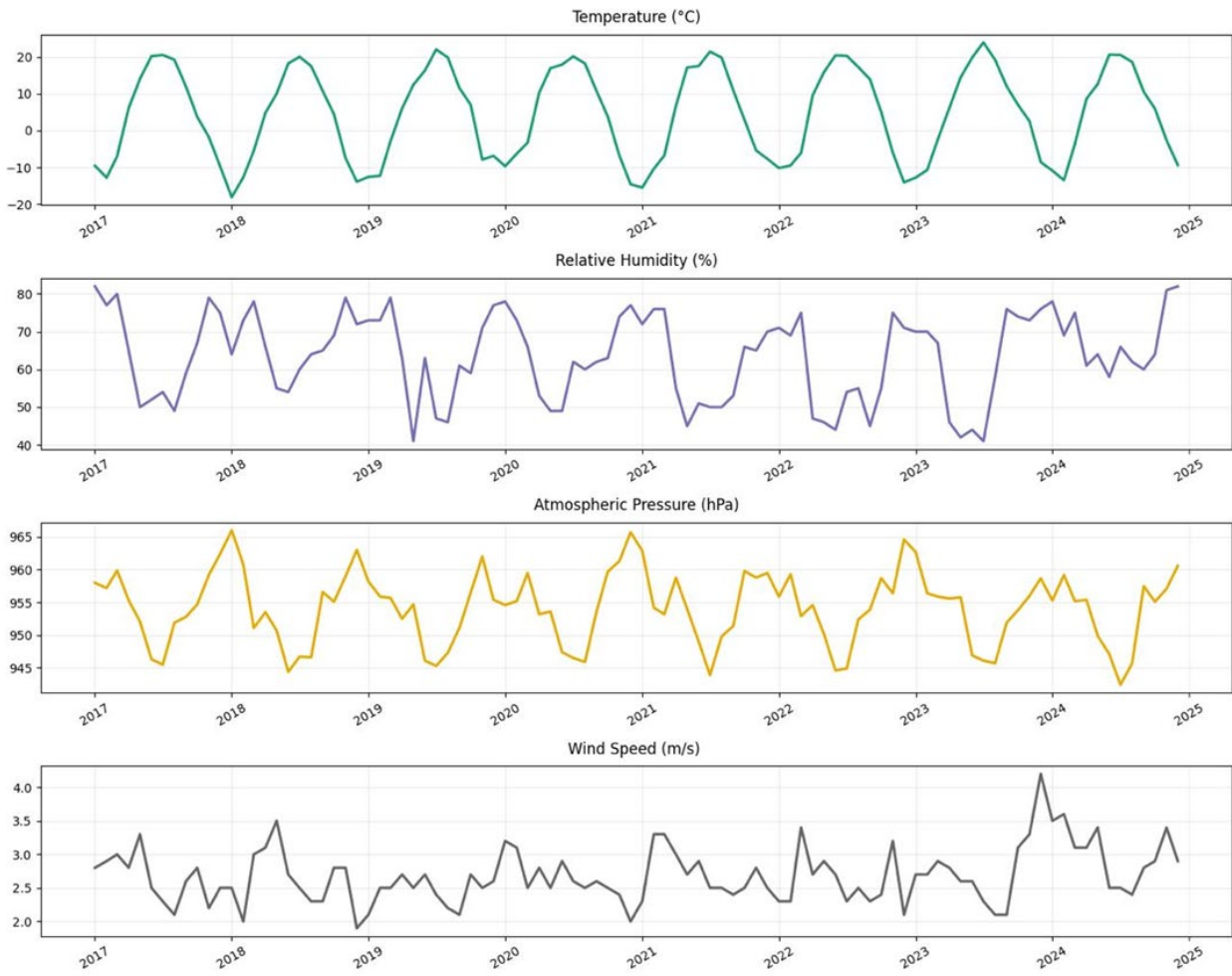
atmospheric variability plays a measurable role in shaping air quality patterns (Figure-3).

*Temperature* shows moderate negative correlations with particulate matter fractions (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) and several gaseous pollutants, suggesting that lower temperature regimes are associated with increased pollutant accumulation. This behavior is consistent with reduced atmospheric mixing and more stable boundary layer conditions that limit dispersion.

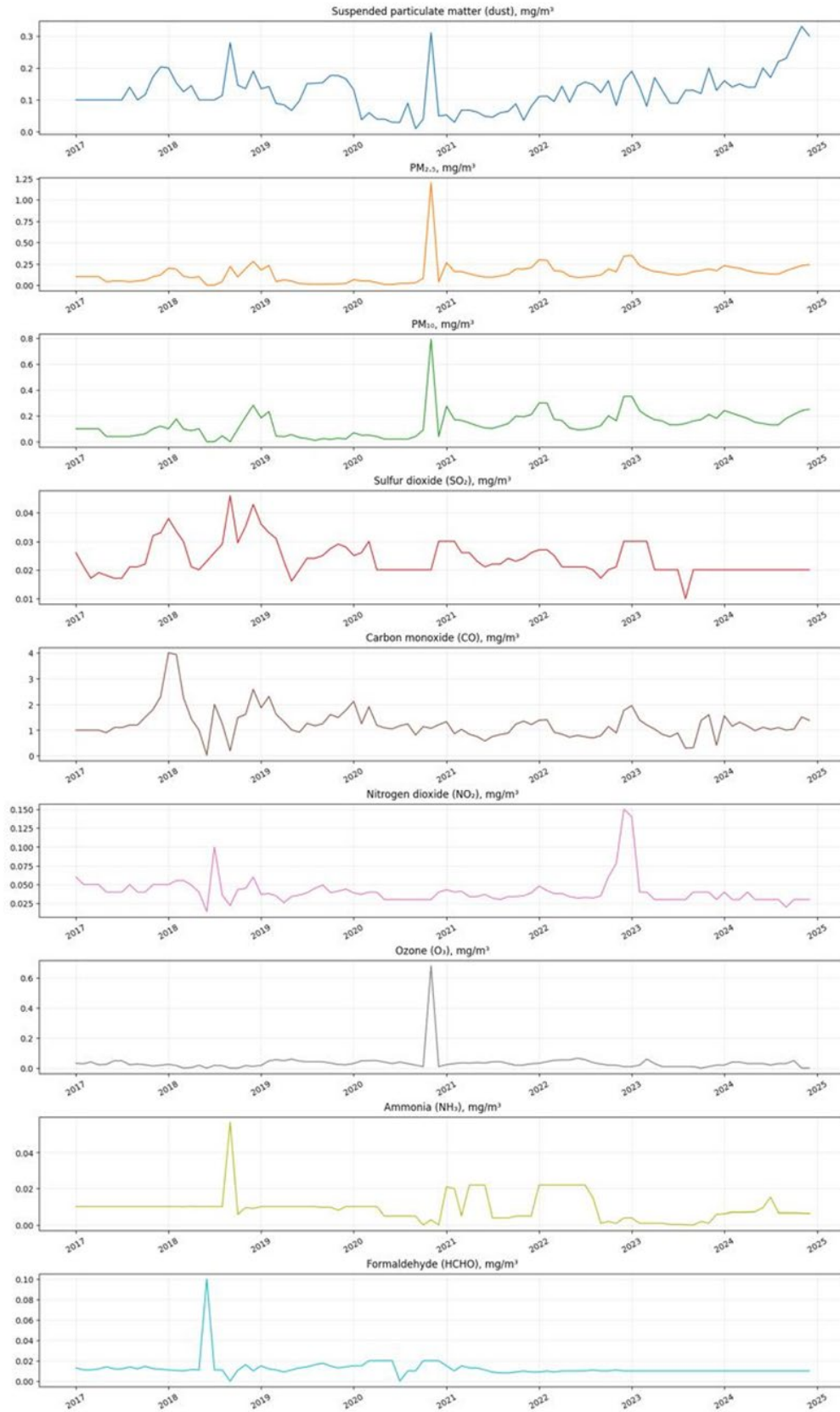
*Relative humidity* demonstrates moderate positive correlations with particulate matter ( $r \approx 0.29$ – $0.33$ ) and several gaseous species, while showing inverse association with temperature. These relationships may reflect the contribution of moisture-driven processes such as hygroscopic particle growth or secondary aerosol formation, which can influence measured concentrations under humid conditions.

*Atmospheric pressure* exhibits one of the more consistent associations across pollutant groups, with positive correlations observed for PM<sub>2.5</sub> ( $r \approx 0.41$ ), PM<sub>10</sub> ( $r \approx 0.45$ ), SO<sub>2</sub> ( $r \approx 0.48$ ), and CO ( $r \approx 0.46$ ). Such patterns suggest that stable pressure systems may favor pollutant retention by limiting vertical air exchange, thereby increasing concentration persistence near the surface.

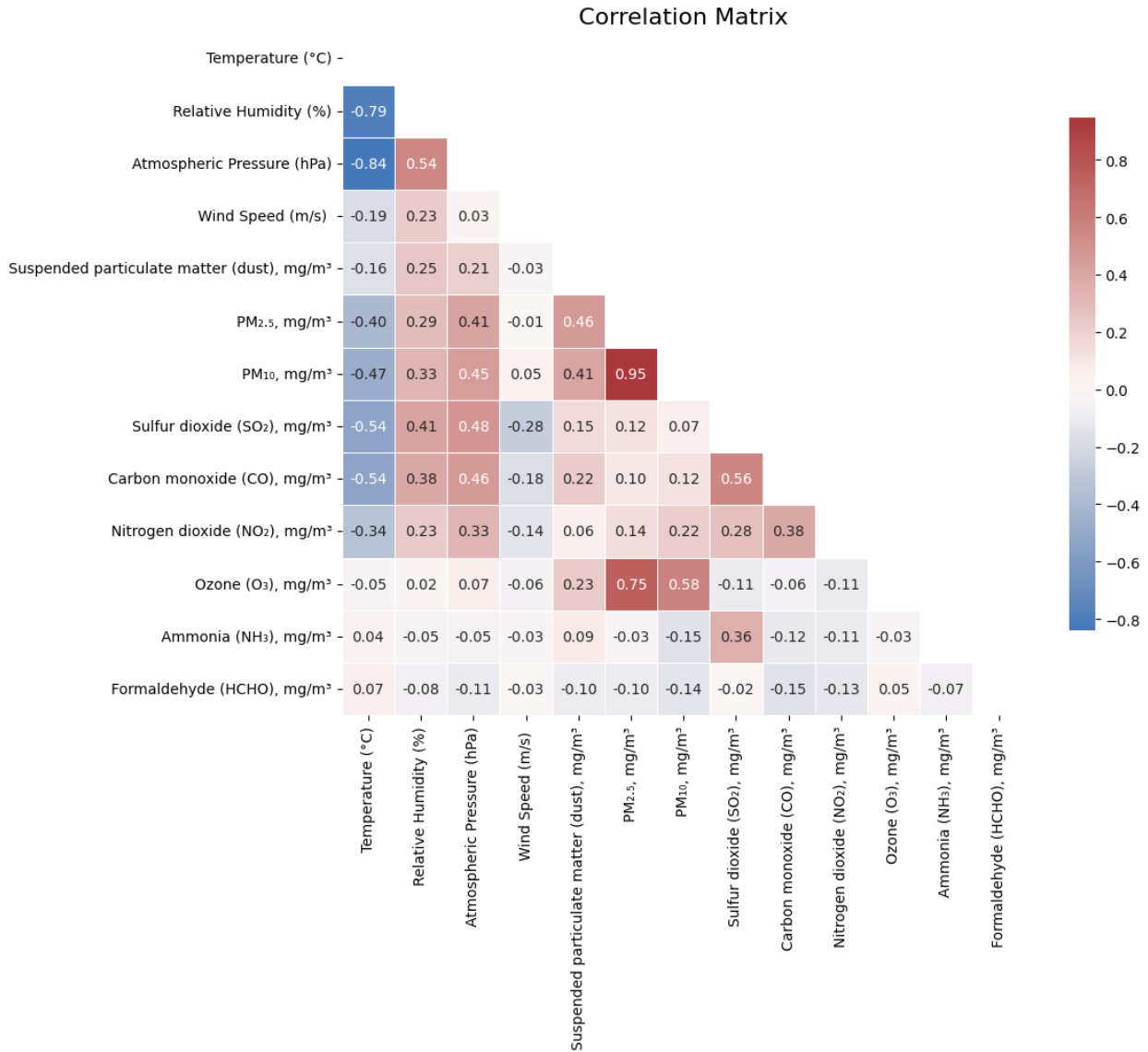
**Figure 1**  
*Time series of meteorological parameters*



**Figure 2**  
Time series of pollutant concentrations ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ , and  $CO$ )



**Figure 3**  
The Pearson correlation of all parameters



*Wind speed* generally shows weak to moderate negative relationships with several pollutants, particularly SO<sub>2</sub> and CO, supporting its role as a dispersion mechanism. However, the overall magnitude of these correlations remains limited, indicating that wind-driven transport effects may be episodic or nonlinear rather than strongly reflected through simple linear dependence.

Collectively, these findings confirm that meteorological variables are not merely background

descriptors but active drivers influencing pollutant variability. Their inclusion in predictive modeling frameworks is therefore justified, as they capture environmental dynamics directly linked to pollutant transport, transformation, and accumulation processes.

**Model Performance Evaluation (MAE).** The predictive performance of the evaluated models was assessed using walk-forward cross-validation, with the results summarized in Table 2.

**Table 2***Predictive performance comparison of regression models evaluated using walk-forward cross-validation*

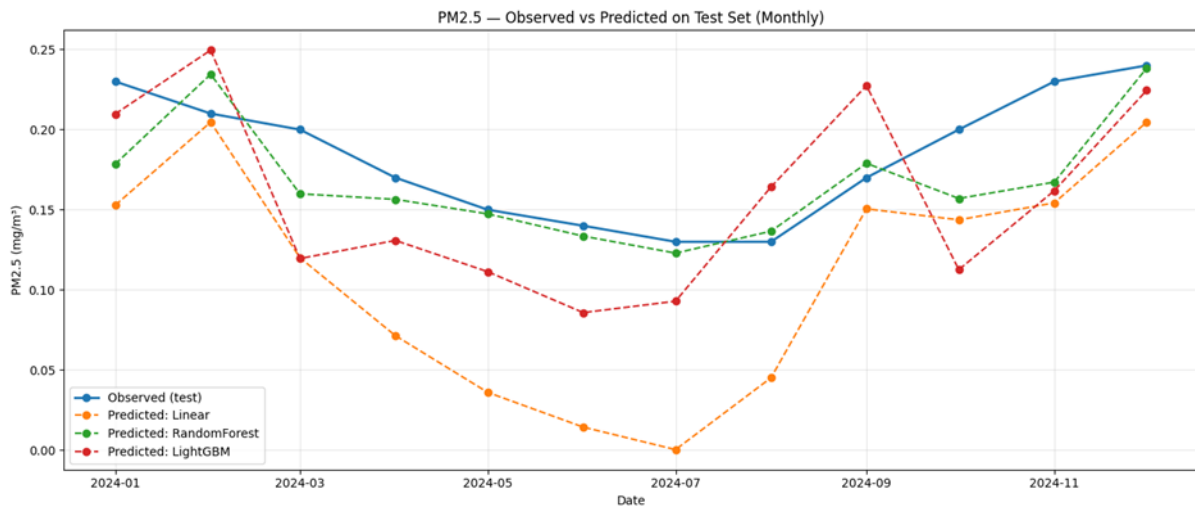
Model	RMSE (mean $\pm$ std)	MAE (mean $\pm$ std)	R <sup>2</sup> (mean $\pm$ std)	MAPE % (mean $\pm$ std)
Random Forest	0.107 $\pm$ 0.116	0.062 $\pm$ 0.041	0.185 $\pm$ 0.468	110.94 $\pm$ 132.15
LightGBM	0.132 $\pm$ 0.109	0.087 $\pm$ 0.035	-0.563 $\pm$ 0.416	168.91 $\pm$ 193.41
Linear Regression	0.239 $\pm$ 0.179	0.141 $\pm$ 0.058	-22.30 $\pm$ 46.71	193.04 $\pm$ 181.55

Among the three approaches, the Random Forest model demonstrated the strongest overall performance. It achieved the lowest mean RMSE of 0.107 mg/m<sup>3</sup>, indicating the smallest average deviation between predicted and observed PM<sub>2.5</sub> concentrations. This model also produced the lowest mean MAE (0.062 mg/m<sup>3</sup>) and the most favorable coefficient of determination (R<sup>2</sup> = 0.185  $\pm$  0.468), reflecting limited but positive explanatory capacity. In contrast, the LightGBM model exhibited higher prediction error, with a mean RMSE of 0.132 mg/m<sup>3</sup>, and reduced explanatory capability (R<sup>2</sup> = -0.563  $\pm$  0.416), suggesting inconsistent alignment with observed variance patterns. The linear regression model showed substantially weaker performance, yielding a mean RMSE of 0.239 mg/m<sup>3</sup> and strongly negative R<sup>2</sup> values (-22.30  $\pm$  46.71), indicating an inability to capture

the underlying data structure. Additionally, elevated MAPE values for both the linear and boosting models (193% and 169%, respectively) highlight instability in relative error magnitude.

Overall, these quantitative comparisons suggest that the relationship between meteorological variables and PM<sub>2.5</sub> concentrations cannot be adequately described using linear assumptions. Instead, nonlinear ensemble methods appear more suitable for capturing threshold effects and complex multivariate interactions inherent in the data.

**Test-Period Prediction Behavior.** Figure 4 illustrates the comparison between observed PM<sub>2.5</sub> concentrations and model predictions for the 2024 hold-out period. Observed values ranged approximately between 0.13 and 0.24 mg/m<sup>3</sup>, reflecting moderate seasonal variability.

**Figure 4***Observed versus predicted PM<sub>2.5</sub> concentrations during the test period (monthly resolution)*

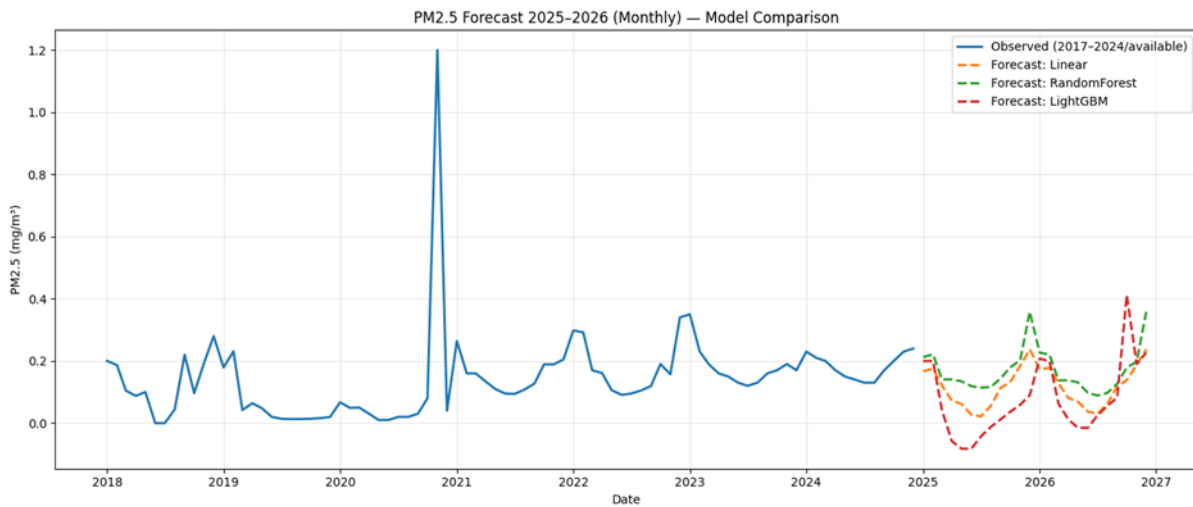
The Random Forest model tracked seasonal dynamics closely, particularly reproducing the late-year increase toward  $\sim 0.24$  mg/m<sup>3</sup>. Linear regression consistently underestimated concentrations, producing values near 0.00–0.15 mg/m<sup>3</sup>, including unrealistic near-zero predictions during mid-year months. LightGBM showed greater responsiveness but also generated oscillatory behaviour and local overestimations (e.g., exceeding

0.22 mg/m<sup>3</sup> during transitional periods). These observations visually reinforce the numerical performance metrics and demonstrate the superior temporal stability of the Random Forest approach.

**Forecasting Analysis PM<sub>2.5</sub> concentrations for 2025–2026.** Based on the validated models, PM<sub>2.5</sub> concentrations were projected for 2025–2026 under climatological meteorological conditions. The forecast trajectories are presented in Figure 5.

**Figure 5**

Multi-model PM<sub>2.5</sub> forecast for 2025–2026 using climatological meteorological inputs

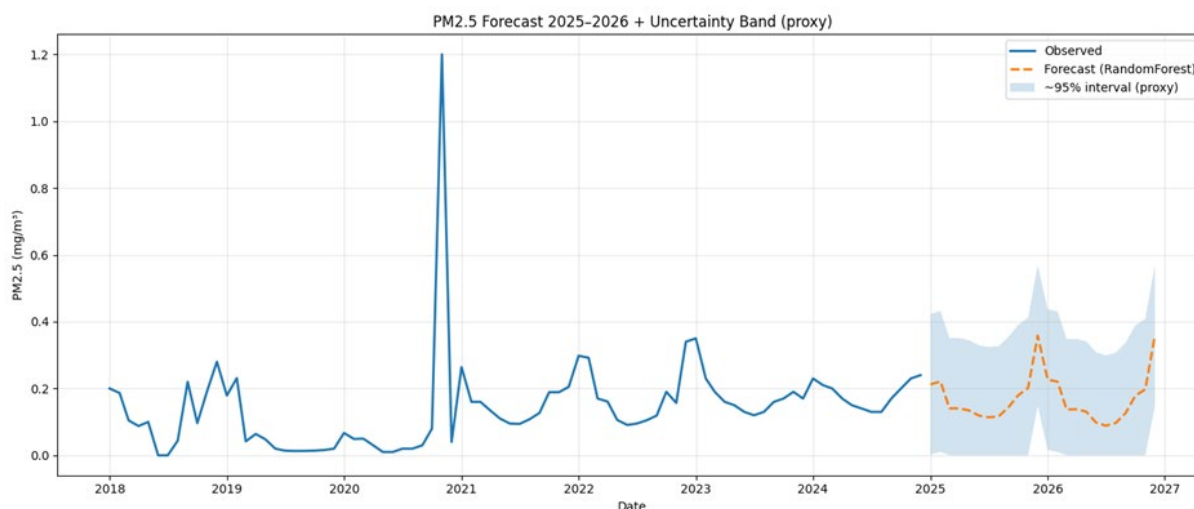


The Random Forest forecast suggests seasonal oscillations within a range of approximately 0.10–0.35 mg/m<sup>3</sup>, maintaining amplitude comparable to historical behavior. Linear model projections remain smoother and confined to a narrower interval ( $\sim 0.03$ –0.22 mg/m<sup>3</sup>), reflecting their limited dynamic sensitivity. LightGBM produces the largest variability, including transient spikes approaching 0.40 mg/m<sup>3</sup>, consistent with its higher variance observed during validation. Despite differences in magnitude, all models preserve the annual periodic pattern, indicating that cyclical encoding and lag features successfully propagate seasonal structure into forward predictions.

It should be emphasized that forecasts are scenario-based and assume average meteorological conditions. Consequently, they represent expected seasonal tendencies rather than deterministic future pollution events.

**Uncertainty quantification.** Prediction uncertainty was evaluated for the best-performing model (Random Forest) using cross-validated RMSE as an error proxy. The mean RMSE of 0.107 mg/m<sup>3</sup> was used to construct approximate 95% confidence bounds:  $\hat{y}_t \pm 1.96 * RMSE$  resulting in an uncertainty width of roughly  $\pm 0.21$  mg/m<sup>3</sup> (Figure-6).

**Figure 6**  
Random Forest forecast with approximate 95% uncertainty envelope



The uncertainty band indicates that projected concentrations near  $0.20 \text{ mg/m}^3$  may realistically vary between approximately  $0.0$  and  $0.41 \text{ mg/m}^3$ , reflecting inherent atmospheric variability and modelling limitations. While this interval does not represent a fully probabilistic estimate, it provides valuable contextual interpretation of forecast reliability. The comparative modelling results provide insight into atmospheric processes governing particulate variability. The inability of linear regression to represent observed dynamics supports the hypothesis that  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations respond nonlinearly to meteorological drivers. Ensemble methods capture interaction effects between humidity, temperature, and transport mechanisms more effectively, consistent with established aerosol formation theory.

## Conclusion

This study demonstrated pronounced seasonal variability in both meteorological parameters and air pollutant concentrations during the sampling period, indicating that air quality dynamics in Karaganda are strongly influenced by seasonal changes in temperature, atmospheric stability, and dispersion conditions.

Winter conditions, characterized by low air temperatures, elevated relative humidity, and limited atmospheric mixing, promoted the accumulation of primary pollutants. Elevated concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , suspended particulate matter,  $\text{CO}$ ,

$\text{SO}_2$ , and  $\text{NO}_2$  were observed during the cold season, reflecting the dominant contribution of combustion-related sources such as coal-based heating, thermal power plants, and residential solid fuel use. Reduced wind speeds and stable synoptic conditions further enhanced pollutant buildup near the surface, leading to frequent air pollution episodes.

In contrast, warmer months were associated with improved dispersion conditions and generally lower levels of primary combustion pollutants. However,  $\text{O}_3$  concentrations increased during this period, highlighting the enhanced role of photochemical processes driven by higher temperatures and stronger solar radiation. This seasonal shift underscores the transition from primary emission dominance in winter to secondary pollutant formation in summer.

Exceedances of daily average concentration standards were observed for suspended particles ( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , dust), phenol, formaldehyde, and ozone, with the most pronounced exceedances noted for  $\text{PM}_{2.5}$ . Such pollution is typical during the cold season, associated primarily with emissions from thermal power plants and residential heating. Over the years, increases in the “highest frequency” indicator have been largely attributed to  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , hydrogen sulfide, and carbon monoxide, reflecting the significant contribution of industrial and thermal power plant emissions to urban air pollution and the persistent accumulation of these pollutants in the city’s atmosphere.

Furthermore, the persistence of seasonal oscillations in particulate concentrations across forecast horizons using Multiple Linear Regression, Random Forest Regression, and Gradient Boosting via LightGBM indicates that climatic forcing remains a dominant regulator of particulate behavior in the region.

Overall, the findings confirm that winter air pollution in coal-mining regions is primarily governed by anthropogenic combustion emissions, including those from residential heating and coal-fired power plants, combined with unfavorable meteorological conditions. In contrast, summer air quality is more strongly influenced by atmospheric chemistry and photochemical reactions. These results emphasize the need for season-specific air quality management strategies, such as reducing emissions from coal combustion and residential heating during winter, and controlling ozone precursors and secondary pollutants during warmer months. These findings underscore the importance of implementing seasonally adaptive mitigation strategies, rather than applying uniform air quality policies throughout the year.

### Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge RSE “KazHydroMet” for providing access to air

pollutant data and meteorological observations for the city of Karaganda.

### Funding

This research was supported by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (IRN AP27510733), «Analysis of chemical characterization and sources of PM<sub>2.5</sub> for health impact assessment in the industrial city of Qarağandy, Central Kazakhstan».

### CRedit authorship contribution statement

Gulden Ormanova: Writing – original draft, Writing – review & editing, Methodology, Investigation, Formal analysis, Funding acquisition, Resources. Aruzhan Rakhimberdina: Data curation, Software, Visualization. Alexey Alexeyev: Data curation. Kyran Kassym: Formal analysis. Dhawal Shah: Validation, Supervision. Nurxat Nuraje: Validation, Supervision.

### Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

### References

- Asif, M., Junussov, M., Longinos, S., Hazlett, R., & Satibekova, S. (2025). CO<sub>2</sub> storage capacity of coal seams: A screening and geological review of carboniferous coal formations of Kazakhstan. *International Journal of Coal Science & Technology*, 12(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s40789-025-00750-z>
- Chen, Z., Chen, D., Zhao, C., Kwan, M.-P., Cai, J., Zhuang, Y., Zhao, B., Wang, X., Chen, B., Yang, J., Li, R., He, B., Gao, B., Wang, K., & Xu, B. (2020). Influence of meteorological conditions on PM<sub>2.5</sub> concentrations across China: A review of methodology and mechanism. *Environment International*, 139, 105558. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105558>
- Environmental Status Bulletin of the Karaganda Region (2017–2024). Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, Branch of RSE “Kazhydromet” for Karaganda and Ulytau Regions <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayushey-sredy/2025>
- Gao, S., Cheng, X., Yu, J., Chen, L., Sun, Y., Bai, Z., Xu, H., Azzi, M., & Zhao, H. (2023). Meteorological influences on PM<sub>2.5</sub> variation in China using a hybrid model of machine learning and the Kolmogorov-Zurbenko filter. *Atmospheric Pollution Research*, 14(11), Article 101905. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101905>
- Hsu, C.-Y., Chauhan, A., Chen, Y.-W., Jian, M.-Y., Liu, K.-T., Ho, T. P. T., & Cheng, Y.-H. (2025). Unveiling the source contributions of fine and coarse particulate matter using PM-bound metals and PMF-AI modeling. *Atmospheric Pollution Research*. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102529>
- Jiang, B., Cai, Y., Shi, Y., Zhai, Q., Huang, H., Peng, L., & Zhan, J. (2025). Characterization, sources, and driving factors of particulate matter (PM) pollution in a desert hinterland city: Insights from Hotan, China. *Journal of Environmental Sciences*, 161, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2025.10.024>
- Junussov, M., & Mustapayeva, S. (2024). Preliminary XRF analysis of coal ash from Jurassic and Carboniferous coals at five Kazakh mines: Industrial and environmental comparisons. *Applied Sciences*, 14(22), 10586. <https://doi.org/10.3390/app142210586>
- Kopobayeva, A. N., Baidautetova, I. V., Amangeldikyzy, A., & Askarova, N. S. (2024). Trace elements distribution in the k<sub>7</sub> seam of the Karaganda Coal Basin, Kazakhstan. *Geosciences*, 14(6), 143. <https://doi.org/10.3390/geosciences14060143>
- Kopobayeva, A., Amangeldikyzy, A., Blyalova, G., & Askarova, N. (2024). Mineralogical and geochemical features of coals and clay layers of the Karaganda Coal Basin. *Minerals*, 14(4), 349. <https://doi.org/10.3390/min14040349>

Martinez-Soto, A., Jentsch, M. F., Martinez-Gallegos, V., Duchêne, J., & Zipf, A. (2025). Influence of meteorological variables on PM<sub>2.5</sub> concentrations in cities heated with solid fuels: A case study from Temuco, Chile. *Atmospheric Environment*, X, 29, 100401. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100401>

Ormanova, G., Hopke, P. K., Dhammapala, R., Ozturk, F., Ozturk, F. C., Shah, D., & Torkmahalleh, M. A. (2025). Chemical characterization and source apportionment of atmospheric fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) at an urban site in Astana, Kazakhstan. *Atmospheric Pollution Research*, 16(1), 102324. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102324>

Rakhimberdina, A., Ormanova, G., & Yedilkhan, D. (2025). Development of a prediction model for the assessment of air quality in the city of Astana, Kazakhstan. In Proceedings of the 2025 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS) (pp. 303–308). <https://doi.org/10.1109/E-TEMS64751.2025.11239309>

Safaei-Farouji, M., Misch, D., Sachsenhofer, R. F., Kostoglou, N., Gaus, G., Bauersachs, T., Junussov, M., & Fustic, M. (2025). CO<sub>2</sub> utilization and sequestration potential in deep coal seams: A case study on Carboniferous coals from the Karaganda Basin, Kazakhstan. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 101, 103204. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103204>

Safaei-Farouji, M., Misch, D., Sachsenhofer, R. F., Kostoglou, N., Gaus, G., Bauersachs, T., Junussov, M., & Fustic, M. (2025). CO<sub>2</sub> utilization and sequestration potential in deep coal seams: A case study on Carboniferous coals from the Karaganda Basin, Kazakhstan. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 101, 103204. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103204>

Shi, Y., Yim, S., Yang, J., Yao, L., Zhang, H., & He, K. (2020). Characteristics and meteorological mechanisms of transboundary air pollution in a persistent heavy PM<sub>2.5</sub> pollution episode in Central-East China. *Atmospheric Environment*, 223, 117239. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117239>

U.S. Environmental Protection Agency. (2013). Pre-feasibility study for coal mine methane drainage and utilization: ArcelorMittal coal mines, Karaganda Coal Basin, Kazakhstan (EPA CMOP\_AM\_Kazakhstan\_Prefeas). Global Methane Initiative. [https://www.globalmethane.org/documents/epa\\_cmop\\_am\\_kazakhstan\\_prefeas.pdf](https://www.globalmethane.org/documents/epa_cmop_am_kazakhstan_prefeas.pdf)

Wabinyai, F. R., Sserunjogi, R., Lubisia, G., Okure, D., Akugizibwe, E., Kutesakwe, J., Nshimye, A., & Ndyabakira, A. (2026). Multilinear regression analysis of PM<sub>2.5</sub> in Kampala and Fort Portal cities: Effects of meteorological factors and lagged pollution. *Atmospheric Environment*, X, 29, 100411. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100411>

Wang, X., Wei, W., Cheng, S., Li, J., Zhang, H., & Lv, Z. (2018). Characteristics and classification of PM<sub>2.5</sub> pollution episodes in Beijing from 2013 to 2015. *Science of the Total Environment*, 612, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.206>

Wang, X., Zhang, H., Fan, Z., & Ding, H. (2025). Research on the impact of land use and meteorological factors on the spatial distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> concentration. *Atmospheric Pollution Research*, 16(5), 102462. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102462>

Wei, L., & Sobrino, J. (2025). The spatiotemporal variations of PM<sub>2.5</sub> concentration and its relationship with meteorological parameters: A multi scale analysis in Madrid and Valencia, Spain. *Atmospheric Research*, 323, 108167. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108167>

Zhang, P., Su, H., Wang, Z., Zhang, Y., & Zhong, L. (2020). Characteristics of the atmospheric boundary layer and its relation with PM<sub>2.5</sub> during haze episodes in winter in the North China Plain. *Atmospheric Environment*, 223, 117265. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117265>

#### **Information about the authors:**

*Gulden Ormanova – PhD, PI of the project, Senior researcher, National Laboratory Astana (NLA), Nazarbayev University, “TEQNOVATE” LLC (Astana, Kazakhstan, e-mail: gulden.ormanova@nu.edu.kz).*

*Aruzhan Rakhimberdina – MSc student, School of Artificial Intelligence and Data Science, Astana IT University (Astana, Kazakhstan, e-mail: 242923@astanait.edu.kz).*

*Alexey Alexeyev – Head of the Laboratory, National Centre Occupational Health and Diseases NJSC (Karaganda, Kazakhstan, e-mail: alexeyev.ncgtpz@mail.ru).*

*Kyran Kassym – Junior researcher, National Laboratory Astana (NLA), Nazarbayev University, (Astana, Kazakhstan, e-mail: kyran.kassym@nu.edu.kz).*

*Dhawal Shah – Associate Professor, Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering and Digital Sciences, Nazarbayev University (Astana, Kazakhstan, e-mail: dhawal.shah@nu.edu.kz).*

*Nurxat Nuraje – Professor, Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering and Digital Sciences, Nazarbayev University, “TEQNOVATE” LLC (Astana, Kazakhstan, e-mail: nurxat.nuraje@nu.edu.kz).*

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

*Гүлден Орманова – PhD, жоба жетекшісі (PI), аға ғылыми қызметкер, National Laboratory Astana (NLA), Nazarbayev University, ЖШС “TEQNOVATE” (Астана, Қазақстан, e-mail: gulden.ormanova@nu.edu.kz).*

*Аружан Рахымбердина – Магистрант, Жасанды интеллект және деректер ғылымы мектебі, Astana IT University (Астана, Қазақстан, e-mail: 242923@astanait.edu.kz).*

*Алексей Алексеев – Зертхана меңгерушісі, «Ұлттық еңбек гигиенасы және аурулар орталығы» АҚ (Қарағанды, Қазақстан, e-mail: alexeyev.ncgtpz@mail.ru).*

*Қыран Қасым – Кіші ғылыми қызметкер, National Laboratory Astana (NLA), Nazarbayev University (Астана, Қазақстан, e-mail: kyran.kassym@nu.edu.kz).*

*Шах Дхавал – Қауымдастырылған профессор, Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering and Digital Sciences, Nazarbayev University (Астана, Қазақстан, e-mail: dhawal.shah@nu.edu.kz).*

*Нуршат Нұраже – Профессор, Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering and Digital Sciences, Nazarbayev University, National Laboratory Astana (NLA), ЖШС “TEQNOVATE” (Астана, Қазақстан, e-mail: nurxat.nuraje@nu.edu.kz).*

**Сведения об авторах:**

Гулден Орманова – PhD, руководитель проекта (PI), старший научный сотрудник, National Laboratory Astana (NLA), Nazarbayev University, TOO «TEQNOVATE» (Астана, Казахстан, e-mail: gulden.ormanova@nu.edu.kz).

Аружан Рахимбердина – магистрант, Школа искусственного интеллекта и наук о данных, Astana IT University (Астана, Казахстан, e-mail: 242923@astanait.edu.kz).

Алексей Алексеев – заведующий лабораторией, НАО «Национальный центр гигиены труда и профессиональных заболеваний» (Караганды, Казахстан, e-mail: alexeyev.ncgtpz@mail.ru).

Кыран Касым – младший научный сотрудник, National Laboratory Astana (NLA), Nazarbayev University (Астана, Казахстан, e-mail: kyran.kassym@nu.edu.kz).

Шах Джавал – ассоциированный профессор, Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering and Digital Sciences (Астана, Казахстан, e-mail: dhawal.shah@nu.edu.kz).

Нурият Нуражи – профессор, Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering and Digital Sciences, Nazarbayev University, National Laboratory Astana (NLA), TOO «TEQNOVATE» (Астана, Казахстан, e-mail: nurxat.nuraje@nu.edu.kz).

Келін түсті 19 ақпан 2026 жыл  
Қабылданды 30 наурыз 2026 жыл

2-бөлім  
**ҚОРШАҒАН ОРТА ЛАСТАУШЫЛАРЫНЫҢ  
БИОТАҒА ЖӘНЕ ТҮРҒЫНДАР  
ДЕНСАУЛЫҒЫНА ӘСЕРІН БАҒАЛАУ**

---

Section 2  
**ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL  
POLLUTION ON BIOTA AND HEALTH**

---

Раздел 2  
**ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЯ  
ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
НА БИОТУ И ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ**

Д.К. Аденова<sup>1\*</sup>, Н.Е. Сабурова<sup>2</sup>, Е.В. Сотников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет

им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

\*e-mail: adenovadinara@gmail.com

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛИНЗ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ЦЕЛЮ ОБОСНОВАНИЯ СОЗДАНИЯ ВОДОПОЙНЫХ ПУНКТОВ НА УЧАСТКАХ ОТГОННОГО ЖИВОТНОВОДСТВА

В статье рассматриваются гидрогеологические условия формирования и пространственно-временной динамики линз пресных подземных вод в песчаных массивах Атырауской и Западно-Казахстанской областей. Обосновывается возможность целенаправленного использования подбарханных линз пресных подземных вод для обводнения пастбищ и питьевого водоснабжения. Установлено, что при определённых почвенно-гидрогеологических и климатических условиях такие линзы способны обеспечить устойчивое водоснабжение стандартных участков отгонного животноводства. Предлагается методика рациональной эксплуатации подбарханных линз пресных подземных вод, плавающей на зональных водах, основанная на применении щадящего способа водоотбора, позволяющего осуществлять длительную эксплуатацию без ухудшения качества подземных вод.

Выполненное исследование природных условий, гидрогеологических характеристик песчаных массивов и обобщение имеющихся научных материалов свидетельствуют о высокой перспективности целенаправленного освоения линзы пресных подземных вод на территории Западного Казахстана. Предлагаемый подход является принципиально новым комплексным решением задачи водообеспечения отгонного животноводства и обладает существенным социально-экономическим потенциалом за счёт вовлечения в хозяйственный оборот локальных водных ресурсов.

Показано, что применение авторского метода щадящей эксплуатации обеспечивает сохранение гидродинамического равновесия линзы, предотвращает подтягивание подстилающих минерализованных зональных вод и снижает риск заиливания фильтровой зоны скважин.

**Ключевые слова:** линзы подземных вод, песчаные массивы, обводнение пастбищ, минерализация.

D.K. Adenova<sup>1\*</sup>, N.E. Saburova<sup>2</sup>, E.V. Sotnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Hydrogeology and Geoecology named after U.M. Akhmedsafin, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: adenovadinara@gmail.com

### Hydrogeological conditions of formation and distribution of fresh groundwater lenses to justify the creation of watering points in livestock transmission sites

This article examines the hydrogeological conditions of formation and spatiotemporal dynamics of fresh groundwater lenses in sandy massifs of the Atyrau and West Kazakhstan regions. The feasibility of targeted use of sub-dune lenses of fresh groundwater for pasture irrigation and drinking water supply is substantiated. It is established that, under certain soil, hydrogeological, and climatic conditions, such lenses are capable of providing a stable water supply for standard transhumance areas. A method for the rational exploitation of sub-dune lenses of fresh groundwater floating on zonal waters is proposed. This method utilizes a gentle water extraction method, allowing for long-term operation without degrading groundwater quality.

A study of the natural conditions, hydrogeological characteristics of sand massifs, and a summary of available scientific data demonstrate the high potential for targeted development of the fresh groundwater lens in Western Kazakhstan. The proposed approach represents a fundamentally new, comprehensive solution to the problem of water supply for transhumance and offers significant socioeconomic potential by integrating local water resources into economic circulation.

It has been shown that the use of the author's method of gentle operation ensures the preservation of the hydrodynamic equilibrium of the lens, prevents the drawing in of underlying mineralized zonal waters and reduces the risk of siltation of the filter zone of wells.

**Keywords:** groundwater lenses, sand massifs, pasture irrigation, mineralization.

Д.К. Аденова<sup>1\*</sup>, Н.Е. Сабурова<sup>2</sup>, Е.В. Сотников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>У.М. Ахмедсафин атындағы гидрогеология және геоэкология институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

\* e-mail: adenovadinara@gmail.com

### Мал шаруашылығы алқаптарында суарту пункттерін құруды негіздеу үшін тұщы жерасты су линзаларының қалыптасуы мен таралуының гидрогеологиялық жағдайлары

Мақалада Атырау және Батыс Қазақстан облыстарының құмды массивтеріндегі тұщы жерасты суларының линзаларының гидрогеологиялық қалыптасу жағдайлары және кеңістік-уақыт динамикасы қарастырылады. Жайылымдарды суару және ауыз сумен жабдықтау үшін тұщы жерасты суларының құм астындағы линзаларын мақсатты пайдалану мүмкіндігі негізделген. Белгілі бір топырақ, гидрогеологиялық және климаттық жағдайларда мұндай линзалар стандартты мал шаруашылығы аймақтарын тұрақты сумен жабдықтауды қамтамасыз ете алатыны анықталды. Аймақтық суларда қалқып жүрген тұщы жерасты суларының құм астындағы линзаларын ұтымды пайдалану әдісі ұсынылды. Бұл әдіс жерасты суларының сапасын төмендетпей ұзақ мерзімді пайдалануға мүмкіндік беретін жұмсақ су алу әдісін қолданады.

Құм массивтерінің табиғи жағдайларын, гидрогеологиялық сипаттамаларын зерттеу және қолжетімді ғылыми деректердің қысқаша мазмұны Батыс Қазақстандағы тұщы жерасты суларының нысаналы дамуының жоғары әлеуетін көрсетеді. Ұсынылған тәсіл шалғай мал шаруашылығын сумен жабдықтау мәселесіне түбегейлі жаңа, кешенді шешім болып табылады және жергілікті су ресурстарын экономикалық айналымға біріктіру арқылы айтарлықтай әлеуметтік-экономикалық әлеует ұсынады.

Автордың жұмсақ жұмыс әдісін қолдану линзаның гидродинамикалық тепе-теңдігін сақтауды қамтамасыз ететіні, астындағы минералданған аймақтық сулардың тартылуына жол бермейтіні және ұңғымалардың сүзгі аймағының лайлану қаупін азайтатыны көрсетілген.

**Түйін сөздер:** жерасты суларының линзалары, құмды массивтер, жайылымдарды суару, минералдану.

## Введение

Линзы пресных подземных вод относятся к особому типу геофильтрационного потока, который характеризуется существенным проявлением взаимодействия пресных и соленых вод. Особый интерес к исследованию линз пресных подземных вод обуславливается тем, что они зачастую являются единственными источниками хозяйственно-питьевого водоснабжения территорий с аридным и полуаридным климатом (Kunin, 1963; Absametov et al., 2017; Maksimov, 1967).

Фундаментальные представления об условиях формирования и эксплуатации линз пресных подземных вод содержатся в работах В.Н. Кунина, В.Д. Бабушкина, Д.М. Каца, Н.И. Плотникова, В.М. Шестакова, С.Ш. Мирзаева, Н.Н. Ходжибаева, Н. Г. Шевченко, А. А. Акрамова, и других исследователей.

В пределах песчаных пустынь широко распространены высокоминерализованные грунтовые воды. Пресные воды отмечаются на от-

дельных участках в верхней части водоносного горизонта и залегают в виде линз, плавающих на соленых грунтовых водах. Характерной особенностью пустынь является то, что и пресные и соленые воды находятся в одном водоносном горизонте и не имеют разграничивающего их водоупора (Kunin, 1959; Ahmedsafin, 1950; Petrov, 1960; Davydov, 1962).

Условия залегания и распространения грунтовых вод в песчаных пустынях выделено три типа линз пресных вод: подтакырные (или такырные), предгорные (или линзы бассейнов сухих логов) и подпесчаные.

Песчаные массивы Атырауской и Западно-Казахстанской областей занимают значительные площади и традиционно используются в качестве пастбищ для отгонного животноводства. Эти территории обладают высоким потенциалом для производства экологически чистой животноводческой продукции, однако их хозяйственное освоение существенно ограничено дефицитом пресных вод. Отсутствие современ-

ных, адаптированных к природным условиям региона систем водоснабжения является основным сдерживающим фактором развития отрасли (Shevchenko, 1959; Plotnikov et al., 1978; Alekin, 1953; Sotnikov, 1971).

Результаты ранее проведённых гидрогеологических исследований свидетельствуют о наличии линз пресных подземных вод под естественными незакрепленными барханами. Формирование таких линз обусловлено инфильтрацией атмосферных осадков, конденсационными процессами и отсутствием транспирации влаги растительным покровом. Вместе с тем малая мощность линз и их локальный характер ограничивали возможности практического использования, что приводило к быстрому засолению традиционных колодцев при интенсивном водоотборе (Ahmedsafin, 1950; Petrov, 1960; Davydov, 1962).

В то же время эмпирический опыт местных животноводов показывает, что создание техногенных незакрепленных барханов путем интенсивного выпаса и вытаптывания способствует формированию пресных подземных вод, пригодных для водопоя скота. Несмотря на это, до настоящего времени отсутствует научно обоснованная модель формирования, развития и рациональной эксплуатации таких техногенных линз (Davydov, 1962; Shevchenko, 1959; Plotnikov et al., 1978).

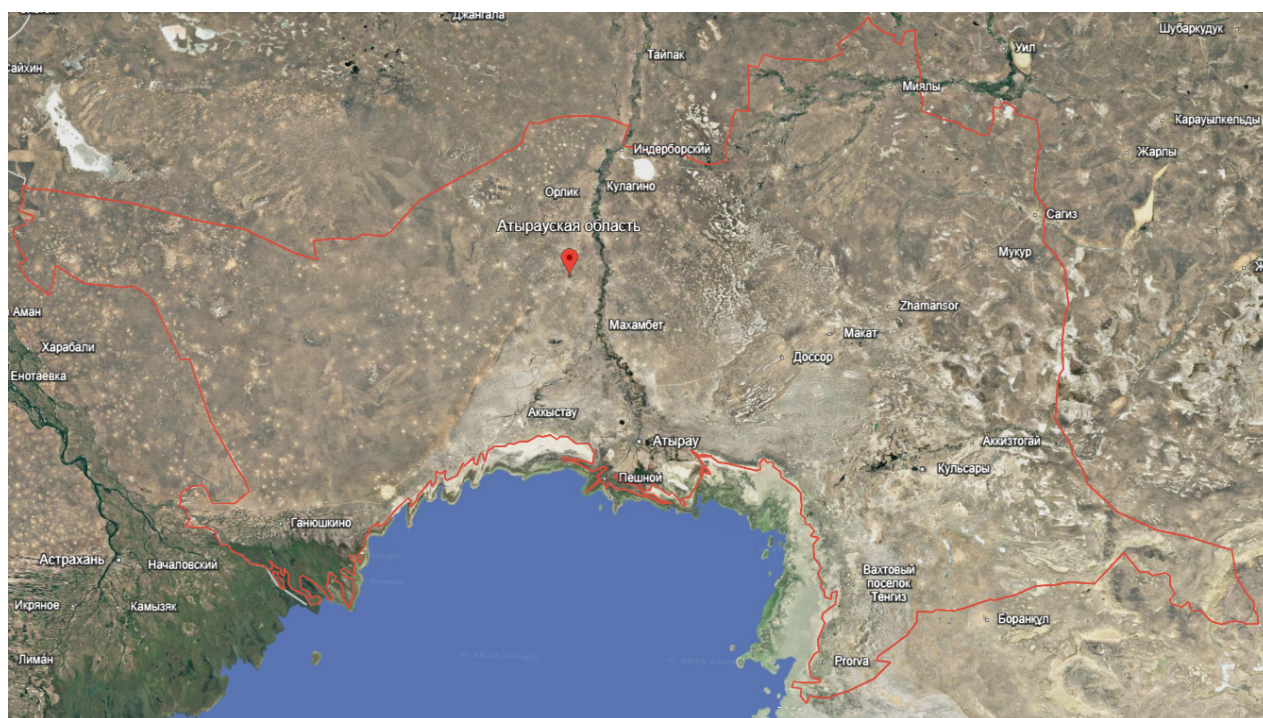
Целью настоящего исследования является обоснование возможности целенаправленного формирования техногенных линз пресных подземных вод и разработка научно обоснованных рекомендаций по их использованию для создания водопойных пунктов на участках отгонного животноводства, также выявление гидрогеологических условий формирования линз пресных подземных вод и обоснование методики их рациональной эксплуатации на основе щадящего водоотбора.

### *Природно-гидрогеологические условия района исследований*

Район исследований приурочен к песчаным массивам западной части Казахстана, характеризующимся резко континентальным и засушливым климатом. Среднегодовое количество атмосферных осадков составляет 120-180 мм, основная их часть выпадает в холодный период года. Испаряемость значительно превышает количество осадков, что обуславливает общее аридное водохозяйственное состояние территории (рис.1).

**Рисунок 1**

*Условия формирования подбарханных линз*



В геологическом разрезе песчаных массивов преобладают эоловые и аллювиально-эоловые отложения, представленные мелко- и среднезернистыми песками с высокой фильтрационной способностью. Подстилающие породы, как правило, сложены суглинками и глинами, выполняющими роль относительного водоупора и способствующими аккумуляции инфильтрационных вод в виде локальных линз (Alekin, 1953; Sotnikov, 1971).

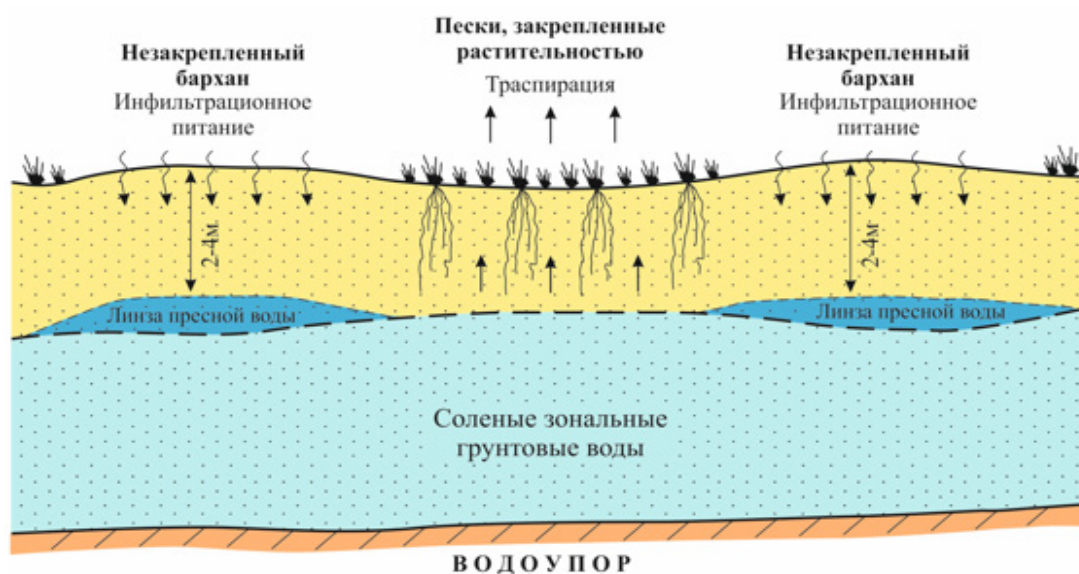
Подземные воды региона в основном солёные и рассольные. Пресные воды имеют ограниченное распространение и приурочены к подбарханым зонам, где формируются линзы малой мощности (обычно до 1,0-2,0 м), отличающиеся высокой чувствительностью к режиму водоотбора (рис.2).

Развитие барханных перевеянных песков на отдельных участках распространения морских

отложений (Тайсойган, Сайхин, Орда и др.) создает благоприятные условия для формирования пресных и слабосоленоватых подземных вод, залегающих в виде линз, на соленых водах. Мощности их различны от 1,5 до 15-40 м, а площади – от первых сотен квадратных метров до 11-850 км<sup>2</sup>. С глубиной минерализация вод в линзах возрастает, и лишь в редких случаях водоносные линзы на всю мощность содержат пресные и слабосоленоватые воды. Наиболее крупные линзы выделены на песчаном массиве Тайсойган и в междуречье Жайык-Волга. Особого внимания заслуживает юго-западная часть рассматриваемого бассейна (пески Нарын), где развиты крупные линзы сульфатно-гидрокарбонатных и сульфатных натриевых грунтовых вод с минерализацией до 1 г/л (Kacimov & Obnosov, 2019; Zhou et al., 2021; Hassan et al., 2019; Tang & Yan, 2021).

**Рисунок 2**

*Условия формирования подбарханных линз*



Большая доступность использования подземных вод без применения сложных технических средств, позволяет использовать подземные воды Северного Прикаспия для удовлетворения потребностей сельских на-

селенных пунктов и животноводческих хозяйств на участках развития пресных, слабосоленоватых и соленоватых подземных вод (Sun et al., 2023; Tang et al., 2024; Thissen et al., 2025).

### Материалы и методы исследования

Исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе осуществлялся сбор, обобщение и анализ материалов ранее выполненных гидрогеологических работ, данных дистанционного зондирования Земли и климатических характеристик региона. На основе анализа раз-

рабатывались критерии выбора наиболее перспективного участка для организации водоснабжения (рис.3).

В полевые работы входило рекогносцировочное обследование территории и выбор участка в пределах песчаного массива, используемого для отгонного животноводства. На участке было пробурено 5 скважин глубиной 4,67-4,75 м.

**Рисунок 3**

*Выезд на полевые работы в пределах песчаных массивов*



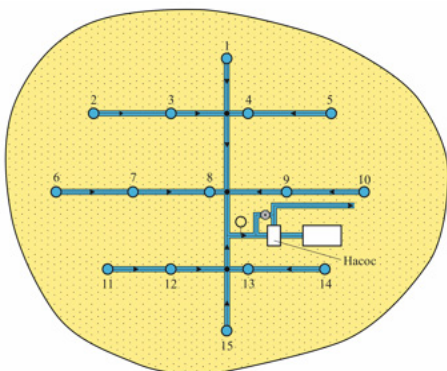
**Рисунок 4**

*Бурение гидрогеологических скважин вручную*



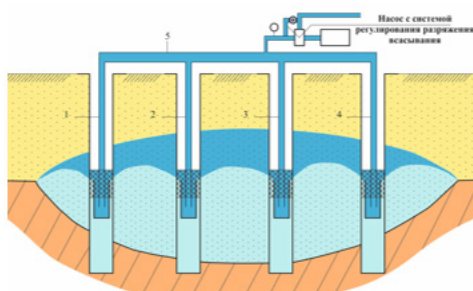
**Рисунок 5**

*Принципиальная схема расположения скважин для эксплуатации маломощной пресной линзы*



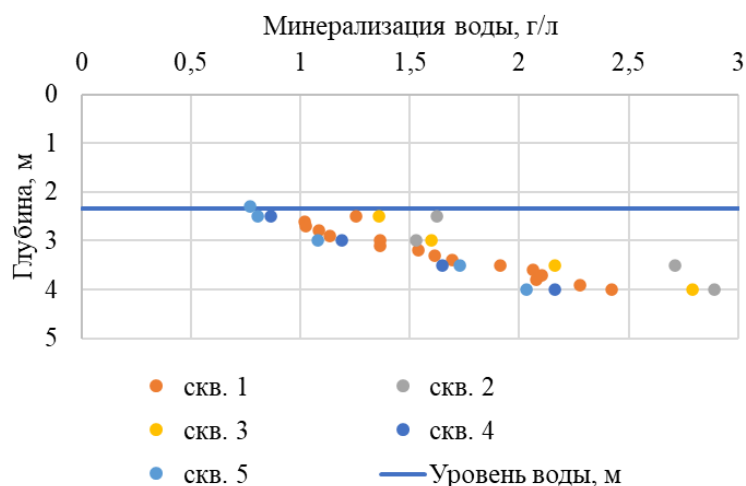
**Рисунок 6**

*Принципиальная схема работы водозабора*



**Рисунок 7**

*График изменения минерализации подземных вод*



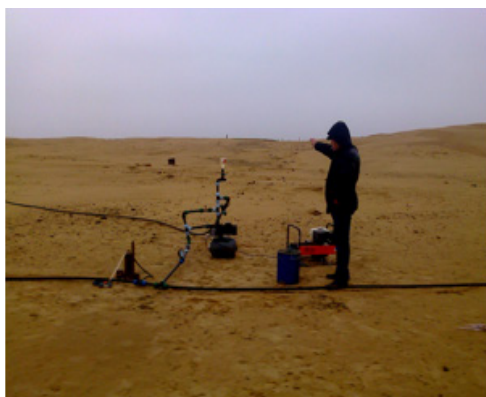
Скважины оборудованы обсадной трубой диаметром 32 мм.

Откачку проводили ступенчатым способом с использованием ручного насоса, основным принципом которого было понижение уровня

воды не более чем на 0,5-1,0 м; чередование периодов откачки и восстановления уровня. Продолжительность одного цикла откачки составлял 20-40 минут с последующим восстановлением уровня до 80-90 % от статического (рис.7-8).

**Рисунок 8**

*Откачка пресной воды из скважин*



Разработанная методика откачки воды из скважин ручного бурения, адаптированная к условиям песчаных массивов и линз пресных подземных вод, обеспечивает возможность их длительной и устойчивой эксплуатации. Использование расчетных параметров дебита и коэффициента фильтрации позволяет повысить

обоснованность проектных решений при создании водопойных пунктов и локальных источников водоснабжения.

***Способ эксплуатации маломощных линз пресных вод***

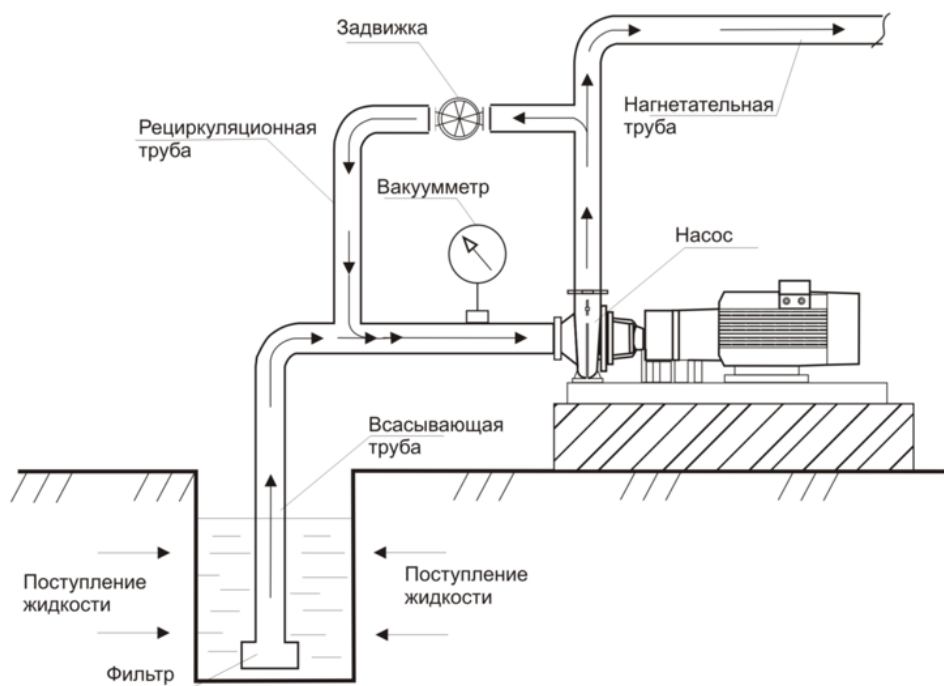
Для отдельной добычи пресной воды из ма-

ломощной водоносной толщи предложена конструкция водозаборной скважины. Способ основан на регулировании разряжения, создаваемого насосом, путём изменения объёма рециркуляции жидкости и предусматривает формирование регулируемого разряжения во всасывающей трубе насоса, за счёт которого осуществляется подъём жидкости.

Отличительной особенностью способа является регулирование уровня разряжения за счёт изменения количества рециркулирующей жидкости, подаваемой во всасывающую трубу насоса. Регулирование осуществляется задвижкой, установленной в замкнутом контуре трубопровода между нагнетательной и всасывающей трубами насоса (рис.9).

**Рисунок 9**

*Способ откачки пресной воды из малопродуктивных линз с помощью скважин*



### Результаты и их обсуждение

Известно, что значительные по площади песчаные массивы Атырауской и Западно-Казакстанской областей обладают высоким потенциалом для организации участков отгонного животноводства и производства существенных объёмов экологически чистой животноводческой продукции. Однако основным фактором, сдерживающим их широкое хозяйственное освоение, остаётся отсутствие современных и научно обоснованных систем водоотбора и водоснабжения, адаптированных к специфическим природным условиям аридного региона.

Результаты ранее проведённых гидрогеологических исследований убедительно свидетельствуют о наличии линз пресных подземных вод на естественных участках распространения

незакреплённых барханов. Вместе с тем, практическое использование этих водных ресурсов в течение длительного времени ограничивалось эксплуатацией неглубоких малодебитных колодцев. Интенсивный водоотбор из таких источников, как правило, приводил к быстрому истощению линзы, подтягиванию минерализованных зональных вод и последующему засолению добываемой воды, что существенно снижало устойчивость водоснабжения.

В ходе анализа полевых наблюдений и практики установлено, что местные животноводы на протяжении длительного времени фактически формируют техногенные незакреплённые барханы путём интенсивного выпаса и вытаптывания растительности на отдельных участках песчаных массивов. В дальнейшем именно в пределах таких участков происходит накопление инфильт-

традиционных вод и формирование подбарханных линз пресных подземных вод, которые используются для водопоя скота.

Несмотря на очевидную практическую значимость данного явления, научно обоснованные представления о динамике формирования, пространственном развитии и устойчивости техногенных подбарханных линз в настоящее время отсутствуют. В доступных литературных источниках и отчётных материалах не выявлены результаты комплексных исследований, охватывающих полный цикл: от целенаправленного создания техногенного незакреплённого бархана до организации мониторинговых наблюдений за формированием пресной линзы во времени и пространстве, оценки её естественных запасов и ресурсов, а также разработки конкретных рекомендаций по рациональной эксплуатации подземных вод.

Проведённый анализ и накопленный опыт использования маломощных подбарханных линз показывают, что они достаточны для обеспечения устойчивого водоотбора, ориентированного на нужды водопоя скота, без риска деградации линзы и ухудшения качества воды. Это позволяет рассматривать целенаправленное использование подбарханных линз как перспективное направление решения проблемы водообеспечения отгонного животноводства в аридных районах.

### Заключение

Проведённый анализ природных условий, гидрогеологических особенностей песчаных массивов и существующих научных данных позволяет сделать вывод о перспективности целенаправленного использования подбарханных линз пресных подземных вод в условиях Западного Казахстана. Предлагаемый подход представляет собой принципиально новое комплексное решение проблемы водообеспечения

отгонного животноводства и характеризуется выраженным социально-экономическим эффектом за счёт вовлечения в хозяйственное использование локальных водных ресурсов.

Показано, что применение авторского метода щадящей эксплуатации обеспечивает сохранение гидродинамического равновесия линзы, предотвращает подтягивание подстилающих минерализованных зональных вод и снижает риск заиливания фильтровой зоны скважин. Обоснованная схема может служить расчётной основой для использования линз пресных подземных вод для водопоя скота и питьевого водоснабжения в Западном Казахстане.

Результаты выполненного исследования могут быть использованы при разработке региональных программ рационального использования пастбищных ресурсов, проектировании водопойных пунктов и реализации мероприятий по устойчивому развитию животноводства в аридных районах Западного Казахстана.

### Финансирование (вставить)

Статья подготовлена в рамках проекта BR24992885 «Научно-практическое обоснование устойчивого развития отечественного животноводства на основе обводнения пастбищных территорий подземными водами».

### Вклад авторов

*Сотников Е.В.: разработка концепции, методология, научное руководство, управление проектом, редактирование и доработка рукописи.*

*Аденова Д.К.: разработка концепции, научное руководство, редактирование и доработка рукописи.*

*Сабурова Н.Е.: проведение исследования, сбор и обработка данных, валидация данных, редактирование и доработка рукописи*

### Литература

- Thissen, L., Greskowiak, J., & Massmann, G. (2025). Climate change effects on freshwater lenses. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 61, 102676. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102676>
- Tang, Y., Lu, C., & Luo, J. (2024). Optimizing groundwater pumping in island lenses. *Journal of Hydrology*, 629, 130579. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130579>
- Sun, D., Wang, M., & Feng, P. (2023). Numerical simulation for strip-island freshwater lenses. *Journal of Contaminant Hydrology*, 259, 104242. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104242>
- Tang, Y., & Yan, M. (2021). Experimental and modeling investigation of pumping from a freshwater groundwater lens. *Journal of Hydrology*, 602, 126734. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126734>
- Hassan, A., Sultan, M., & Valdes, G. (2019). Impact of climate variability on groundwater recharge in arid regions. *Journal of Arid Environments*, 162, 1–10.

Zhou, Y., Shrestha, S., & Babel, M. S. (2021). Groundwater sustainability under climate change in Central Asia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110418.

Kacimov, A. R., & Obnosov, Y. V. (2019). Analytic solutions for freshwater groundwater lenses floating on saline water under desert dunes. *Journal of Hydrology*, 574, 733–743. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.065>

Sotnikov, A. V. (Ed.). (1971). *Hydrogeology of the USSR: Western Kazakhstan (Vol. 35)*. Academy of Sciences of the USSR.

Alekin, O. A. (1953). *Fundamentals of hydrochemistry*. GIMIZ.

Plotnikov, N. I., Plotnikov, N. A., & Sychev, K. I. (1978). *Hydrogeological basis of artificial recharge of groundwater*. Nedra.

Shevchenko, N. G. (1959). Search for freshwater lenses in sandy relief using geomorphological indicators. *Academy of Sciences of the USSR*.

Davydov, I. Ya. (1962). Some conditions for the formation of fresh groundwater in sandy deserts. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Turkmen SSR*.

Petrov, M. P. (1960). Water regime of dune sands and thermal conditions of moisture condensation in the Karakum. *Academy of Sciences of the USSR*.

Ahmedsafin, U. M. (1950). On the regime of groundwater in sandy deserts. *Proceedings of the Academy of Sciences of the KazSSR*.

Kunin, V. N. (1959). Local waters of deserts and their use. *Academy of Sciences of the USSR*.

Maksimov, V. D. (1967). *Reference guide for hydrogeologists (Vol. 1)*. Nedra.

Absametov, M. K., Mukhamedzhanov, M. A., Sydykov, Zh. S., & Murtazin, E. Zh. (2017). Groundwater of Kazakhstan as a strategic resource of water security. *Almaty*.

Kunin, V. N. (Ed.). (1963). *Freshwater lenses of deserts: Methods of research, resource assessment, and exploitation*. *Academy of Sciences of the USSR*.

**Сведения об авторах:**

*Аденова Динара Кийзбаевна – доктор PhD, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования гидрогеологических и геоэкологических процессов Института гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина (Алматы, Казахстан, e-mail: adenovadinara@gmail.com).*

*Сабурова Нургүл Едігеевна – докторант КазННТУ им. К.И. Сәтпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: n.saburova@aggvoda.kz).*

*Сотников Евгений Владимирович – заведующий лабораторией моделирования гидрогеологических и геоэкологических процессов Института гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина (Алматы, Казахстан, e-mail: sotnikov\_yevgeniy@mail.ru).*

**Information about the authors:**

*Adenova Dinara Kizbayevna – PhD, Leading Researcher, Laboratory for Modeling Hydrogeological and Geoecological Processes, U.M. Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Geoecology (Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: adenovadinara@gmail.com).*

*Saburova Nurgul Edigeevna – doctoral student at KazNRTU named after. K.I. Satpayeva (Almaty, Kazakhstan, e-mail: n.saburova@aggvoda.kz).*

*Sotnikov Evgeniy Vladimirovich – Head of the Laboratory for Modeling Hydrogeological and Geoecological Processes, U.M. Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Geoecology (Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: sotnikov\_yevgeniy@mail.ru).*

**Авторлар туралы мәлімет:**

*Аденова Динара Кийзбайқызы – PhD, У.М. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институтының Гидрогеологиялық және геоэкологиялық процестерді модельдеу зертханасының жетекші ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан Республикасы, e-mail: adenovadinara@gmail.com).*

*Сабурова Нүргүл Едігееқызы – Қ.И. Сәтпаева атындағы ҚазҰТЗУ докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: n.saburova@aggvoda.kz).*

*Сотников Евгений Владимирович – У.М. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институтының Гидрогеологиялық және геоэкологиялық процестерді модельдеу зертханасының меңгерушісі (Алматы, Қазақстан, e-mail: sotnikov\_yevgeniy@mail.ru).*

*Поступила 19 января 2026 года*

*Принята 25 марта 2026 года*

3-бөлім  
**БИОЛОГИЯЛЫҚ  
АЛУАНТҮРЛІКТІ САҚТАУДЫҢ  
ӨЗЕКТІ МӘСЕЛЕЛЕРІ**

---

Section 3  
**ACTUAL PROBLEMS  
OF BIODIVERSITY CONSERVATION**

---

Раздел 3  
**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
СОХРАНЕНИЯ  
БИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ**

А.К. Тоқтыбай<sup>1</sup>, Д. Салауат<sup>1</sup>, К. Болатхан<sup>1</sup>,  
С.К. Сандыбаева<sup>1</sup>, Г.А. Ахметова<sup>1</sup>, Ә.Қ. Құрметхан<sup>1</sup>,  
С.С. Санатов<sup>1</sup>, Р. Hrouzek<sup>2</sup>, Б.К. Заядан<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Чехия Ғылым Академиясының микробиология институты, Алгатец орталығы, Требонь, Чехия

\*e-mail: zbolatkhan@gmail.com

## БАЛҚАШ КӨЛІНІҢ ТҰЗДЫ БӨЛІГІНІҢ АЛЬГОФЛОРА ҚҰРАМЫН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ФОТОТРОФТЫ МИКРООРГАНИЗМДЕРДІҢ АКСЕНИКАЛЫҚ ДАҚЫЛДАРЫН БӨЛІП АЛУ

Бұл жұмыста Балқаш көлінің тұзды бөлігінің альгофлорасының түрлік құрамы анықталып, келешегі мол микробалдырлар мен цианобактериялардың жаңа дақылдары бөлініп алынып, олардың морфологиялық, дақылдық және физиологиялық қасиеттері зерттелді. Талдау нәтижесінде Балқаштың шығыс жағалауынан алынған су сынамааларының альгофлора құрамында диатомды балдырлар (*Bacillariophyta*) 40,33%, жасыл балдырлар (*Chlorophyta*) 32%, көк-жасыл балдырлар (*Cyanophyta*) 19,33% және эвгленалық балдырлар (*Euglenophyta*) 8,33% құрады. Олар 4 бөлімге, 6 классқа, 6 қатарға, 11 тұқымдасқа және 22 туысқа жататындығы анықталды. Микробиологиялық әдістері негізінде микробалдырлар мен цианобактериялардың 8 аксеникалық таза дақылдары бөлініп алынып, олар *Oscillatoria sp.*, *Nostoc sp.*, *Arthrospira sp.*, *Anabaena sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Parachlorella kessleri*, *Dunaliella salina*, *Navicula sp.* болып анықталды. Әр дақыл үшін өсірудің оңтайлы жағдайлары анықталды. Бөлініп алынған цианобактерия дақылдарының өсу қарқындылығы BG-11, Заррука қоректік орталарында рН 7-9 кезінде 28-32°C оптималды температура аралығында байқалды. Ал, бөлініп алынған микробалдыр дақылдары, Тамия, Артария және BG-11 қоректік орталарында рН 6,5-7,5 кезінде 27°C -30°C температура аралығында тиімді өсу көрсеткішін көрсетті. Бұл таза дақылдар өндірістік биотехнологияда, атап айтқанда биологиялық белсенді қоспалар әзірлеуде ерекше қызығушылық тудыратын объект.

**Түйін сөздер:** альгофлора, аксеникалық таза дақылдарды бөлу, микробалдырлар мен цианобактерия дақылдары, тұзды көл.

A.K. Toktybay<sup>1</sup>, D.Salauat<sup>1</sup>, K. Bolatkhan<sup>1</sup>, S.K.Sandybayeva<sup>1</sup>, G.A.Akhmetova<sup>1</sup>,  
A.K. Kurmetkhan<sup>1</sup>, S.S. Sanatov<sup>1</sup>, P. Hrouzek<sup>2</sup> and B.K. Zayadan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Microbiology of the Czech Academy of Sciences, Center Algatech, Trebon, Czech Republic

\*e-mail: zbolatkhan@gmail.com

### Study of the algae composition of the saline parts of lake Balkhash and isolation of axenic cultures of phototrophic microorganisms

The presented work defines the species composition of the algal flora within the saline region of Lake Balkhash and involves isolating novel and promising cultures of microalgae and cyanobacteria, followed by examining their morphological, cultural, and physiological traits. The taken results indicated that the algal flora in water samples from the eastern coast of Balkhash is composed of diatoms (*Bacillariophyta*) at 40.33%, green algae (*Chlorophyta*) at 32%, cyanobacteria (*Cyanophyta*) at 19.33%, and euglenoids (*Euglenophyta*) at 8.33%. The specimens were classified into 4 divisions, 6 classes, 6 orders, 11 families, and 22 genera. Through the application of microbiological techniques, eight axenic pure cultures of microalgae and cyanobacteria were successfully isolated and determined, including *Oscillatoria sp.*, *Nostoc sp.*, *Arthrospira sp.*, *Anabaena sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Parachlorella kessleri*, *Dunaliella salina*, and *Navicula sp.* Optimal cultivation conditions were determined for each strain. The isolated cyanobacterial cultures exhibited the highest growth rate on BG-11 and Zarrouk nutrient media at pH 7-9 and an optimal temperature of 28-32 °C. The isolated microalgae cultures showed effective growth on Tamia, Artaria, and BG-11 nutrient media at pH 6.5-7.5 and a temperature of 27-30 °C. The obtained pure cultures are notably valuable in industrial biotechnology, particularly for the development of biologically active supplements.

**Keywords:** algae, isolation of axenic pure cultures, microalgae and cyanobacteria cultures, saline lake.

А.К. Токтыбай<sup>1\*</sup>, Д. Салауат<sup>1</sup>, К. Болатхан<sup>1</sup>, С.К. Сандыбаева<sup>1</sup>, Г.А. Ахметова<sup>1</sup>,  
Ә.К. Құрметхан<sup>1</sup>, С.С. Санатов<sup>1</sup>, Р. Hrouzek<sup>2</sup>, Б.К. Заядан<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт микробиологии Академии наук Чешской Республики,

Центр Алгатех, Требонь, Чешская Республика

\*e-mail: zbolatkhan@gmail.com

### Изучение состава альгофлоры соленых частей озера Балхаш и выделение аксеничных культур фототрофных микроорганизмов

В данной работе определен видовой состав альгофлоры солёной части озера Балхаш, были выделены новые перспективные культуры микроводорослей и цианобактерий, а также исследованы их морфологические, культуральные и физиологические характеристики. По результатам анализа установлено, что в альгофлоре проб воды, отобранных на восточном побережье Балхаша, диатомовые водоросли (*Bacillariophyta*) составляют 40,33%, зелёные водоросли (*Chlorophyta*) 32%, цианобактерии (*Cyanophyta*) 19,33% и эвгленовые водоросли (*Euglenophyta*) 8,33%. Они были определены как принадлежащие к 4 отделам, 6 классам, 6 рядам, 11 семействам и 22 родам. На основе микробиологических методов были выделены 8 аксенических чистых культур микроводорослей и цианобактерий, были определены как *Oscillatoria sp*, *Nostoc sp*, *Arthrospira sp*, *Anabaena sp*, *Chlorella vulgaris*, *Parachlorella kessleri*, *Dunaliella salina*, *Navicula sp*. Для каждой культуры были определены оптимальные условия культивирования. Выделенные культуры цианобактерий демонстрировали наибольшую скорость роста на питательных средах BG-11 и Заррука при pH 7–9 и оптимальной температуре 28–32 °C. Выделенные культуры микроводорослей показали эффективные показатели роста на питательных средах Тамия, Артария и BG-11 при pH 6,5–7,5 и температуре 27–30 °C. Полученные чистые культуры представляют особый интерес для промышленной биотехнологии, в частности для разработки биологически активных добавок.

**Ключевые слова:** альгофлора, выделение аксенических чистых культур, культуры микроводорослей и цианобактерий, солёное озеро.

### Кіріспе

Балқаш көлі – Орталық Азиядағы Балқаш–Алакөл ойысының батыс бөлігінде, теңіз деңгейінен шамамен 340 м биіктікте орналасқан ең ірі су айдындарының бірі. Көл оңтүстік-батыстан солтүстік-шығыс бағытында созылып жатыр, ұзындығы шамамен 614 км-ге дейін жетеді, ал су деңгейі 342 м болғандағы жалпы ауданы шамамен 16 400 км<sup>2</sup> құрайды. Сарыесік түбегі Балқаш көлін екі бөлікке, тұщы, таяз және кең батыс бөлігіне (Батыс Балқаш), және тұзды, тар және терең шығыс бөлігіне (Шығыс Балқаш) бөледі (Plotnikov et al., 2021).

Батыс бөлігі аумағы жағынан үлкенірек (>10 000 км<sup>2</sup>) және таяз (тереңдігі 11 м-ге дейін), шығыс бөлігі аумағы жағынан кіші (>7 000 км<sup>2</sup>), бірақ тереңірек (26 м-ге дейін). Бұл екі бөлікті ені шамамен 3,5 км және тереңдігі ~3 м болатын Узунарал бұғазы байланыстырады. Көлдің ені де айтарлықтай өзгермелі: батысында 74 км-ге дейін жетсе, ал шығысында 9–19 км аралығында болады (Tashenov & Zhandeldin, 2020). Балқаш көліне құятын бес өзеннің барлығы тауларда қалыптасады. Батыс Балқашқа құятын жалғыз өзен – Іле өзені, оның үлесіне жалпы өзендік ағынның шамамен 80%-ы тиесілі, Шығыс Балқашқа – Қаратал, Ақсу, Лепсі, Аягөз өзендері келіп құяды. Бұл фактор су массаларының тұрақты

бағытталуын – батыстан шығысқа қарай қозғалысын қамтамасыз етеді (Alimkulov et al., 2022).

Көлдің минералдану деңгейі батыстан шығысқа қарай біртіндеп артып, шығыс бөлігінде ең жоғарғы мәндерге жетеді. Көл суының орташа минералдану деңгейі 2,2–2,94 г/л шамасында. Атап айтқанда, Батыс бөлікте минералдану деңгейі төмен (1,1–1,6 г/л), ал шығыс бөлігінде ол 3,3–4,7 г/л-ге дейін артады, кейбір таяз жағалау аймақтарында 6–7 г/л-ге дейін жетеді (Muratkhanov et al., 2024)

Балқаш көлінің шығыс бөлігінде еріген тұздардың (TDS) мөлшері батысқа қарағанда жоғары, ал батыс бөліктің тұщылау болуы Іле өзенінің суы мен булану қарқынына байланысты (Krupa et al., 2020). Батыс аймақта нитраттар, нитриттер, жалпы фосфор, темір, мырыш және мыс көп, ал шығыста фосфаттар, органикалық заттар және ауыр жоғары концентрацияда кездеседі (Barinova et al., 2018; Kozhakhmetov & Baimukanov, 2021).

Жалпы алғанда, зерттеушілердің деректері Балқаш көлінің шығыс бөлігіндегі жоғары минерализация мен қалыпты деңгейдегі ластану фототрофты микроорганизмдердің түрлік құрылымына тікелей әсер ететінін дәлелдейді (Abdullaev et al., 2023). Осы ерекшеліктер шығыс Балқаш акваториясын экстремалды жағдайда тіршілік ететін галофильді және гало-төзімді

балдырларды зерттеу үшін табиғи модель ретінде қарастыруға мүмкіндік береді

Балқаш көлінің альгофлорасы химиялық заттардың мөлшеріне қарай батыстан шығысқа қарай саны және түрлік құрамы бойынша өзгереді, жалпы көлде 350-ден астам микробалдырлар түрлері мен таксондар кездеседі. Негізгі доминант топтарға диатомды балдырлар, жасыл балдырлар және цианобактериялар жатады (Wang et al., 2023).

Жалпы, Балқаш көлінің альгофлорасының құрамын зерттеу жұмыстарында фитопланктон құрамында 92 түр тіркелген: 29 жасыл балдыр, 27 диатом, 21 цианобактерия, сондай-ақ харофиттер, эвгленофиттер, динофиттер бар екені анықталған. Сондай-ақ Батыс бөліктегі экожүйенің тұщы болғандығы түрлік құрамның жоғары болуына (74 түр) көбінесе *Chlorophyta* тобы бар екендігі анықталған, ең жиі кездесетін түрлер – *Peridinium* sp, диатомдық *Cyclotella meneghiniana* Kützing және эвгленалық *Trachelomonas* sp (Baginova et al., 2018). Алайда шығыс бөлікте жоғары минералдануға төзімді микробалдыр мен цианобактериялардың түрлік құрамы нақты зерттелмеген.

Сонымен, Балқаш көлінің шығыс бөлігінің жоғары минералдануы тұздануға бейімделген фототрофты микроорганизмдерді зерттеу үшін маңызды табиғи модель болып табылады. Бұл аймақтағы альгофлораны зерттеу су экожүйесінің экологиялық жағдайын бағалау және биотехнологиялық тұрғыдан құнды дақылдарды анықтау жұмыстың өзектілігі болып табылады.

Зерттеудің мақсаты – көлдің тұзды аймағынан бөлініп алынған микробалдырлар мен цианобактериялардың түрлік құрамын, морфологиялық және физиологиялық ерекшеліктерін зерттеу, және алынған аксеникалық дақылдардың болашақта биотехнология, медицина және биологиялық қоспалар өндірісінде қолданылу потенциалын бағалау.

## Материалдар мен әдістер

### Зерттеу орындары және сынамалар алу

Зерттеу жұмысы Балқаш көлі шығыс бөлігінің тұзды бөлігінде 2024 жылы жаз айында жүргізілді. Зерттеу барысында су сынамалары Балқаш көлі аумағындағы арнайы таңдап алынған үш нүктеден алынды, атап айтқанда, Лепсі (46°20'49" N, 78°19'55" E), Ульги (46.2872° N, 78.3186° E), және Үшкөл (45.61677224320329, 78.10199725592088) (Plotnikov et al., 2021). Су

үлгілері көлдің әртүрлі тереңдік (1-5 м) және әртүрлі тұздану жағдайларында бірнеше нүктелерден алынды, бұл альгофлораның таралуын бағалауға мүмкіндік береді.

Сынамалар алу барысында бірнеше маңызды факторлар есепке алынды, олар судың физико-химиялық көрсеткіштері су температурасы (термометр арқылы), минералдану, және тұздылық деңгейлері, судың рН деңгейі сандық рН-метр (HM Digital PH-80, АҚШ) арқылы потенциалдық әдіспен анықталды (Muzafarov et al., 1988). Үлгілерді алдын ала стерильденген 1 литр көлеміндегі пластикалық бөтелкелер жиналды. Жиналған су үлгілері 0,45 мкм өткізгіш мембраналар арқылы сүзіліп, әрі қарай өңдеу үшін 4°C температурадағы тоңазытқышта сақталды (Russian Institute of Standardization, 2022; Standartinform, 2013). Барлық үлгілер зертханаға жеткізілгеннен кейін микроскопиялық талдау және культуралық өсіру әдістері қолданылып, альгофлораның морфологиялық және культуралық сипаттамалары жасалды.

### Цианобактериялар құрамын анықтау және морфологиялық талдау

Бөлініп алынған су сынамалары зертханалық жағдайда түрлік құрамын анықтау үшін жинақталған үлгілерге микроскопиялық және морфологиялық талдау жүргізілді. Зерттеу Premere және Vetical жарық микроскоптарында ×40–×100 үлкейту аралығында, мониторға шығару мүмкіндігі бар жүйелерде орындалды. Әр үлгіден 5 қайталым бойынша 30–40 микроскопиялық көру өрісі талданды. Алынған мәліметтер негізінде жасушалар саны 1 мл судағы жасушалар саны түрінде есептелді.

Микробалдыр мен цианобактерияларды анықтау жұмыстары нативті (тірі) күйде де, фиксирленген күйде де жүргізілді. Фиксациялау үшін 4% формальдегид ерітіндісі және йодтың Люголь ерітіндісі қолданылды. Микробалдырлар түрлік құрамы Сиренко әдістемесі бойынша анықтағыштармен жүргізілді (Ergashev, 1979; Muzafarov et al., 1988; Tsarenko, 1990). Цианобактериялар мен микробалдырлар, диатомды балдырларды анықтау Jiří Komárek және әріптестерінің *Süßwasserflora von Mitteleuropa: Cyanoprokaryota* сериясындағы заманауи анықтағыштары қолданылды. Таксондардың өзекті атауларын, синонимдерін нақтылауға AlgaeBase дерекқорлары (algaebase.org) қолданылды (Guiry & Guiry, n.d.; Komárek, 2013; Krammer & Lange-Bertalot, 1986–1991; The online database of cyanobacterial genera, n.d.).

### Қоректік ортаға отырғызу

Бөлініп алынған су сынамалары стерильденген колбаларға құйылып, Заррука, BG-11, Громов, Артария, Тамия және 04 сұйық қоректік орталарға егілді. Дақылдар 20–32°C температурада, 2000–5000 лк жарықта, 16:8 фотопериод режимінде, 1–2% CO<sub>2</sub> қосылған аэрациямен өсірілді. Қоректік орталардың рН мәні 5–10 аралығында ұсталды. Үлгілердің 0,1–1 мл суспензиясы сұйық немесе агарланған ортаға енгізіліп, алгологиялық таза дақылдарды алу үшін агарға штрихтап себу, жеке колонияларды қайта таңдау және микроманипуляциялық әдістер қолданылды (*Zayadan et al., 2013*).

### Статистикалық талдау

Кестелер мен суреттерде әрбір көрсеткіш үшін екі-үш қайталаулар және әр қайталауда төрт-бес жазба көрсетілген.  $P \leq 0,05$  мәнін қамтамасыз ету үшін қажетті қайталаулар саны деректердің шашырау дәрежесіне қарай анықталды. Негізгі көрсеткіштер үшін салыстырмалы стандарттық қате 2–5% құрады, ал қосалқы

компоненттер үшін 10%-дан аз болды. Деректер статистикалық өңдеуден өткізіліп, орташа мән ± стандарттық ауытқу ретінде көрсетілді.

### Зерттеу нәтижелері және талқылау

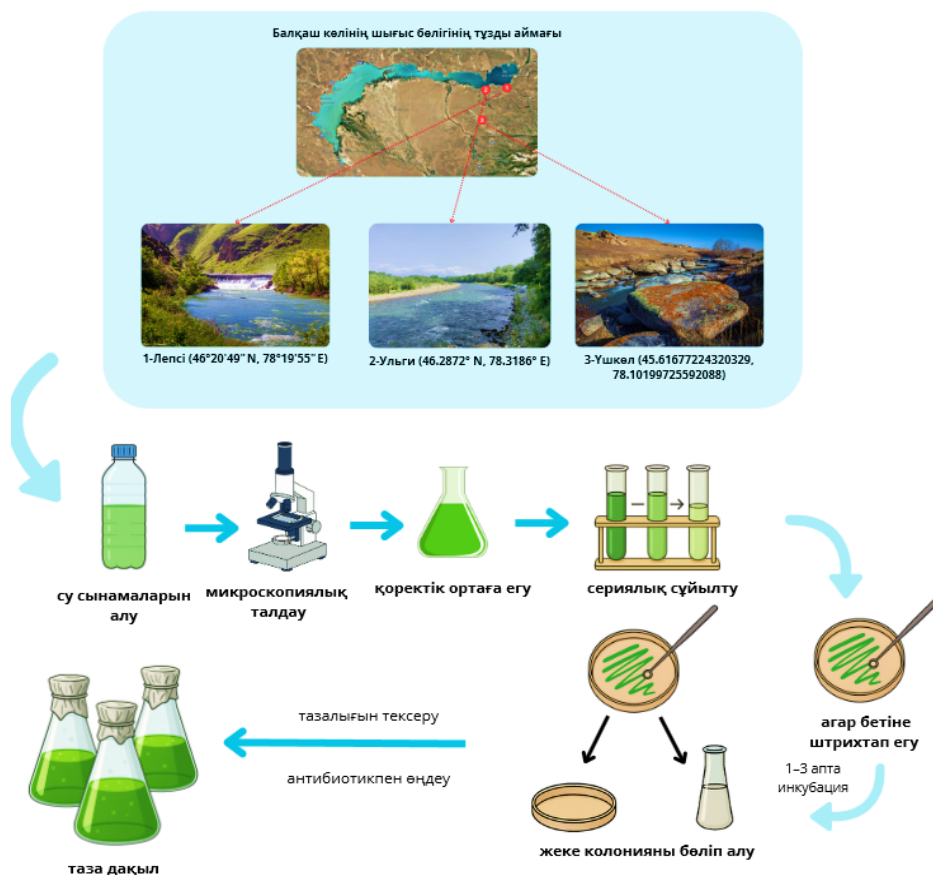
#### Балқаш көлінің тұзды бөлігінің альгофлора құрамы

Балқаш көлінің тұзды бөлігіндегі Лепсі, Ульги, Үшкөл аудандарынан су сынамалары алынды. Су температурасы 24–25°C аралығында, ал рН деңгейі 7,2–8,2 жағдайында болды (сурет 1). Шығыс бөлігінің су температурасы сынама алу уақытында 24–25°C аралығында ауытқыды, ал рН деңгейі 7–9 аралығында болды. Сынама альгофлораның әртүрлілігін анықтау мақсатында әр нүктеде 5–6 түрлі аймақтарынан алынды.

Зерттеу нәтижесі бойынша әртүрлі таксономиялық түрлер анықталды. Балқаш көлінің планктондық альгофлорасы құрамынан микробалдырлардың 48 таксоны анықталды. Олар 4 бөлім, 6 класс, 6 қатар, 11 тұқымдас және 22 туысқа жатады.

1-сурет

Балқаш көлінен су үлгілерін алу орындары (1 – Лепсі, 2 – Ульги, 3 – Үшкөл)



Зерттеу жұмыстары бірінші нүкте Лепсі ауданынан (46°20'49" N, 78°19'55" E) басталды, су температурасы 24°C ал рН деңгейі 7,8 көрсетті. Су сынамалары станцияның әртүрлі аумақтарынан жинап алынынып, микроскопиялық талдау жасалды. Талдау нәтижесі бойынша Лепсі ауданының альгофлорасының негізін (диатомды балдырлар) *Bacillariophyta* өкілдері құрап, жалпы түрлік құрамның 53% құрады, жасыл балдырлар (*Chlorophyta*) 24% құраса, көк-жасыл балдырлар (*Cyanophyta*) 15% , эвгленалық балдырлар (*Euglenophyta*) 8 % құрады. (*Bacillariophyta*) диатомды балдырлар бойынша *Chaetoceros muelleri* Lemm., *Nitzschia closterium* Ehr., *Thalassiosira weissflogii* (Grun.) G.Fryxell & Hasle, *Thalassiosira* sp., *Cyclotella meneghiniana* Kütz., *Cyclotella* sp. *Navicula cryptocephala*, *Chaetoceros* sp, *Entomoneis paludosa* (W. Smith) Reimer, *Fragilaria acus* (Kützing) Lange-Bertalot , *Pinnularia major*, *Pinnularia microstauron*, *Pinnularia subcapitata* түрлері кездесті. Басым түрі *Navicula cryptocephala* болды.

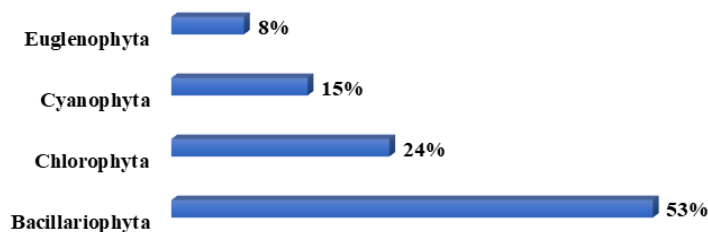
Көк-жасыл балдырлар (*Cyanophyta*) бойынша *Anabaena spiroides*, *Anabaena flosaquae*, *Anabaena constricta*, *Phormidium foveolarum*, *Microcystis* sp, *Chroococcus turgidus* (Kützing)

*Nägeli*, *Oscillatoria brevis*, *Synechocystis*, *Spirulina* sp. кездесті. Басым түрі *Spirulina* sp. болды. Ал, жасыл балдырлар (*Chlorophyta*) бойынша *Chlorococcales* өкілдері кездесті, олар *Ankistrodesmus minutissimus* Korsch, *Chlorella vulgaris* var *vulgaris* Beijerinck, *Coelastrum microporum* Naegeli, *Pediastrum boryanum* *Pediastrum duplex* Meyen var *duplex*, *Dunaliella salina*, *Scenedesmus obliquus* Kuetz var *obliquus*, сонымен бірге *Volvocales* туысына жататын түрлер *Chlamydomonas rubrifilum* Korsch, *Chlamydomonas monadina* Stein кездесті. Басымдық көрсеткен *Dunaliella salina* және *Chlamydomonas rubrifilum* Korsch. Эвгленалық балдырлар өкіліне жататын (*Euglenophyta*) *Euglena viridis*, *Euglena caudata*, *Trachelomonas* sp. түрлері кездесті (сурет 2).

Келесі зерттеу нүктесі Ульги ауданындағы альгофлора құрамы (46.2872° N, 78.3186° E), сынама алу барысында су температурасы 23-24°C аралығында ауытқыды, ал рН деңгейі 7,1 көрсеткішін көрсетті. Бұл деңгей көбіне тұзды және минерализденген су жүйелерінде фототрофты микроорганизмдер үшін, әсіресе диатомдар мен кейбір жасыл балдырлар үшін қолайлы болып келеді.

## 2-сурет

Балқаш көлінің тұзды бөлігі, Лепсі ауданындағы альгофлора құрамының пайыздық көрсеткіші



Талдау нәтижесі бойынша Ульги альгофлорасында жасыл балдырлар (*Chlorophyta*) кездесіп 38% құраса, (*Bacillariophyta*) диатомды балдырлар өкілдері жалпы түрлік құрамның 32% құрады, ал көк-жасыл балдырлар (*Cyanophyta*) 20% көрсеткіш көрсетті, эвгленалық балдырлар (*Euglenophyta*) 10 % құрады.

Жасыл балдырлар (*Chlorophyta*) бойынша *Chlorella vulgaris* var *vulgaris* Beijerinck, *Parachlorella kessleri*, *Coelastrum microporum* Naegeli, *Pediastrum boryanum* Turp Meneghini var *boryanum*, *Pediastrum duplex* Meyen var *duplex*,

*Dunaliella salina*, *Scenedesmus obliquus* Kuetz var *obliquus*, *Volvocales* туысына жататын түрлер *Chlamydomonas rubrifilum* Korsch, кездесті. Басымдық көрсеткен *Dunaliella salina* және *Chlamydomonas* sp. (сурет 3).

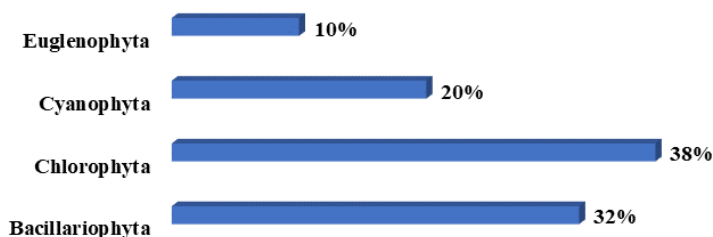
Диатомды балдырлар (*Bacillariophyta*) бойынша *Nitzschia* sp, *Nitzschia closterium* Ehr., *Nitzschia sigmoidea* (Nitzsch) W. Smith, *Thalassiosira weissflogii* (Grun.) G.Fryxell & Hasle, *Thalassiosira* sp., *Cyclotella meneghiniana* Kütz., *Cyclotella* sp, *Navicula* sp. *Navicula cryptocephala*, *Chaetoceros* sp, *Entomoneis paludosa* (W. Smith)

*Reimer, Fragilaria acus (Kützing) Lange-Bertalot, Pinnularia subcapitata* түрлері кездесті. Басым түрі *Nitzschia sp, Navicula sp.* болды. Эвгленалы балдырлар өкіліне жататын (Euglenophyta) *Euglena viridis, Trachelomonas sp.* түрлері кездесті. Көк-жасыл балдырлар (Cyanophyta) бойынша *Anabaena spiroides, Anabaena flosaquae,*

*Anabaena constricta, Phormidium sp, Phormidium foveolarum, Aphanothece sp, Merismopedia glauca (Ehrenberg) Kützing, Chroococcus turgidus (Kützing) Nägeli, Chroococcus turgidus (Kützing) Nägeli, Oscillatoria brevis, Synechocystis, Spirulina sp.* кездесті. Басым түрі *Phormidium sp, Spirulina sp.* болды

### 3-сурет

Балқаш көлінің тұзды бөлігі, Ульги ауданындағы альгофлора құрамының пайыздық көрсеткіші



Зерттеу жұмысының соңғы нүктесі Үшкөл ауданы (45.61677224320329, 78.10199725592088) су температурасы 23°C ал рН деңгейі 7,5. Үшінші нүктеден сынама алу нәтижесінде альгофлораның әртүрлілігі байқалды, атап айтқанда (диатомды балдырлар) *Bacillariophyta* өкілдері түрлік құрамы бойынша 36% құрады, жасыл балдырлар (*Chlorophyta*) 34% құрады, көк-жасыл балдырлар (*Cyanophyta*) 23%, эвгленалық балдырлар (*Euglenophyta*) 7% құрады.

Диатомды балдырлар (*Bacillariophyta*) бойынша *Tabellaria sp, Rhopalodia gibba (Ehrenberg) Otto Müller, Nitzschia closterium Ehr, Thalassiosira sp., Cyclotella meneghiniana Kütz, Cyclotella sp. Navicula cryptocephala, Chaethoceros sp, Entomoneis paludosa (W. Smith) Reimer, Fragilaria acus (Kützing) Lange-Bertalot, Pinnularia major, Pinnularia microstauron, Pinnularia subcapitata* түрлері кездесті. Басым түрі *Navicula cryptocephala* болды

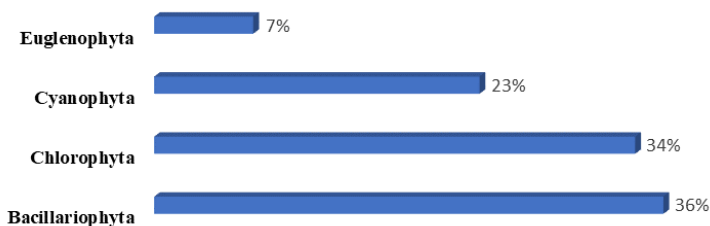
Көк-жасыл балдырлар (*Cyanophyta*) бойынша *Anabaena spiroides, Anabaena flosaquae, Anabaena constricta, Phormidium foveolarum, Microcystis sp, Oscillatoria brevis, Synechocystis, Spirulina sp.* кездесті. Басым түрі *Spirulina sp.* болды. Ал, жасыл балдырлар (*Chlorophyta*) бойынша *Chlorococcales* өкілдері *Chlorella vulgaris var vulgaris Beijerinck, Parachlorella kessleri, Pediastrum duplex Meyen var duplex, Dunaliella salina, Scenedesmus obliquus Kuetz var obliquus, Volvocales* туысына *Chlamydomonas monadina*

*Stein* түрі кездесті. Басымдық көрсеткен *Dunaliella salina және Chlamydomonas sp.* Эвгленалы балдырлар өкіліне жататын (*Euglenophyta*) *Euglena viridis, Euglena caudata, Trachelomonas sp.* түрлері кездесті (сурет 4).

Салыстырмалы түрде, үш нүктеден алынған альгофлора құрамында басымдық көрсеткен (диатомды балдырлар) *Bacillariophyta* таксономиялық тұрғыдан алғанда, диатомды балдырлар көлдің планктон құрамындағы тұзды ортада тіршілік етуге бейімделген негізгі топтардың бірі болып табылады (сурет 5). Бұл олардың бірнеше ерекшелігімен түсіндіріледі. Біріншіден, диатомдар көптеген түрлері тұзды және сәл минерализденген ортада өмір сүре алады; клеткалық қабырғалары кремнийді ( $SiO_2$ ) құрамында ұстап, осморегуляцияны қамтамасыз етеді, бұл тұздық стресс жағдайында тіршілік етуге мүмкіндік береді. Екіншіден, олар органикалық заттарға төзімді, яғни  $\beta$ -мезосапробты сапалық жағдайында жақсы дамиды. Үшіншіден, диатомдар қоректік заттарды — нитраттар мен фосфаттарды тиімді пайдалана отырып, бәсекелестік жоғары болған жағдайда да басымдыққа ие болады. Соңында, диатомдар жарық, температура және рН өзгерістеріне төзімді келеді, ал Балқаштың шығыс бөлігіндегі рН (7,5–8,5) және температуралық градиент олардың өсуіне кедергі келтірмейді. Осы қасиеттері диатомды балдырларды шығыс Балқаштағы планктон құрамында басым топқа айналдырады (Balycheva et al., 2023).

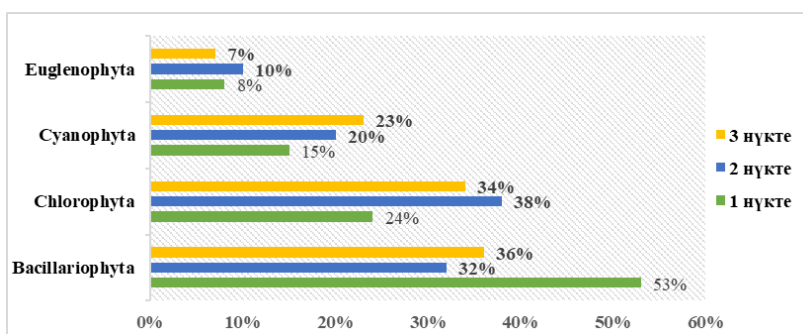
#### 4-сурет

Балқаш көлінің тұзды бөлігі, Үшкөл ауданындағы альгофлора құрамының пайыздық көрсеткіші



#### 5-сурет

Балқаш көлінің тұзды бөлігіндегі альгофлораның салыстырмалы құрамы



Келесі пайыздық үлесі бойынша екінші орында жасыл балдырлар орналасады. жасыл балдырлар орналасады. Бұл топтың кейбір өкілдері мысалы *Chlamydomonas*, *Dunaliella*, *Tetraselmis*, *Asteromonas* туыстары минералдануы жоғары ортаға өте төзімді, жоғары тұздылық жағдайында өмір сүре алады (Jo et al., 2024).

Цианобактериялар (*Cyanophyta*) жасушалардағы су мен иондардың тепе-теңдігін сақтайтын осморегуляциялық жүйелер мен осмопротекторлық қосылыстар (глицерин, сахароза) арқылы жоғары тұздылыққа төзімді. Сонымен қатар, азот пен фосфордың төмен концентрациясында да қоректік заттарды тиімді пайдалана алады, ал фикоцианин сияқты адаптивті пигменттер фотосинтезді тиімді жүргізуге мүмкіндік береді. Жоғары рН, температуралық ауытқулар және тұздық стресс жағдайларына төзімділігі олардың бәсекелестік ортада басым топқа айналуын қамтамасыз етеді (Gómez Leyva et al., 2024).

Ал, эвгленалы балдырлар Шығыс Балқаш акваториясында аз болуы, біріншіден, судың жоғары минерализациясы (3,3–4,7 г/л, кей жерлерде 6–7 г/л) эвгленалық балдырлар үшін қолайсыз орта құрайды, өйткені олар негізінен тұщы немесе аз минерализденген суда өседі. Екіншіден,

физико-химиялық жағдайлар рН мәнінің 7,5–8,5 аралығы, жоғары булану және температуралық градиент эвгленалардың тіршілігіне стресс тудырады.

Цианобактерия мен микробалдырлардың аксеникалық дақылдарын бөліп алу және бөлініп алынған дақылдардың морфологиялық ерекшелігін сипаттау

Аксеникалық дақылдарды бөліп алу үшін классикалық микробиологиялық әдістер қолданылды. Оларға кезең-кезеңімен жүргізілетін сұйылту, қайта егу, сондай-ақ микроманипулятор арқылы жеке жасушаларды немесе жіпшелерді механикалық бөлу әдістері жатады (Nemtseva et al., 2001). Бұл әдістердің үйлесімді қолданылуы табиғи сынамалардан цианобактериялардың аксеникалық, морфологиялық және культуралық тұрғыдан тұрақты дақылдарын алуға мүмкіндік берді. Осылайша, су үлгілерден алынған зерттеулер нәтижесінде цианобактерияларға жататын 4 бактериологиялық таза дақыл анықталды, олар *Oscillatoria*, *Nostoc*, *Anabaena* and *Arthrospira sp.*, және микробалдырларға жататын 4 бактериологиялық таза дақыл *Chlorella*, *Parachlorella kessleri*, *Dunaliella salina*, диатомды балдыр *Navicula* бөлініп алынды.

*Chlorella vulgaris* біржасушалы жасыл микробалдырлар тобына жатады және *Chlorococcineae* класының морфологиялық-физиологиялық белгілерін көрсетеді. Жас жасушалары 2–4 мкм, шар немесе әлсіз эллипсоидты; ересек жасушалары 3–10 мкм, жұқа қабықшасы, белдік тәрізді хроматофоры және айқын пиреноид түзеді. Көбеюі жыныссыз, аналық жасушадан 4–16 автоспора түзілу арқылы жүреді. Суспензияда жасушалар біркелкі таралып, тұнба түзбейді, түсі қою жасыл. 10-күні минералды ортада өсіргенде 1–3 мм диаметрі, тегіс, дөңес, қою жасыл колониялар пайда болады; жасушалары 3–7 мкм. Систематикасы бойынша Патшалықүсті *Eucaryota*, Патшалық: *Plantae*, Патшалықасты: *Phycobionta*, Бөлім: *Chlorophyta*, Класс: *Chlorophyceae*, Қатар: *Chlorococcales*, Тұқымдас: *Chlorellaceae*, Туыс: *Chlorella* жатады.

Келесі микробалдыр, *Parachlorella kessleri* – бұл біржасушалы жасыл микробалдыр *Chlorococcineae* класына жатады. Жасушалардың диаметрі 2–3,5 мкм, бөліну алдында өлшемдері 4–5 мкм дейін ұлғаяды. Пиреноидтер байқалмайды. Жасушалар көбіне 2–8 автоспораға, өте сирек жағдайда 16 автоспораға бөлінеді. Сұйық қоректік ортада өсірілгенде жасушалар түбіне тұнбайды, ыдыстың қабырғасы жайылмайды. Қатты қоректік ортада дөңгелек, тегіс және дөңес колониялар түзеді, жиектері біркелкі. Колониялардың диаметрі 3–4 мм, түсі қою жасыл. Штамм автотрофты, ауа температурасы 22–32 °С аралығында 04 және Тамия қоректік орталарында жақсы өседі. Систематика бойынша Патшалықүсті: *Eucaryota*, Патшалық: *Plantae*, Патшалықасты: *Phycobionta*, Бөлім: *Chlorophyta*, Класс: *Chlorophyceae*, Қатар: *Chlorococcales*, Тұқымдас: *Chlorellaceae*, Туыс: *Chlorella*

*Navicula sp.* – эллипстік пішіннен бастап сызықты-эллипстік немесе ланцет тәрізді формаларға дейін өзгереді. Ұзындығы 4,6–13,4 мкм (орташа  $8,3 \pm 1,7$  мкм), ені 2,1–3,8 мкм (орташа  $2,7 \pm 0,4$  мкм,  $n = 31$ ). Соңғы бөлімдері ұштары бас тәрізіден жазық/ашық түрге, кейде симметриясыз немесе дұрыс емес пішінге ие болады. Тігіс жіңішке, тұзу, ұштары қарапайым, проксимальды ұштары айқын көрінеді. Осьтік аймақ шамалы көрінеді, орталық аймақ өзгермелі, әртүрлі өлшемді, ромб тәрізді және сәл асимметриялы пішінге ие. Систематикасы бойынша: ол *Eukaryota* Патшалықүсті, *Chromista* Патшалығы-

на, *Bacillariophyta* Бөлімінде, *Bacillariophyceae* Классына, *Naviculales* Қатарына, *Naviculaceae* Тұқымдасына жатады.

*Dunaliella salina* – біржасушалы жасыл микробалдыр *Chlorophyta* бөлімінің *Chlorophyceae* класына жатады. Жасушалары эллипсоидты немесе жұмыртқа тәрізді, апикальды ұшында екі мүртшасы бар, өлшемдері штаммға байланысты 2,8–40 мкм ұзындықта, 1,5–20 мкм ені бар; біздің зерттеуде 11–25 мкм ұзындық, 6–15 мкм ен анықталды. Түрлік пластикалық, яғни қоршаған орта жағдайына байланысты пішінін өзгерте алады. Клеткалары белсенді қозғалғыш, суспензияда біркелкі таралған; пальмелла байқалмайды. Көбеюі вегетативтік жолмен, жасушалардың көлденең бөлінуі арқылы жүреді. Жоғарғы сатысы *Eukaryota*; Патшалық *Plantae*; патшалықүсті *Phycobionta*; Бөлімі *Chlorophyta*; Класы *Chlorophyceae*; Қатары *Chlorococcales*; Тұқымдас *Dunaliellaceae*; Туысы *Dunaliella*. (сурет 6).

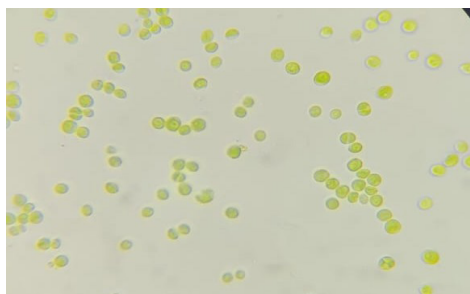
Келесі, бөлініп алынған цианобактериялардың туыстарына тоқталамыз. Цианобактериялар грам-теріс прокариоттар, біржасушалы, жасушалары дөңгелек, таяқша тәрізді, иілген, және жіп тәрізді, колониялық немесе көпжасушалы құрылымға ие. Олар әртүрлі экологиялық жағдайларға бейімделе алатын, жоғары тұздылыққа төзімді, көбінесе вегетативтік жолмен көбейетін, фотосинтезді жүзеге асыра алатын фототрофты микроорганизмдер.

*Oscillatoria sp.* – *Oscillatoriales* қатарына жататын цианобактерия. Гетероцисттері жоқ. Трихомалары ашық көк-жасыл, тұзу, ені 4–5 мкм, көлденең қалқаншаларының бойында аздап жіңішкерген, кейде жеңіл дәнектілігі байқалады, ұштары сәл жіңішкерген және иілген. Жасушаларының ұзындығы 2,5–5,7 мкм, еніне тең немесе екі есе кіші. Заррука және Громов қоректік ортасында 25–32°C температурада жақсы өседі.

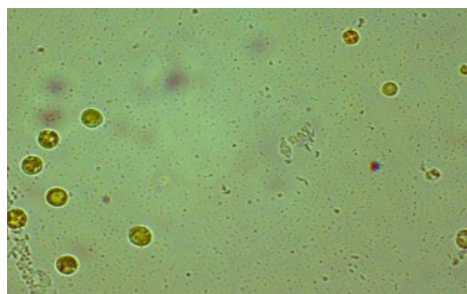
*Nostoc.sp.* – жіпшелері қара көк жасыл түсті. Трихомаларының диаметрі шамамен 2-8 мкм. шеттері тарылған, қалқа орындарында айқын тартылулар байқалады. Жасушалар арасында гетероцисталар мен акинеттер кездеседі. Көп жағдайда гетероцисталары интеркалярлы. Трихома Көбею бір жазықтықта жүреді. Сұйық қоректік ортада шыныға бекініп өседі. Автотрофты штамм. – Класс: *Nostocophycideae*, Қатар: *Nostocales*, Тұқымдас: *Nostocaceae*, Туыс *Nostoc*.

### 6-сурет

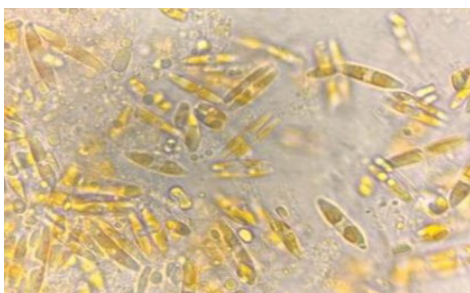
Балқаш көлінің тұзды бөлігінен бөлініп алынған микробалдыр дақылдары



а) *Chlorella vulgaris*



ә) *Parachlorella kessleri*



б) *Navicula sp.*



в) *Dunaliella sp.*

*Arthrospira sp.* – галофилді, алкалофилді, термофилді және жарық сүйгіш цианобактериялар тобы, *Cyanobacteria* бөлімінің *Hormogoneae* класына, *Arthrospira* туысына жатады. Бұл көпжасушалы, симбиотикалық, жіптәрізді (филаментозды) организм. Трихомалары вегетативтік жасушалардан құралған, спираль тәрізді, муцинді қапшығы жоқ. Морфологиясы цилиндрлі жасушалардан тұратын спираль тәрізді трихомалар арқылы көрінеді. Пішіні, өлшемі және иірімділік деңгейі қоршаған ортаның физикалық-химиялық жағдайына байланысты өзгеріп отырады (сурет 7).

*Anabaena sp.* – *Nostocales* қатарына жататын цианобактерия, трихомдары жеке, қысқа, аздап иілген, ені 2,7–3,4 мкм, ұзындығы 2,8–4 мкм. Гетероцисталары сопақша, ені 3,5–4,5 мкм, ұзындығы 4–6 мкм. Споралары эллипсоидты немесе эллипсоидты-цилиндрлік пішінді, ені 3,5–5 мкм, ұзындығы 6–7,5 мкм, қабықшасы түссіз. Клеткалары жіп тектес, прокариоттық типті, көк-жасыл түсті, 2–6 мкм мөлшерінде. Систематика бойынша, *Cyanophyta* бөліміне жатады,

Класы – *Hormogoniophyceae*, Қатар – *Nostocales*, Тұқымдас – *Anabaenaceae*, Туыс – *Anabaena*,

*Цианобактерия дақылдарының өсу жағдайларын анықтау және өсу динамикасын зерттеу.*

Бөлініп алынған аксеникалық цианобактерия дақылдары *Oscillatoria s.*, *Nostoc.sp.*, *Arthrospira sp.*, *Anabaena sp.* арнайы қоректік орталарға Заррука, ВГ-11, Громов, Артария, Тамия отырғызылды. *Nostoc.sp.*, *Anabaena sp.* дақылдарының ВГ-11 қоректік ортада жоғары өсуі байқалды, ал *Oscillatoria sp.*, *Arthrospira sp.* дақылдарын өсіру үшін Заррука қоректік ортасы қолайлы болды.

Бөлініп алынған дақылдардың өсуіне оптималды ортаны таңдау мақсатында, бақылау ретінде 20°C, 24°C, 28°C, 30°C, 32°C температурада 9 күн бойы, 2000–5000 лк жарық деңгейінде, фотопериод ретінде 16:8 (жарық:қараңғы) режимі қолданылды, 1–2% CO<sub>2</sub> қосылған ауа ағынымен аэрацияланды. Қоректік ортаның қышқылдығы (рН) 5-10 шегінде тұрақтандырылды. Бастапқы оптикалық тығыздық (OD 750) 0.2±0.01 шамасында болды, әр 2 күн сайын өлшеу жұмыстары жүргізілді. Әр тәжірибе үш қайтара жүргізілді

**7-сурет**

Балқаш көлінің тұзды бөлігінен бөлініп алынған цианобактерия дақылдары



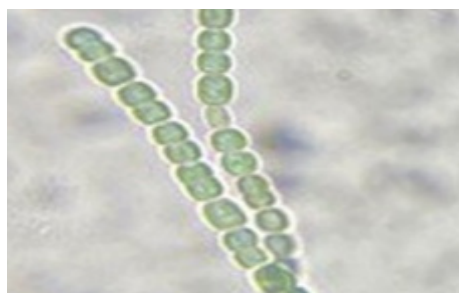
а) *Oscillatoria sp.*



ә) *Nostoc sp.*



б) *Arthrospira sp.*



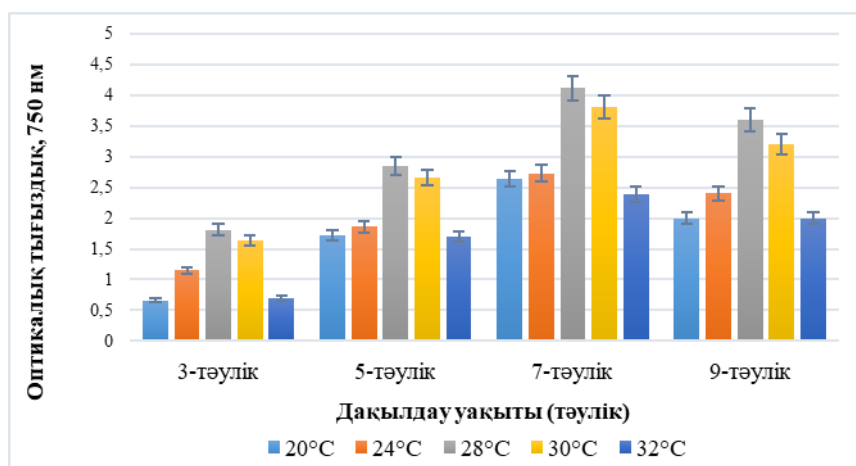
в) *Anabaena sp.*

Зерттеу нәтижелері бойынша *Anabaena sp.* және *Nostoc sp.* цианобактериялары ВГ-11 қоректік ортасында 9 күн бойы өсірілді. Өсіру тәжірибелері осы штамдар үшін оптимальды температураның 28°C – 30°C шамасында еке-

нін көрсетті. Өсу динамикасы бойынша аталған цианобактериялар 7-тәулікте ең жоғары оптикалық тығыздыққа жетті, бұл олардың белсенді физиологиялық күйде болғанын білдіреді (сурет 8, 9).

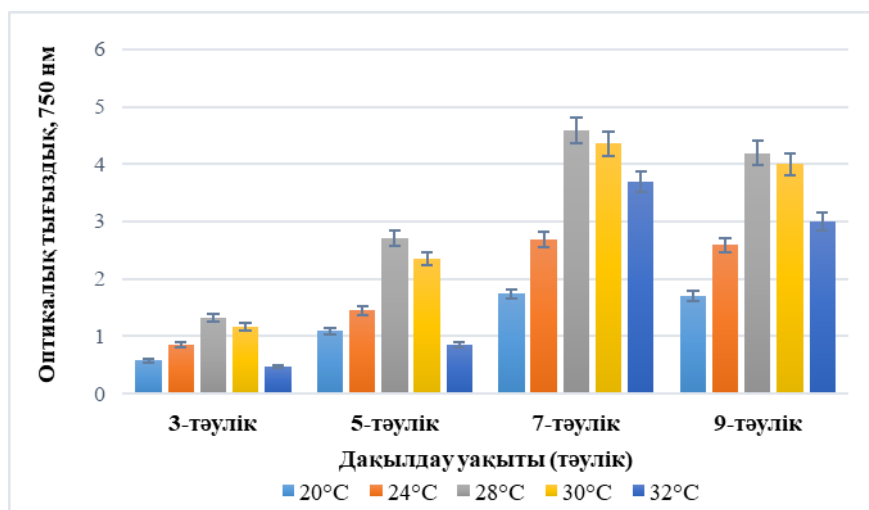
**8-сурет**

Әртүрлі температура жағдайларында *Anabaena sp.* дақылының өсу көрсеткіші



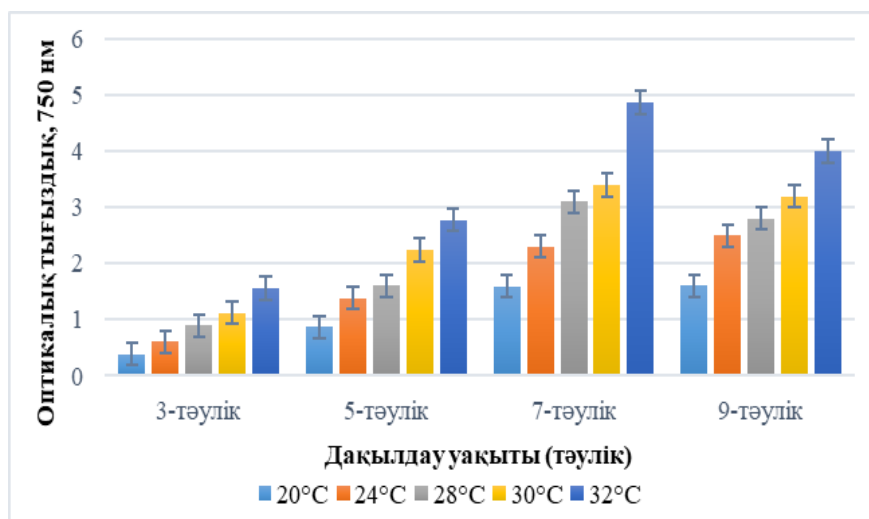
### 9-сурет

Әртүрлі температура жағдайларында *Nostoc sp.* дақылының өсу көрсеткіші



### 10-сурет

Әртүрлі температура жағдайларында *Oscillatoria sp.* штаммының өсу көрсеткіші



*Oscillatoria sp.* штаммы Заррука қоректік ортасында өсіріліп, 30°C – 32°C температурада культивациялау барысында 7-тәулікте максимальды өсу көрсеткішін көрсетті. Ал *Arthrospira sp.* үшін ең қолайлы өсу жағдайлары Заррука ортасында 28°C – 30°C температурада байқалып, ол да 7-тәулікте оптикалық тығыздықтың максимумына жетті (сурет 10,11).

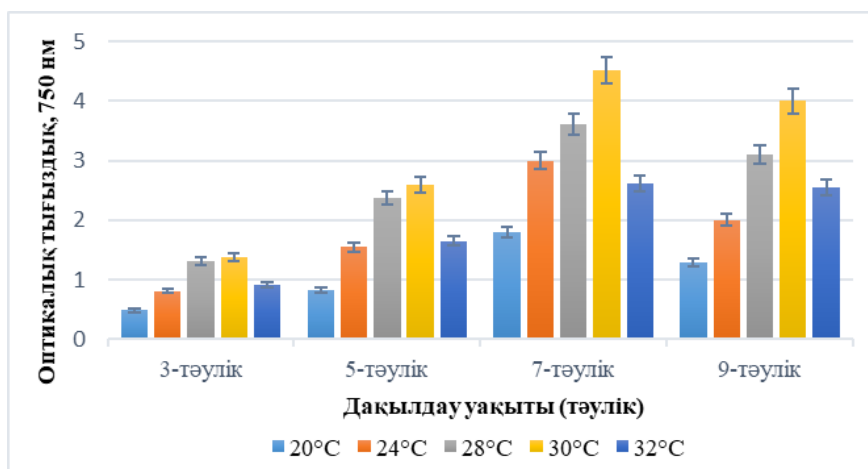
Жүргізілген тәжірибелер нәтижесінде жаңадан бөлініп алынған барлық цианобактерия дақылдары үшін оңтайлы өсу температуралары анықталды. Аталған параметрлер әрі қарайғы биотехнологиялық зерттеулер, өсіру шарттарын

стандарттау және биомасса өнімділігін арттыру үшін маңызды критерийлердің бірі болып табылады.

Келесі кезекте, бөлініп алған цианобактериялардың өсу көрсеткішіне, биомасса жиналуына ортаның рН деңгейінің әсері зерттелді, көптеген цианобактериялар бейтарап немесе сәл сілтілі ортада жақсы өсумен сипатталады, әдетте олар үшін ортаның оңтайлы рН мәні 7–9 құрайды. Ортаның қышқылдығы қоректік ортаның компоненттерінің тұрақтылығына, олардың қолжетімділігіне, әсіресе өсу факторлары мен дәрумендердің сіңімділігіне әсер етеді (сурет 12).

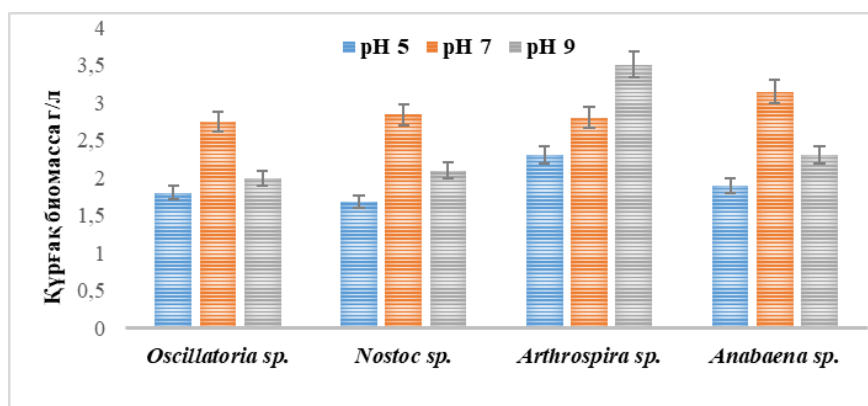
### 11-сурет

Әртүрлі температура жағдайларында *Arthrospira sp.* шаммының өсу көрсеткіші



### 12-сурет

Цианобактерия дақылдарының әртүрлі pH деңгейлеріндегі биомасса жиналуының көрсеткіші



Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, цианобактерия дақылдары pH деңгейлері 5, 7 және 9 жағдайында әртүрлі өсу көрсеткішіне ие болды, сәйкесінше бұл көрсеткіш биомасса мөлшерінің жиналуына әсер етті. Атап айтқанда, pH 7-7,5 бейтарап ортада *Oscillatoria sp.*  $2,75 \pm 0,05$  г/л шамасында биомасса жинаса, *Nostoc sp.*  $2,84 \pm 0,06$  г/л шамасында, *Anabaena sp.*  $3,15 \pm 0,07$  г/л құрғақ биомасса жинай алды, ал *Arthrospira sp.* pH 8-9 деңгейінде  $3,56 \pm 0,04$  г/л құрғақ биомасса жинап салыстырмалы түрде жоғары нәтижеге ие болды, болды ( $p < 0.05$ ).

Зерттелген цианобактерия дақылдары әртүрлі pH деңгейлерінде өсірілді, pH 7-9 цианобактериялардың физиологиялық белсенділігін арттырып, биомасса түзілуін максимумға жеткізді.

Бұл деректер зерттелген цианобактериялардың өсу процестерін оңтайландыруда pH көрсеткішінің маңызды рөл атқаратынын дәлелдейді.

*Микробалдыр дақылдарының өсу жағдайларын анықтау және өсу динамикасын зерттеу.*

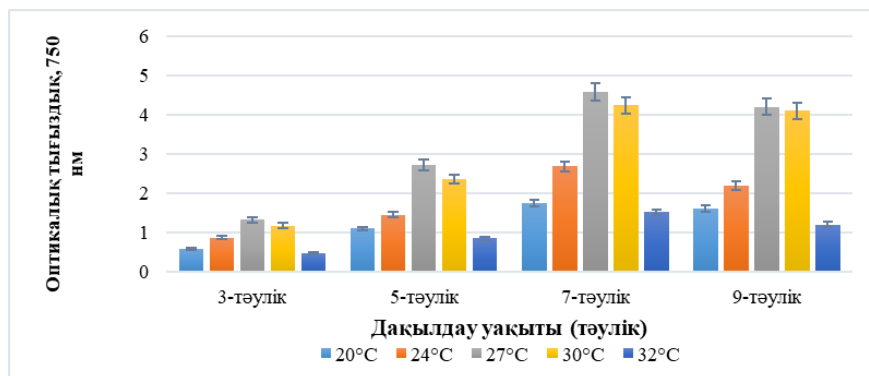
Бөлініп алынған микробалдырларға *Chlorella vulgaris.*, *Parachlorella kessleri.*, *Dunaliella salina* және диатомды балдыр *Navicula sp.* әртүрлі температура көрсеткішінің әсері зерттелді. *Chlorella vulgaris*, *Parachlorella kessleri* Тамия қоректік ортасында, *Dunaliella salina* Артария қоректік ортасында, ал диатомды балдыр *Navicula sp.* BG-11 қоректік ортасында өсірілді. Бақылау ретінде 20°C, 24°C, 27°C, 30°C, 32°C температура алынды, 9 күн бойы жарық деңгейі 2000–5000 лк, фотопериод 16:8 (жарық:қараң-

ғы), 1–2% CO<sub>2</sub> қосылған ауа ағынымен аэрацияланып өсірілді. Қоректік ортаның (рН) 6-9 шегінде болды. Бастапқы оптикалық тығыздық

(OD 750) 0.2±0.01 шамасында болды, әр 2 күн сайын өлшеу жұмыстары жүргізілді. Әр тәжірибе үш қайтара жүргізілді.

### 13-сурет

Әртүрлі температура жағдайларында *Chlorella vulgaris* дақылының өсу көрсеткіші

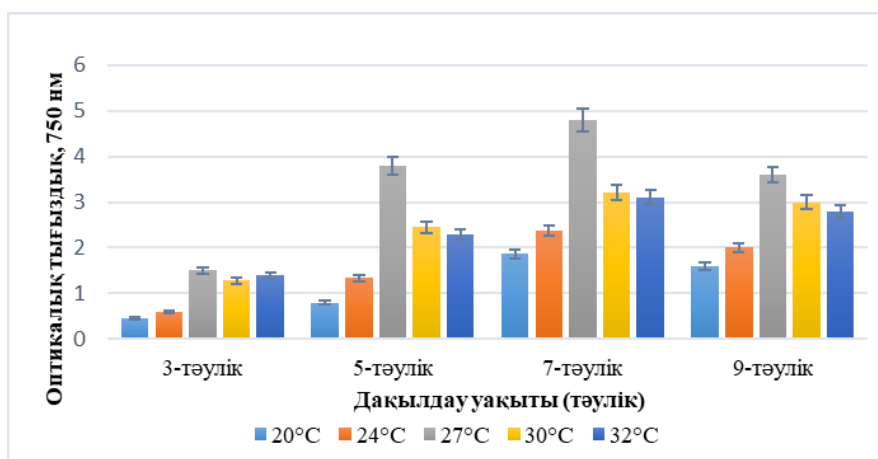


Зерттеу барысында әртүрлі микробалдыр штамдарының өсіру жағдайларына температура факторының ықпалы бағаланды. *Chlorella vulgaris* Тамия қоректік ортасында, ал *Dunaliella salina* Артария қоректік ортасында 9 күн бойы өсірілді. Бақылау нәтижелері бұл штамдар үшін

оңтайлы өсіру температурасы 27°C -30°C шамасында екенін көрсетті. Өсу динамикасына жүргізілген талдаулар бойынша дақылдар 7-тәулікте ең жоғары оптикалық тығыздыққа жететіндігі анықталды, бұл олардың белсенді өсу фазасына сәйкес келеді (сурет 13,14).

### 14-сурет

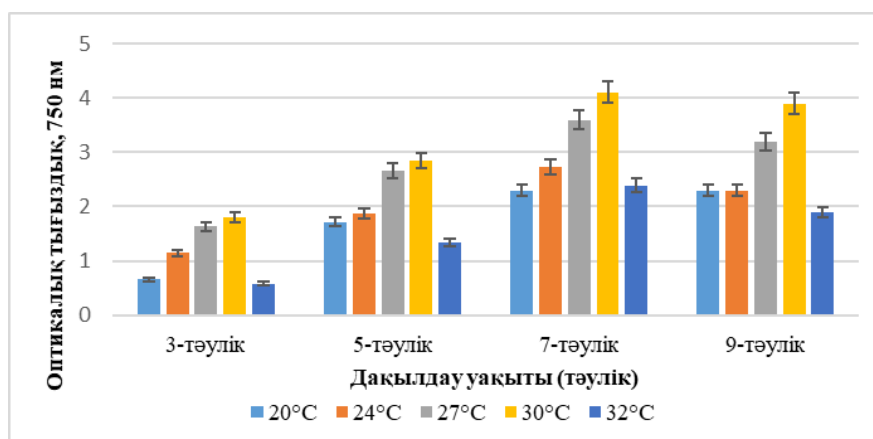
Әртүрлі температура жағдайларында *Dunaliella salina* дақылының өсу көрсеткіші



*Parachlorella kessleri* Тамия қоректік ортасында өсірілді. Бұл штам үшін ең қолайлы температуралық жағдай 27°C – 30°C екені анықтал-

ды. Өсу қарқынының бағалануы нәтижесінде *P. kessleri* де 7-тәулікте оптикалық тығыздықтың ең жоғары мәніне қол жеткізді (сурет 15).  
15-сурет

Әртүрлі температура жағдайларында *Parachlorella kessleri* дақылының өсу көрсеткіші

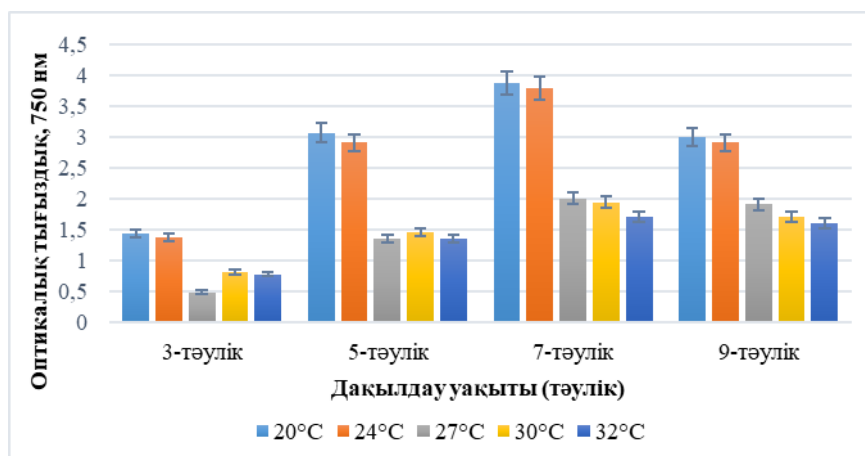


*Navicula sp.* диатомды балдыры BG-11 қоректік ортасында культивацияланып, 20–24°C температура аралығында өсірілді. Тәжірибе нәтижелері бойынша осы диапазонда *Navicula sp.*

7-тәулікте максималды өсу көрсеткішіне жетті. Бұл оның салқын ортаға бейімделгенін және диатомды балдырларға тән физиологиялық ерекшеліктерді дәлелдейді (сурет 16).

#### 16-сурет

Әртүрлі температура жағдайларында диатомды балдыр *Navicula sp.* дақылының өсу көрсеткіші



Жалпы алғанда, алынған нәтижелер әрбір микробалдыр штамының температураға байланысты өсу ерекшеліктерін айқын көрсетіп, олардың физиологиялық бейімделгіштігін сипаттайды. Бұл деректер әрі қарайғы биотехнологиялық зерттеулер мен өндірістік өсіру процестерінде оптималды культивация шарттарын таңдауға негіз бола алады.

Келесі кезекте, бөлініп алған микробалдырлардың өсу көрсеткішіне, биомасса жиналуына

ортаның рН деңгейінің әсері зерттелді, көптеген зерттеу жұмыстарында микробалдырлар үшін ортаның оңтайлы рН мәні 6 – 9 құрайтындығы анықталған (сурет 17).

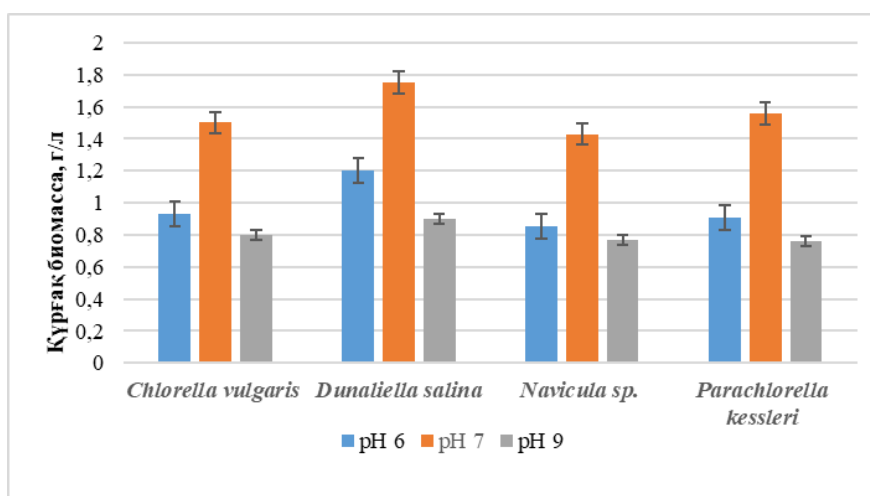
Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, микробалдыр штамдарының рН деңгейлері рН 6,5-7,5 жағдайында әртүрлі өсу көрсеткішіне ие болды, сәйкесінше бұл көрсеткіш микробалдырлардың биомасса жиналуының мөлшеріне әсер етті. Атап айтқанда, *Chlorella vulgaris* рН 6,8

деңгейінде  $1,5 \pm 0,03$  г/л шамасында биомасса жинаса, *Parachlorella kessleri* рН 7 деңгейінде  $1,56 \pm 0,07$  г/л шамасында, ал диатомды балдыр *Navicula sp.*  $1,43 \pm 0,06$  г/л биомасса рН 7,5 деңгейінде көрсетті, ал *Dunaliella salina* рН 7,5 деңгейде  $1,75 \pm 0,06$  г/л шамасында салыстырмалы түрде биомасса көрсеткіші бойынша жоғары нә-

тижеге ие болды. ( $p < 0,05$ ). Алынған нәтижелер, микробалдырлардың өсу қарқыны мен биомасса жинақталуының рН деңгейіне тікелей тәуелді екенін растады. Осылайша, зерттелген штаммдарды культивациялау кезінде рН бақылауы олардың өнімділігін оңтайландыру үшін маңызды фактор болып табылады.

### 17-сурет

Микробалдыр дақылдарының әртүрлі рН деңгейлеріндегі биомасса жиналуының көрсеткіші



### Қорытынды

Зерттеу жұмысының қорытындысы бойынша, Балқаш көлінің тұзды бөлігінің альгофлорасының түрлік құрамы анықталып, келешегі мол микробалдырлар мен цианобактериялардың жаңа дақылдары бөлініп алынып, олардың морфологиялық, дақылдық және физиологиялық қасиеттері зерттелді. Талдау нәтижесінде, альгофлора құрамында диатомды балдырлар (*Bacillariophyta*) 40,33%, жасыл балдырлар (*Chlorophyta*) 32%, көк-жасыл балдырлар (*Cyanophyta*) 19,33% және эвгленалық балдырлар (*Euglenophyta*) 8,33% құрады. Олар 4 бөлімге, 6 классқа, 6 қатарға, 11 тұқымдасқа және 22 туысқа жатқызылды. Микробиологиялық әдістері негізінде микробалдырлар мен цианобактериялардың 8 аксеникалық таза дақылдары бөлініп алынып, олар *Oscillatoria sp.*, *Nostoc sp.*, *Arthrospira sp.*, *Anabaena sp.*, *Chlorella vulgaris*, *Parachlorella kessleri*, *Dunaliella salina*, *Navicula sp.* болып анықталды. Әр штамм үшін өсірудің оңтайлы жағдайлары анықталды: Цианобактерия *Nostoc sp.* және *Anabaena sp.* дақыл-

дарының өсуі үшін BG-11 қоректік ортасында, 28°C – 30°C аралығындағы температураның әсері жоғары болса, *Oscillatoria sp.* дақылы үшін Заррука қоректік ортасы және 32°C температура оңтайлы болды. Бұл цианобактерия дақылдары үшін ортаның оңтайлы рН мәні 7-7,5 диапазонында болды. Цианобактерия *Arthrospira sp.* дақылы Заррука қоректік ортасында 28°C – 30°C температурада рН мәні 8-9 аралығында қарқынды өсуі байқалды. Ал, микробалдыр *Chlorella vulgaris* Тамия қоректік ортасында, ал *Dunaliella salina* Артария қоректік ортасында, 27°C -30°C температура шамасында қарқынды өсуі байқалса, диатомды балдыр *Navicula sp.* BG-11 қоректік ортасында 20–24°C температурада, ал *Parachlorella kessleri* Тамия қоректік ортасында, 27°C -30°C температура аралығында тиімді өсу көрсеткішін көрсетті. Барлық зерттелген дақылдар үшін оптималды рН мәні 6,5–7,5 аралығында болды.

Бұл таза дақылдар өндірістік биотехнологияда, атап айтқанда биологиялық белсенді қоспалар әзірлеуде ерекше қызығушылық тудыратын объект болып табылады.

## Мүдделер қақтығысы

Барлық авторлар мақаланың мазмұнын оқыды және олармен таныс және мүдделер қақтығысы жоқ.

## Алғыс сөз

Авторлар Algatech – балдырлар биотехнологиясы орталағына (Чехия) мақаланы дайындау барысында көрсеткен құнды ғылыми ұсыныстары мен кеңестері үшін алғыс білдіреді.

## Қаржыландыру

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасының Білім және ғылым министрлігі қаржыландырып отырған АР23485416 гранты «Қолданбалы зерттеулерде пайдалану үшін микробалдырлар мен цианобактериялар коллекциясының биобанкін құру және олардың биотехнологиялық потенциалын зерттеу» (2024–2026) жобасы және

кейбір нәтижелер ШЫҰ бағдарламасы бойынша ҚХР бірлескен 2022ЕО1032 «Антибиотиктерді өндіру жүйесіндегі қытай-қазақстандық ауылшаруашылық өнімдерін зерттеу және әзірлеу, бейімделу қабілетін зерттеу және қолдану» (2023-2025) жобасы аясында жүзеге асырылды.

## Авторлардың үлесі

Тоқтыбай А.К: Концептуализация, Деректерді жинақтау, түпнұсқа жобаны жазу, Зерттеу жүргізу, Формалды талдау. Д. Салауат: Методология. К.Болатхан: Валидация, Деректерді басқару. С.К. Сандыбаева: Мәтінді тексеру және редакциялау. Г.А. Ахметова: Әдістеме, Зерттеу жүргізу. Ә.Қ. Құрметхан: Зерттеу жүргізу. С.С. Санатов: Формалды талдау, Зерттеу жүргізу, Әдістеме. Р. Hrouzek: Ғылыми жетекшілік, Валидация. Б.К. Заядан: Қадағалау және жобаны басқару, Ғылыми жетекшілік, Валидация, Қаржыландыруды тарту.

## Әдебиеттер

- Abdullaev, S., Zhumabayev, D., Duisenbayev, D., & Latypov, A. (2023). Long-term water level projections for Lake Balkhash. *Water*, 17(13), 2021.
- Alimkulov, S. K., Myrzakhmetov, A. B., Tursunova, A. A., Tairov, A. Z., & Bolatov, K. M. (2022). Features of water exchange in the Uzynal Strait of Lake Balkhash. *Geography and Water Resources*, (4).
- Balycheva, D., Anufrieva, E., Lee, R., Prazukin, A., & Shadrin, N. (2023). Salinity dependent species richness of Bacillariophyta in hypersaline environments. *Water*, 15(12), 2252. <https://doi.org/10.3390/w15122252>
- Barinova, E. V., Plotnikova, I. V., Aladin, N. V., Reblinova, M. V., & Yurkov, A. M. (2018). The application of phytoplankton in ecological assessment of the Balkhash Lake (Kazakhstan). *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(3), 2089–2111. [https://doi.org/10.15666/aeer/1603\\_20892111](https://doi.org/10.15666/aeer/1603_20892111)
- Barinova, S., Krupa, E., Tsoy, V., & Ponomareva, L. (2018). The application of phytoplankton in ecological assessment of the Balkhash Lake (Kazakhstan). *Acta Biologica Hungarica*, 69(3), 208–221.
- Ergashev, A. E. (1979). *Determinant of protococcal algae of Central Asia*. FAN.
- General requirements for sampling (ISO 5667-1:2006; ISO 5667-3:2018). (2022). *GOST R 59024–2020*. Russian Institute of Standardization.
- Gómez Leyva, Y., Torrecillas, A., & Aboal, M. (2024). Cyanotoxins in epipelagic and epiphytic cyanobacteria from a hypersaline coastal lagoon. *Marine Drugs*, 22(8), 334. <https://doi.org/10.3390/md22080334>
- Guiry, M. D., & Guiry, G. M. (n.d.). *AlgaeBase*. National University of Ireland, Galway. <https://www.algaebase.org>
- Jo, C. R., Cho, K., An, S. M., Do, J. M., Hong, J. W., Kim, J. H., Kim, S. Y., Jeong, H. G., & Kang, N. S. (2024). Taxonomical, physiological, and biochemical characteristics of *Dunaliella salina* DSTA20 from hypersaline environments. *Microorganisms*, 12(12), 2467. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12122467>
- Komárek, J. (2013). *Cyanoprokaryota (Vol. 19/3): Heterocytous genera*. Springer Spektrum.
- Kozhakhmetov, B. Zh., & Baimukanov, D. A. (2021). Study of the water balance of Lake Balkhash considering major climatic factors and water management measures. *Geography and Water Resources*, (4), 34–45.
- Krammer, K., & Lange-Bertalot, H. (1986–1991). *Bacillariophyceae (Parts 1–4)*. Gustav Fischer Verlag.
- Krupa, E., Barinova, S., & Aubakirova, M. (2020). Tracking pollution and its sources in the catchment-lake system of major waterbodies in Kazakhstan. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 25(1), 1–13. <https://doi.org/10.1111/lre.12302>
- Methodological guidelines for the application of the pH measurement method in water using the potentiometric method PND F 14.1:2:3:4.121-97 (FR.1.31.2007.03794). (2016). Moscow.
- Muratkhonov, D., Mirlas, V., Anker, Y., Miroshnichenko, O., Smolyar, V., Rakhimov, T., Sotnikov, Y., & Rakhimova, V. (2024). Heavy metal groundwater transport mitigation from an ore enrichment plant tailing at Lake Balkhash, Kazakhstan. *Sustainability*, 16(16), 6816. <https://doi.org/10.3390/su16166816>

Muzafarov, A. M., Ergashev, A. E., & Khalilov, S. (1988). *Determinant of blue-green algae of Central Asia* (Vol. 3, pp. 390–900). FAN.

Nemtseva, N. V., Alekhina, G. P., Shabanov, S. V., & Bukharin, O. V. (2001). Method for obtaining axenic cultures of microalgae (Russian Federation Patent No. 2164940). <https://patentdb.ru/patent/2164940>

Plotnikov, I., Smurov, A., & Aladin, N. (2021). Large saline lakes of Central Asia. *Journal of Arid Land Studies*, 31(2), 29–44. [https://doi.org/10.14976/jals.31.2\\_29](https://doi.org/10.14976/jals.31.2_29)

Russian Institute of Standardization. (2022). *General requirements for sampling (GOST R 59024–2020; ISO 5667-1:2006, NEQ; ISO 5667-3:2018, NEQ)*. Moscow.

Sampling for microbiological analysis (ISO 19458:2006). (2013). *GOST 31942–2012*. Standartinform.

Tashenov, A. A., & Zhangel'din, A. E. (2020). Long-term dynamics of hydrobionts of Lake Balkhash and its relationship with environmental factors. *Vestnik AGTU. Series: Science*. <https://vestnik.astu.org/ru/nauka/article/31912/view>

The online database of cyanobacterial genera. (n.d.). <http://www.cyanodb.cz/>

Tsarenko, P. M. (1990). *Short guide to chlorococcal algae of the Ukrainian SSR*. Naukova Dumka.

Wang, Y., Li, X., Zhang, Q., & Zhumadillayev, M. (2023). Satellite-based drought assessment in the endorheic Balkhash Basin. *Frontiers in Environmental Science*, 11, Article 1291993. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1291993>

Zayadan, B. K., Akmukhanova, N. R., & Sadvakasova, A. K. (2013). *Collection of microalgae and cultivation methods*. Liter.

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

Тоқтыбай Акнур Кентайқызы (корреспонденттік автор) – Биология және биотехнология проблемаларының ФЗИ кіші ғылыми қызметкері ҚР ФЖБМ (Алматы, Қазақстан, e-mail: [aknurtoktybay1@gmail.com](mailto:aknurtoktybay1@gmail.com)).

Салауат Дамыс – Әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті биоалуантүрлілік және биоресурстар кафедрасы “8D08401-балық шаруашылығы және өнеркәсіптік балық аулау” мамандығының 3-курс PhD докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: [salauat.damys@mail.ru](mailto:salauat.damys@mail.ru)).

Болатхан Кенжегүл – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биотехнология кафедрасының ассоциирленген профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: [bkenzhegul23@mail.ru](mailto:bkenzhegul23@mail.ru)).

Сандыбаева Сандугаш Қалжанқызы – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті Биотехнология кафедрасының аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: [sandybaevasandugash@gmail.com](mailto:sandybaevasandugash@gmail.com)).

Ахметова Гүлнәз Асқарқызы – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті Биотехнология кафедрасының аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: [gulnaz\\_akhmetova92@mail.ru](mailto:gulnaz_akhmetova92@mail.ru)).

Күрметхан Әсем Күрметханқызы – Биология және биотехнология проблемаларының ФЗИ қызметкері ҚР ФЖБМ (Алматы, Қазақстан, e-mail: [akurmetkhan@mail.ru](mailto:akurmetkhan@mail.ru)).

Санатов Санжар Санатұлы – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Экологиялық биоинженерия» мамандығының 1-курс магистранты (Алматы, Қазақстан, e-mail: [sanzhar.snt@gmail.com](mailto:sanzhar.snt@gmail.com)).

Pavel Hrouzek – Ph.D. Балдырлар биотехнологиясы зертханасының меңгерушісі, Чехия Ғылым Академиясының Микробиология институты- Algatech орталығы (Требонь, Чехия, e-mail: [hrouzek@alga.cz](mailto:hrouzek@alga.cz)).

Заядан Болатхан Қазыханұлы (корреспонденттік автор) – биология ғылымдарының докторы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биотехнология кафедрасының профессоры, ҰҒА-ң Академигі (Алматы, Қазақстан, e-mail: [zbolatkhan@gmail.com](mailto:zbolatkhan@gmail.com)).

#### **Information about authors:**

Toktybay Aknur (Corresponding author) – Junior Research Fellow at the Scientific Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [aknurtoktybay1@gmail.com](mailto:aknurtoktybay1@gmail.com)).

Salauat Damys-PhD doctoral student of the 3rd year of the specialty “8D08401 – Fisheries and Industrial Fishing” Department of Biodiversity and Bioresources of Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [salauat.damys@mail.ru](mailto:salauat.damys@mail.ru)).

Bolatkhan Kenzhegul – PhD, associate professor of the Department of biotechnology of the Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [bkenzhegul23@mail.ru](mailto:bkenzhegul23@mail.ru)).

Sandybayeva Sandugash Kalzhankyzy – PhD, Senior Lecturer at the Department of Biotechnology of Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [sandybaevasandugash@gmail.com](mailto:sandybaevasandugash@gmail.com)).

Akhmetova Gulnaz – Senior Lecturer at the Department of Biotechnology of Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [gulnaz\\_akhmetova92@mail.ru](mailto:gulnaz_akhmetova92@mail.ru)).

Kurmetkhan Assem – Fellow at the Scientific Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [akurmetkhan@mail.ru](mailto:akurmetkhan@mail.ru)).

Sanzhar Sanatuly Sanatov – 1st-year Master’s student in Environmental Bioengineering at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [sanzhar.snt@gmail.com](mailto:sanzhar.snt@gmail.com)).

Pavel Hrouzek – Ph.D. Head of the laboratory of Algal Biotechnology, Institute of Microbiology of the Czech Academy of Sciences – Center Algatech (Trebson, Czech Republic, e-mail: [hrouzek@alga.cz](mailto:hrouzek@alga.cz)).

Zayadan Bolatkhan (Corresponding author) – Doctor of Biological Sciences, Professor of Biotechnology Department of Al-Farabi Kazakh National University, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [zbolatkhan@gmail.com](mailto:zbolatkhan@gmail.com)).

**Сведения об авторах:**

Тоқтыбай Ақнұр Кентайқызы (автор-корреспондент) – младший научный сотрудник НИИ проблем биологии и биотехнологии МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: aknurtoktybay1@gmail.com).

Салауат Дамыс – докторант 3 курса по специальности «8D08401 – Рыбное хозяйство и промышленное рыболовство» Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: salauat.damys@mail.ru).

Болатхан Кенжегүл – PhD, ассоциированный профессор кафедры биотехнологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: bkenzhegul23@mail.ru).

Сандыбаева Сандугаи Қалжанқызы – PhD, старший преподаватель кафедры биотехнологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: sandybaevasandugash@gmail.com).

Ахметова Гүлнәз Асқарқызы – старший преподаватель кафедры биотехнологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: gulnaz\_akhmetova92@mail.ru).

Құрметхан Әсем Құрметханқызы – сотрудник НИИ проблем биологии и биотехнологии МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: akurmetkhan@mail.ru).

Санатов Санжар Санатұлы – магистрант 1 курса по специальности «Экологическая биоинженерия» Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: sanzhar.snt@gmail.com).

Pavel Hrouzek – PhD, заведующий лабораторией биотехнологии водорослей, Институт микробиологии Чешской Академии наук – Центр Algatech (Требон, Чешская Республика, e-mail: hrouzek@alga.cz).

Заядан Болатхан Казыханұлы (автор-корреспондент) – доктор биологических наук, профессор кафедры биотехнологии Казахского национального университета имени аль-Фараби, академик НАН РК (Алматы, Казахстан, e-mail: zbolatkhan@gmail.com).

Келіп түсті: 27 қараша 2025 жыл

Қабылданды: 25 наурыз 2026 жыл

**K.A. Daulet<sup>1,2\*</sup>**, **B.B. Osmonali<sup>2</sup>**,  
**S.T. Nazarbekova<sup>1</sup>**, **M.B. Skaptsov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup> Institute of Botany and Phytointroduction, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup> South Siberian Botanical Garden, Altai State University, Barnaul, Russia

\*e-mail: dauletova1211@mail.ru

## COMPARATIVE ANATOMICAL ANALYSIS OF *EREMURUS ROBUSTUS* AND *E. TIANSHANICUS* GROWING IN THE ZAILIYSKIY ALATAU

The genus *Eremurus* (Asphodelaceae) represents one of the characteristic groups of the flora of Central Asia, distinguished by its ornamental value and practical significance in traditional medicine. However, the anatomical structure of its representatives under different ecological conditions remains insufficiently studied. The aim of this study was to conduct a comparative anatomical analysis of two species occurring in the Ile Alatau. Leaves and stems were used as study material, fixed in 70% ethanol and processed according to a standard histological protocol with paraffin embedding. Transverse sections 40  $\mu$ m thick were prepared using a rotary microtome and examined by light microscopy with digital photodocumentation. Morphometric measurements included epidermal thickness, the size of palisade mesophyll, the diameter of water-storage cells in the leaf, as well as epidermal thickness, the size of primary cortex cells, and the diameter of water-storage cells in the stem. The study revealed that both species exhibit xeromorphic traits: a uniseriate epidermis with a thickened cuticle and sunken stomata, the presence of palisade mesophyll and water-storage cells in the leaves, and well-developed vascular bundles. In the stem, a dense epidermis, a distinct primary cortex, and collateral vascular bundles with water-storage cells were observed. Interspecific differences were also identified: the first species had larger primary cortex cells and water-storage elements, reflecting a water-accumulating adaptive strategy, while the second exhibited a more developed palisade mesophyll and greater stability in tissue dimensions, indicating a photosynthetic type of adaptation. The results contribute to a better understanding of the ecological plasticity and intraspecific variability of *Eremurus* in the mountainous and foothill ecosystems of Central Asia.

**Keywords:** Asphodelaceae, Adaptations, Anatomy, *Eremurus*, Ile Alatau.

К.Ә. Дәулет<sup>1,2\*</sup>, Б.Б. Осмонали<sup>2</sup>, С.Т. Назарбекова<sup>1</sup>, М.В. Скапцов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup> Ботаника и фитоинтродукция Институты, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup> Оңтүстік Сібір ботаникалық бағы, Алтай мемлекеттік университеті, Барнаул, Ресей

\*e-mail: dauletova1211@mail.ru

### Іле Алатауында өсетін *Eremurus robustus* және *E. tianschanicus* түрлерінің салыстырмалы анатомиялық талдауы

*Eremurus* (Asphodelaceae) туысы – Орталық Азия флорасының сәндік мәні жоғары және халық медицинасында қолданылуы жағынан маңызды топтарының бірі. Алайда бұл туыс өкілдерінің әртүрлі экотоптардағы анатомиялық құрылысы жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Жұмыстың мақсаты – Іле Алатауы аумағында өсетін екі түрдің салыстырмалы анатомиялық талдауын жүргізу болды. Зерттеу материалы ретінде 70%-дық спиртте бекітіліп, парафинге күйудің стандартты гистологиялық әдісі бойынша өңделген өсімдіктердің жапырақтары мен сабақтары алынды. Қалыңдығы 40 мкм көлденең кесінділер микротомның көмегімен дайындалып, жарық микроскопиясы әдісі арқылы зерттелді және сандық фотобекіту жүргізілді. Морфометриялық өлшемдерге эпидермис қалыңдығы, палисадты мезофилл өлшемдері, жапырақтағы су жинаушы жасушалардың диаметрі, сондай-ақ сабақтағы эпидермис қалыңдығы, алғашқы қабық жасушалары мен су жинаушы элементтердің мөлшері кірді. Зерттеу нәтижесінде екі түрдің де ксероморфтық белгілерге ие екені анықталды: қалың кутикуласы бар бір қабатты эпидермис және терең орналасқан устьицалар, палисадты мезофилл мен жапырақтағы су жинаушы жасушалар, жақсы дамыған өткізгіш шоқтар. Сабақ бөлігінде тығыз эпидермис, алғашқы қабық және су жинаушы жасушалары бар коллатеральды шоқтар анықталды. Түрлер арасында айырмашылықтар байқалды: бірінші түрде алғашқы қабық жасушалары мен су

ылғал қорын сақтауға бейімделу стратегиясын көрсетеді; ал екінші түрде палисадты мезофилл жақсырақ дамыған және ұлпа өлшемдерінің тұрақтылығы байқалады, бұл фотосинтетикалық типтегі бейімделуді білдіреді. Алынған нәтижелер *Eremurus* туысының экологиялық икемділігі мен түрішілік өзгергіштігін Орталық Азияның таулы және таулы етегіндегі экожүйелер жағдайында нақтылауға мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** Asphodelaceae, адаптация, анатомия, *Eremurus*, Іле Алатауы.

К.А. Дәулет<sup>1,2\*</sup>, Б.Б. Осмонали<sup>2</sup>, С.Т. Назарбекова<sup>1</sup>, М.В. Скапцов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт ботаники и фитоинтродукции, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Южно-Сибирский ботанический сад, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

\*e-mail: dauletova1211@mail.ru

### Сравнительный анатомический анализ видов *Eremurus robustus* и *E. tianschanicus* произрастающих в Заилийском Алатау

Род *Eremurus* (Asphodelaceae) является одной из характерных групп флоры Центральной Азии, отличающейся декоративной ценностью и прикладным значением в народной медицине. Однако анатомическая структура его представителей в различных экотопах изучена недостаточно. Целью работы был сравнительный анатомический анализ двух видов, произрастающих в пределах Заилийского Алатау. В качестве материала использованы листья и стебли растений, фиксированные в 70% спирте и обработанные по стандартной гистологической методике с парафиновой заливкой. Поперечные срезы толщиной 40 мкм были изготовлены с помощью микро-тома и изучены методом световой микроскопии с цифровой фотодокументацией. Морфометрические измерения включали толщину эпидермиса, размеры палисадного мезофилла, диаметр водоносных клеток листа, а также толщину эпидермиса, размеры клеток первичной коры и водоносных клеток стебля. Исследование показало, что оба вида обладают ксероморфными признаками: однослойный эпидермис с утолщённой кутикулой и погружёнными устьицами, наличие палисадного мезофилла и водоносных клеток в листьях, хорошо развитые проводящие пучки. В стебле выявлены плотный эпидермис, первичная кора и коллатеральные пучки с водоносными клетками. Между видами обнаружены различия: у первого более крупные клетки первичной коры и водоносные элементы, что указывает на влагозапасную стратегию, у второго – более развитый палисадный мезофилл и стабильность размеров тканей, отражающие фотосинтетический тип адаптации. Полученные результаты позволяют уточнить экологическую пластичность и внутривидовую изменчивость рода *Eremurus* в условиях горных и предгорных экосистем Центральной Азии.

**Ключевые слова:** Asphodelaceae, адаптации, анатомия, *Eremurus*, Заилийский Алатау.

## Introduction

The genus *Eremurus* M. Bieb. (Asphodelaceae) is one of the most characteristic groups of Central Asian flora, differing from closely related taxa in its unique morphological features, in particular its leafless inflorescence consisting of more than 50 flowers, as well as its developed rhizome (Naderi Safar et al., 2014; Hadizadeh et al., 2021). Two subgenera are distinguished within the genus. The subgenus *Eremurus* is characterized by light brownish-green or cream-colored tubular and bell-shaped flowers with concave perianth leaves, on the underside of which there are three or five veins; the staminal filaments are protruding in most cases. Subgenus *Henningia*, on the contrary, includes species with white, pink, or yellow flowers of the rotary type, usually with enclosed stamen filaments and perianth leaves with one vein (Chukavina, 1985; Ahmad et al., 2014; Ha-

dizadeh et al., 2020; Farhadi et al., 2023; Koohkesh et al., 2020; Jang et al., 2024).

Species of the genus *Eremurus* are highly decorative and are known in cultivation as «foxtail lilies» or «desert candles» due to their large and bright spike-like inflorescences (Abdulwahid-Kurdi, 2025). Along with their decorative use, they also have practical significance: some species are used to produce bio-oil (Aysu et al., 2015), adhesives, and as a source of pharmacologically active compounds with antibacterial, anti-inflammatory, and anti-protozoal properties (Gaggeri et al., 2015; Zare et al., 2018). In traditional medicine in Central Asian countries, the roots and leaves of *Eremurus* are used as a remedy for a number of diseases (Dushchanova et al., 2023a).

Foreign researchers have conducted a series of comprehensive studies on the morphological, phylogenetic, and phytochemical characteristics of

Central Asian representatives of the *Eremurus* genus. Iranian scientists have conducted a comprehensive review of the species of the genus, including an analysis of their phytochemical composition, pharmacological properties, and traditional uses (Alhalak & Sekerler, 2025). In addition, specialized phytochemical studies of the roots of *Eremurus luteus* have been carried out (Shahrampour & Razavi, 2022, 2023). Earlier, about a decade before these studies, phylogenetic studies of the genera *Eremurus*, *Asphodelus*, and *Asphodeline* were conducted in Iran, based on the analysis of trnL-F plastid sequences and nuclear ITS DNA loci. Researchers from Uzbekistan, in particular D. Mahmudiev and co-authors, have carried out morphological, anatomical, and molecular genetic studies, as well as developed identification keys for species growing in the Republic of Uzbekistan. Based on a comparative analysis of distribution areas, the authors concluded that the probable center of origin of the genus *Eremurus* is Central Asia (Makhmudjanov et al., 2022, 2024). In India, a comprehensive study was conducted on the species *Eremurus persicus* (Jaub. & Spach) Boiss. — an indigenous medicinal plant of the Western Himalayan flora (Verma et al., 2023).

Anatomical studies of representatives of the genus have been conducted repeatedly and have revealed both common and specific characteristics. Thus, Bahrim et al. (Bahrim et al., 2020), studying the anatomical structure of the leaves of *E. himalaicus*, *E. robustus*, and *E. stenophyllus*, revealed a phylloid leaf structure with reverse orientation of the conducting bundles, a single-layer epidermis with a thin cuticle and numerous stomata, as well as a mesophyll represented by large rounded parenchyma cells. At the same time, the stomatal apparatus in *E. stenophyllus* and *E. himalaicus* is located at the same level as the epidermis, while in *E. robustus* it is submerged below the surface. In addition, the assimilation parenchyma in the first two species is significantly better developed than in *E. robustus*.

Similar adaptive features have been identified in *Eremurus lactiflorus*, studied using plant material from the Tashkent Botanical Garden (Dushchanova et al., 2023b). In this species, the epidermis consists of a single layer of cells with a thin cuticle and numerous stomata, while the mesophyll consists of large parenchyma cells with extensive intercellular spaces, indicating xeromorphic adaptations to arid climate conditions.

Despite the available data, comparative anatomical studies of species of the genus *Eremurus* growing in the Zailiyskiy Alatau remain limited.

Meanwhile, this region is one of the centers of their diversity and is of interest both for understanding plant adaptations to mountain xerophytic conditions and for clarifying intraspecific variability.

The aim of this study is to conduct a comparative anatomical analysis of two species of the genus *Eremurus* (*E. robustus* and *E. tianschanicus*) growing in the Zailiyskiy Alatau, identifying common and specific anatomical features that reflect their adaptation to the mountain ecosystems of the region and allowing us to clarify the taxonomic and ecological significance of these structures.

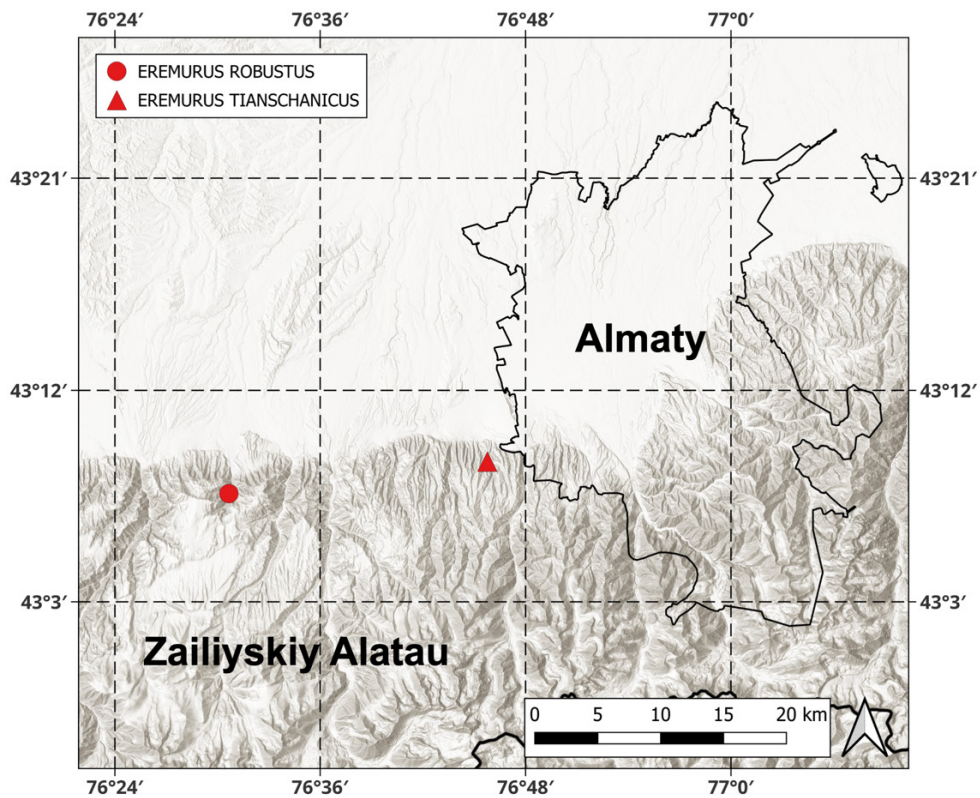
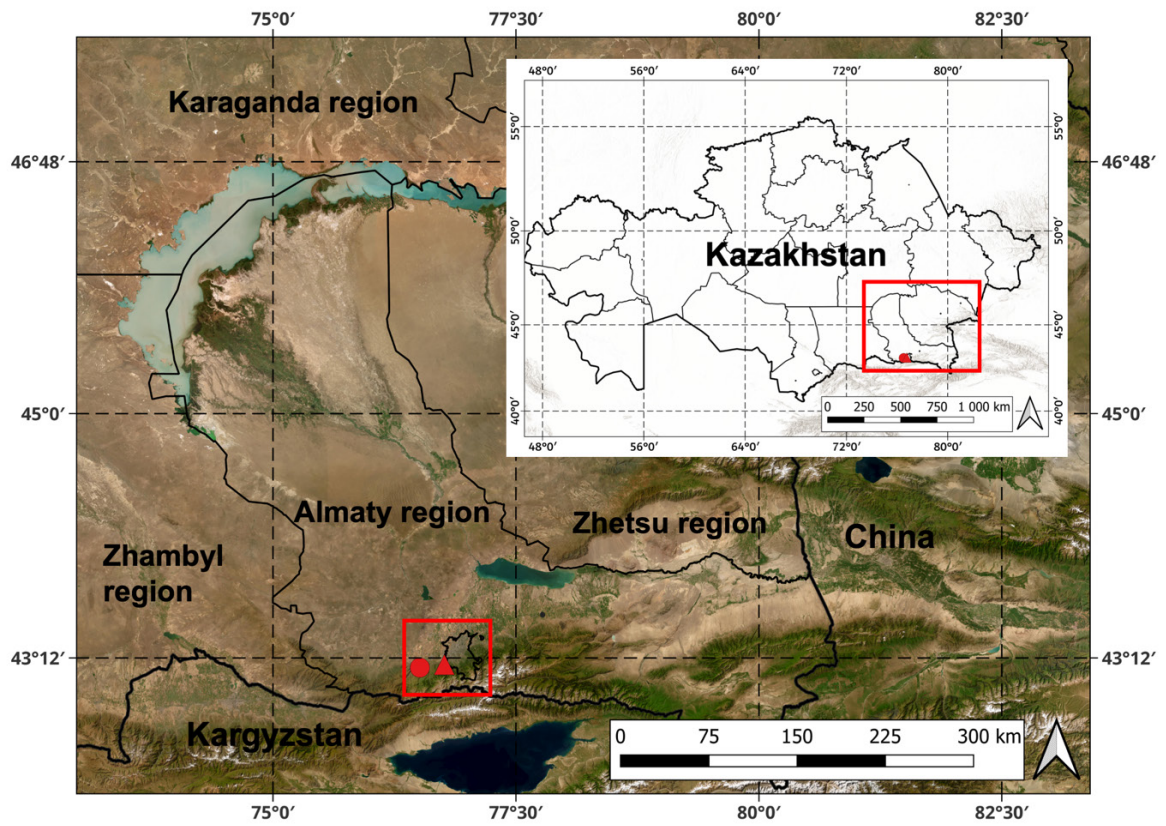
### Materials and methods

The object of study are two closely related species of the genus *Eremurus* M. Bieb. (*Asphodelaceae*) growing within the Zailiyskiy Alatau – *Eremurus robustus* Regel and *Eremurus tianschanicus* Pazij et Vved. ex Pavlov. (Fig. 1). Both taxa are characteristic representatives of the mountain flora of Central Asia and play an important role in the formation of meadow and forest-edge communities in the foothills and lower mountain belts (Chukavina, 1985; Goloskokov, 1958).

*Eremurus robustus* is one of the largest plants of the genus, distinguished by its tall generative shoots, reaching 200 cm, and broad strap-like leaves up to 3–6(–8) cm wide. The inflorescence is dense, multi-flowered, up to 40–100 cm long. The flowers are large, bell-shaped, pink (rarely white), the perianth reaches 15–17 mm in length and has a yellow spot at the base of the lobes. The stamens are slightly shorter than the perianth. The fruit is a rounded, smooth, spherical capsule, relatively large, up to 20–30 mm in diameter. The seeds are gray, with a widely developed wing (Goloskokov, 1958; Townsend, 1980) (Fig. 2).

*Eremurus tianschanicus* is generally smaller than the previous species, reaching 50–150(–200) cm in height. The leaves are linear or linear-oblong, narrower, 1–3 cm wide, and bluish-green in color. The inflorescence is usually narrower and less dense than that of *E. robustus*. The flowers are pale pink, with a perianth 10–12 mm long, also with a yellow spot at the base of the lobes. A characteristic feature is the different length of the stamens: two filaments are noticeably longer than the perianth, while the others are equal to or shorter than it. The fruit is a spherical capsule, significantly smaller than that of *E. robustus*, up to 10 mm in diameter, which is one of the key diagnostic features. The seeds are gray, with a narrow wing (Chukavina, 1985; Goloskokov, 1958; Khokhryakov, 1965) (Fig. 2).

**Figure 1**  
*Map of material sampling points for anatomical studies*



**Figure 2**

Species of the genus *Eremurus*. A – *Eremurus robustus*; B-E – *tianschanicus*



A



B

Both species bloom in June–July and are confined to various ecotopes of the Zailiyskiy Alatau. *E. robustus* is found mainly on meadow slopes and in subalpine communities, while *E. tianschanicus* is confined to rocky and loess foothill slopes with more xerophytic growing conditions.

Anatomical preparations were performed in accordance with standard histological protocols. Samples intended for sectioning were first fixed in 70% ethanol. To facilitate high-quality cross-sectioning, the material was frozen and then poured into histological paraffin poured into special 15×15 mm molds. Cross-sections were obtained using a rotary semi-automatic microtome (MEDITE M530, Burgdorf, Germany) with a section thickness of 40 µm. Microscopic examination of anatomical structures was performed using a digital microscope (Levenhuk Zoom&Joy, Hong Kong, China) equipped with a Levenhuk D740T 5.1 camera. Image acquisition and morphometric measurements were performed using LevenhukLite software, version 4.12.28273 (Levenhuk, Inc., Tampa, Florida, USA). Biometric parameters were statistically processed; mean values and standard errors were calculated using the Data

Analysis function in Microsoft Excel (Islamgulova et al., 2025).

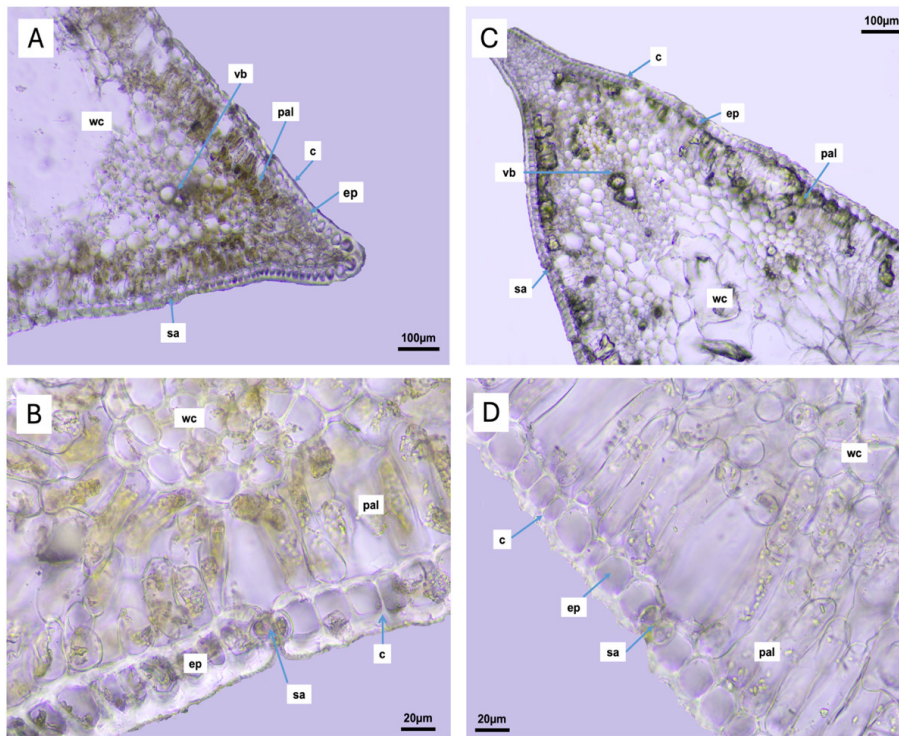
### Results and discussion

The anatomical structure of the vegetative organs of *Eremurus robustus* and *E. tianschanicus* is characterized by typical features of xeromorphic plants, reflecting their adaptation to arid habitats. The leaves of both species have a clearly defined cuticle and a single-layer epidermis with stomata immersed in the tissue, which reduces transpiration. The mesophyll contains a palisade layer that provides photosynthetic activity and specialized water-bearing cells that accumulate moisture. The conducting bundles are well developed and evenly distributed, which ensures efficient transport of water and assimilates (Fig. 3).

The stem of both species is characterized by a dense cuticle and epidermis, under which there is a primary cortex with parenchyma cells. Inside, there are collateral-type conducting bundles with xylem and phloem, as well as well-developed water-conducting cells, which give the organs additional resistance to arid conditions (Fig. 4).

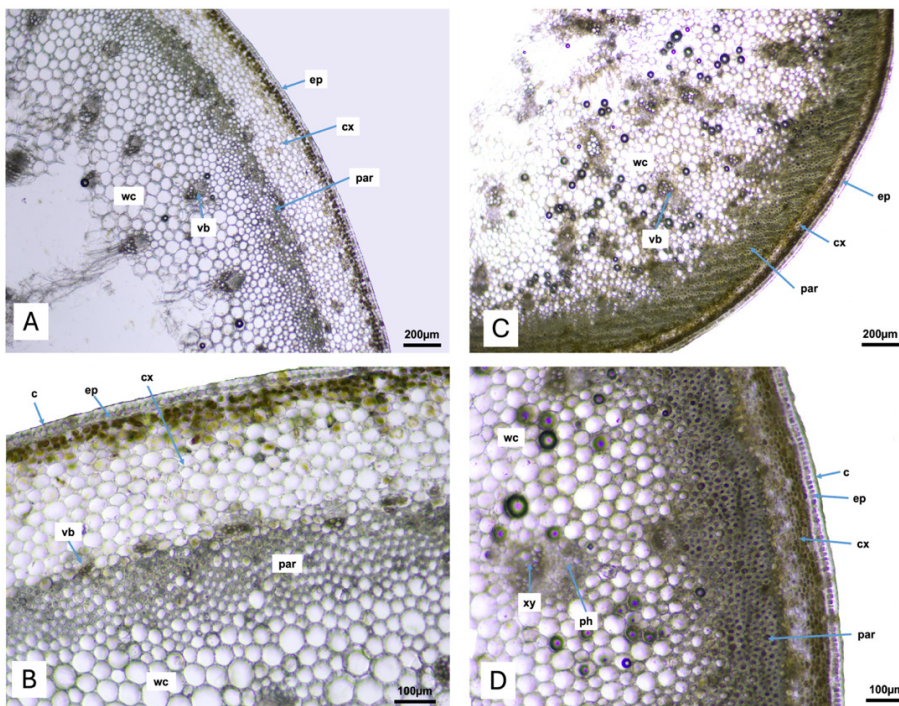
**Figure 3**

Anatomical structure of leaves of two species of the genus *Eremurus*. A-B: *Eremurus robustus*; C-D: *E. tianschanicus*: c – cuticle; ep – epidermis; sa – stomata; pal – palisade mesophyll; vb – vascular bundle; wc – water-conducting cells



**Figure 4**

Anatomical structure of the stem of two species of the genus *Eremurus*. A-B: *Eremurus robustus*; C-D: *E. tianschanicus*: c – cuticle; ep – epidermis; cx – primary cortex; par – parenchyma; vb – vascular bundle; xy – xylem; ph – phloem; wc – water-conducting cells



To identify interspecific differences in the anatomical structure of the leaf and stem in *Eremurus robustus* and *E. tianschanicus*, morphometric measurements of the main tissue components were performed. The table shows the thickness of the epidermis, the size of the palisade mesophyll and water-conducting cells of the leaf, as well as the thickness of the epi-

dermis, the diameter of the primary cortex cells and water-collecting cells of the stem. The use of statistical parameters (mean value, standard error, standard deviation, minimum and maximum values, confidence interval) allowed us to objectively assess the degree of variation in traits and establish the characteristic differences between each species (Table 1).

**Table 1**

*Morphometric measurements of the main tissue components of Eremurus robustus and E. tianschanicus*

<i>Eremurus robustus</i>						
	Leaf			Stem		
	Thickness of the epidermis, $\mu\text{m}$	Palisade mesophyll, $\mu\text{m}$	Diameter of water-bearing cells, $\mu\text{m}$	Thickness of the epidermis, $\mu\text{m}$	Diameter of primary cortex cells, $\mu\text{m}$	Diameter of water collection cells, $\mu\text{m}$
Mean	21,54	65,61	62,12	22,38	32,99	55,69
Standard error	0,41	1,91	18,34	0,39	4,03	7,09
Standard deviation	0,92	4,27	41,02	0,87	9,01	15,86
Minimum	20,73	61,15	21,52	21,60	22,06	35,84
Maximum	22,94	70,95	126,21	23,73	44,26	78,14
Confidence level (95.0%)	1,14	5,30	50,93	1,08	11,19	19,69
<i>E. tianschanicus</i>						
	Leaf			Stem		
	Thickness of the epidermis, $\mu\text{m}$	Palisade mesophyll, $\mu\text{m}$	Diameter of water-bearing cells, $\mu\text{m}$	Thickness of the epidermis, $\mu\text{m}$	Diameter of primary cortex cells, $\mu\text{m}$	Diameter of water collection cells, $\mu\text{m}$
Mean	20,36	70,03	60,97	21,88	13,35	49,73
Standard error	0,96	1,93	10,81	0,68	1,04	7,32
Standard deviation	2,15	4,32	24,18	1,52	2,34	16,38
Minimum	17,46	65,81	34,62	19,39	10,80	29,27
Maximum	23,02	76,02	97,42	23,24	16,42	70,25
Confidence level (95.0%)	2,66	5,36	30,02	1,88	2,90	20,34

The anatomical structure of the leaves and stems of *Eremurus robustus* and *E. tianschanicus* demonstrates both common features characteristic of representatives of the genus and a number of interspecific differences reflecting their adaptive strategies.

Analysis of the leaf epidermis revealed that *E. robustus* has a slightly thicker epidermis (average thickness of 21.54  $\mu\text{m}$ ) compared to *E. tianschanicus* (20.36  $\mu\text{m}$ ). Although the difference is not significant, it indicates a denser outer cell wall in the former species, which may increase resistance to moisture evaporation. At the same time, *E. tianschanicus* has a wider range of epidermal thickness variation (from 17.46 to 23.02  $\mu\text{m}$ ), which reflects the higher ecological plasticity of this trait.

The palisade mesophyll in *E. tianschanicus* is significantly better developed: its thickness aver-

ages 70.03  $\mu\text{m}$ , while in *E. robustus* this figure is 65.61  $\mu\text{m}$ . The increased thickness of the mesophyll indicates a larger area of photosynthetically active tissue, which may contribute to more intensive absorption of solar radiation in the mountain and foothill biotopes where this species is widespread.

The water-bearing cells of the leaf in both species have similar average values (62.12  $\mu\text{m}$  in *E. robustus* and 60.97  $\mu\text{m}$  in *E. tianschanicus*). However, in *E. robustus*, this indicator has a high amplitude of variation (from 21.52 to 126.21  $\mu\text{m}$ ), which indicates heterogeneity of the structure and, probably, the ability to form reservoir cells of different sizes depending on hydrothermal conditions. For *E. tianschanicus*, the variations are less pronounced (34.62–97.42  $\mu\text{m}$ ), which indicates a more stable organization of this tissue.

The differences between the species are even more pronounced in the structure of the stem. The thickness of the epidermis in both species is similar (22.38  $\mu\text{m}$  in *E. robustus* and 21.88  $\mu\text{m}$  in *E. tianschanicus*), which corresponds to the general pattern for the genus. However, the cells of the primary cortex in *E. robustus* are significantly larger (32.99  $\mu\text{m}$ ) compared to *E. tianschanicus* (13.35  $\mu\text{m}$ ). This indicates a more pronounced development of parenchyma tissues in the former species, which perform the function of mechanical support and storage of nutrients.

The diameter of the water-collecting cells in the stem is also higher in *E. robustus* (55.69  $\mu\text{m}$  versus 49.73  $\mu\text{m}$  in *E. tianschanicus*). The increased size of these cells allows them to accumulate a greater volume of moisture, which is an important sign of xeromorphic adaptation. In *E. tianschanicus*, the water-collecting cells are smaller but more uniform in structure, which may be associated with the optimization of moisture distribution when growing in conditions of more stable moisture.

Anatomical differences in the structure of the leaves and stems of *Eremurus robustus* and *E. tianschanicus* are closely related to the characteristics of their ecological niches.

*Eremurus robustus* is a more robust and larger species found in the foothill plains and lower elevations of the Zailiyskiy Alatau. These areas are characterized by a continental climate with sharp temperature fluctuations and long periods of drought. In such conditions, the plant's ability to accumulate and conserve moisture becomes crucial. This explains the larger diameter of the primary cortex cells and water-collecting cells in *E. robustus*. Their size allows them to store significant amounts of water and nutrients, which ensures resistance to dry periods and maintains turgor in the tissues. The wide variability in the size of water-bearing cells indicates the high plasticity of this trait, reflecting the species' adaptability to uneven moisture and seasonal fluctuations in water balance.

At the same time, the thicker epidermis of *E. robustus* leaves provides additional protection from intense solar radiation and reduces transpiration losses. Thus, the anatomical structure of this species

forms a xeromorphic complex of adaptations focused primarily on moisture storage and resistance to the stressful conditions of arid ecosystems.

*Eremurus tianschanicus*, on the contrary, is confined to the mountainous and foothill areas of the Zailiyskiy and Kungey Alatau ranges, where moisture conditions are relatively more stable due to higher precipitation and snowmelt feeding the soil. In these habitats, the key factor for adaptation is not so much moisture storage as the increased efficiency of photosynthetic processes under conditions of strong solar radiation. The more developed palisade mesophyll in *E. tianschanicus* reflects this strategy: the increased thickness of photosynthetically active tissue ensures more complete utilization of light energy and promotes the accumulation of organic matter.

This species has smaller diameter primary cortex and water-collecting cells, which is compensated by their structural stability and more uniform distribution. This indicates that *E. tianschanicus* does not so much store moisture in large volumes as optimize its use under relatively favorable moisture conditions. The wider range of variation in the thickness of the epidermis and palisade mesophyll indicates the high ecological plasticity of the species, which allows it to adapt to various microclimatic conditions of mountain slopes.

## Conclusion

A comparison of the anatomical features of the two species leads to the conclusion that *E. robustus* exhibits a «moisture-storing» strategy typical of plants in arid ecosystems. Its structure is geared toward moisture accumulation and survival in conditions of severe seasonal aridization. *E. tianschanicus* implements a «photosynthetic type» strategy, typical of more humid mountain habitats, where the emphasis is on productivity and efficient use of solar radiation. Differences in the anatomical structure of the leaves and stems of these species reflect different adaptation pathways within the genus *Eremurus*, highlighting their ecological specialization within the arid and foothill ecosystems of Central Asia.

## References

- Abdulwahid-Kurdi, S. J. (2025). Evaluation of nutritional, phytochemical, fatty acids and mineral composition of *Eremurus robustus* leaves. *Journal of Oleo Science*, 74(3), 309–319. <https://doi.org/10.5650/jos.ess24172>
- Ahmad, I., Dole, J. M., Schiappacasse, F., Saleem, M., & Manzano, E. (2014). Optimal postharvest handling protocols for *Eremurus* inflorescences. *Scientia Horticulturae*, 179, 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.031>

- Alhalak, N., & Sekerler, T. (2025). Phytochemical and biological activities of *Eremurus spectabilis*. *Euchembioj Review*, 2, 24–39. <https://doi.org/10.62063/rev-200439>
- Aysu, T., Demirbaş, A., Bengü, A. Ş., & Küçük, M. M. (2015). Evaluation of *Eremurus spectabilis* for bio-oil production. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.08.005>
- Bahrim, C., Breijo, F. J. G., Apostol, M., et al. (2020). Study of foxtail lilies. *Romanian Biotechnology Letters*, 26(2), 2489–2498.
- Chukavina, A. P. (1985). *Morphology and systematics of the genus Eremurus*. Nauka.
- Dushchanova, G. M., Abduraimov, A. A., & Makhmudjanov, D. A. (2023a). Anatomical adaptations of *Eremurus*. *Journal of Arid Land Studies*, 33(2), 145–153.
- Dushchanova, G. M., Sobirova, N. A., & Abdullaev, D. A. (2023b). Structural characteristics of leaf. *Scientific Bulletin of FerSU*, 29(1).
- Farhadi, F., Avan, R., & Sahebkar, A. (2023). Review on *Eremurus* species. *Phytochemistry Letters*, 53, 142–149.
- Gaggeri, R., Rossi, D., Mahmood, K., et al. (2015). Chemical profiling of *Eremurus*. *Journal of Medicinal Plants Research*, 8(41), 1038–1048.
- Goloskokov, V. P. (1958). *Genus Eremurus*. Flora of Kazakhstan.
- Hadizadeh, H., Babaei, A., Samiei, L., & Seifi, A. (2021). Classification of *Eremurus* genotypes. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 51(4), 861–870.
- Hadizadeh, H., Bahri, B. A., Qi, P., Wilde, H. D., & Devos, K. M. (2020). Genetic diversity in *Eremurus*. *Horticulture Research*, 7, 30.
- Islangulova, A., Osmonali, B., Skaptsov, M., et al. (2025). *Xylosalsola chiwensis*. *Plants*, 14, 2279. <https://doi.org/10.3390/plants14152279>
- Jang, J. E., Jeong, H. J., Kim, A. L., et al. (2024). Chloroplast genome of *Eremurus*. *Mitochondrial DNA Part B*, 9(4), 437–441.
- Koohkesh, N., Samanian, K., & Afsharpour, M. (2020). Serish paste applications. *Journal of Cultural Heritage*, 44, 53–62.
- Makhmudjanov, D., Abdullaev, D., Juramurodov, I., et al. (2023). Chloroplast genomes of *Eremurus*. *Forests*, 14, 1709.
- Makhmudjanov, D., Juramurodov, I., Kurbonalieva, M., et al. (2022). *Eremurus* in Uzbekistan. *Plant Diversity in Central Asia*, 2, 82–127.
- Makhmudjanov, D., Volis, S., Yusupov, Z., et al. (2024). Evolution of *Eremurus*. *Plant Diversity*, 46(3), 333–343.
- Makhmudjanov, D., Yusupov, Z., & Sun, H. (2019). Chloroplast genome of *Eremurus robustus*. *Mitochondrial DNA Part B*, 4(2), 3366–3367.
- Mahmoudian, S., Etemadi, N., Amirikhah, R., & Panahi, S. (2023). Vase life of *Eremurus*. *Horticulturae*, 9, 978.
- Naderi Safar, K. S., Kazempour Osaloo, S., Assadi, M., et al. (2014). Phylogenetic analysis of *Eremurus*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 56, 32–39.
- Pavlov, N. V. (1961). *Guide to plants of Kazakhstan*.
- Shahrampour, D., & Razavi, S. M. (2022). Bio-based films. *Materials Today Communications*, 33, 104756.
- Shahrampour, D., & Razavi, S. M. (2023). Biodegradable films. *Progress in Organic Coatings*, 175, 107360.
- Townsend, C. C. (1980). Liliaceae. *Flora Iranica*.
- Verma, S., Sofi, I. I., Ganie, A. H., et al. (2023). Desynopsis in *Eremurus*. *Caryologia*, 76(1), 15–26.
- Zare, H., Avan, R., Sahebkar, A., & Eghbali, S. (2018). Pharmacological properties. *Journal of Ethnopharmacology*, 214, 230–243.

#### Information about authors:

Daulet Kamiliya – PhD student of Geobotany, Department of Botany and Agroecology, Faculty of Biology and Biotechnology of the Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: dauletova1211@mail.ru).

Осмонали Бектемир Биримқұлұлы – Phd., Head of the plant world cadastre laboratory, Institute of Botany and Phytointroduction, 36D Timiryazev Str. (Almaty, Kazakhstan, e-mail: be96\_kz@mail.ru).

Nazarbekova Saltanat – Professor, Dept. of Botany and Agroecology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: snazarbekova@mail.ru).

Skaptsov Mikhail – candidate of Biological Sciences, Senior Research Associate, South Siberian Botanical Garden, Altai State University (Barnaul, Russia; e-mail: mr.skaptsov@mail.ru).

#### Авторлар туралы мәлімет:

Дәулет Камилия Әуескелдіқызы – «Геоботаника» білім беру бағдарламасы бойынша докторант, ботаника және агроэкология кафедрасы, биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: dauletova1211@mail.ru).

Осмонали Бектемир Бірімқұлұлы – Phd, өсімдіктер дүниесінің кадастры зертханасының меңгерушісі, Ботаника және фитоинтродукция институты (Тимирязев көшесі, 36Д, Алматы, Қазақстан; e-mail: be96\_kz@mail.ru).

Назарбекова Салтанат Төлепбековна – профессор, ботаника және агроэкология кафедрасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: snazarbekova@mail.ru).

**Сведения об авторах:**

Даулет Камилия Ауескелдикызы – докторант по образовательной программе «Геоботаника» кафедры ботаники и агроэкологии, факультета биологии и биотехнологии, КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: dauletova1211@mail.ru).

Осмонали Бектемир Биримкулулы – PhD, заведующий лабораторией кадастра растительного мира, Институт ботаники и фитоинтродукции (Алматы, Казахстан, e-mail: be96\_kz@mail.ru).

Назарбекова Салтанат Толепбековна – профессор кафедры ботаники и агроэкологии КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: snazarbekova@mail.ru).

Скапцов Михаил Викторович – к. б. н., старший научный сотрудник Южно-Сибирского ботанического сада Алтайского государственного университета (Барнаул, Россия, e-mail: mr.skaptsov@mail.ru).

Поступила 21 ноября 2025 года

Принята 25 марта 2026 года

A.E. Nurmanbek<sup>1\*</sup>, N. Akhtayeva<sup>1</sup>,  
L.N. Kiyekbayeva<sup>2</sup>, T.S. Ibragimov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: aydyn.nurmanbek@gmail.com

## RESILIENT FLORA OF THE DESERT: A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF *ARTHROPHYTUM*'S ADAPTATION AND THERAPEUTIC POTENTIAL

This article presents a comprehensive analysis of the genus *Arthrophytum* Schrenk (family Chenopodiaceae), which includes subshrub species adapted to arid regions of Eurasia and North Africa. The aim of the study is to summarize current scientific knowledge on the taxonomy, morphological characteristics, ecological adaptations, biogeographical distribution, and pharmacological potential of *Arthrophytum* species. Both modern scientific databases (SciFinder, Google Scholar, ScienceDirect, etc.) and traditional sources (botanical floras, herbarium collections, ethnobotanical reports) were used for data collection.

Special attention is given to species with notable ecological plasticity and endemic distribution in Kazakhstan (*A. iliense*, *A. balchaschense*, *A. pulvinatum*, among others). The article concludes data from morphological, anatomical, and molecular analyses that have identified systematic status of several species, comprising the reorganization of *A. balchaschense* into the genus *Haloxylon*. Results of the pharmacognostic study of species *A. schmittianum* and *A. scorparium* are discussed, allocating their high biological activities such as antioxidant, antimutagenic, neuroprotective, and antidiabetic activities.

The outcomes show the significance of *Arthrophytum* as a main component of desert biodiversity and a perspective source of bioactive natural compounds. This review contains modern research gaps and summarizes the importance for future interdisciplinary studies, comprising preservation, sustainable use, and pharmacological studies of the genus.

This article is useful for botanists, pharmacologists, ecologists, and medicinal plant experts, exploring plant and their life cycle in arid environments.

**Keywords:** *Arthrophytum*, arid ecosystems, morphological adaptation, *Amaranthaceae*, bioactive compounds, antioxidant activity, ethnopharmacology, C4 photosynthesis, Central Asia flora, desert halophytes.

A.E. Нұрманбек<sup>1\*</sup>, Н.З. Ахтаева<sup>1</sup>, Л.Н. Киекбаева<sup>2</sup>, Т.С. Ибрагимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>С.Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медициналық университеті, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: aydyn.nurmanbek@gmail.com

### Шөлді аймақ өсімдіктерінің тұрақтылығы: *Arthrophytum* туысының бейімделу механизмдері мен емдік әлеуетіне кешенді шолу

Бұл шолу мақаласы *Arthrophytum* Schrenk туысына (Chenopodiaceae тұқымдасы) жататын, Еуразия мен Солтүстік Африканың құрғақ аймақтарына бейімделген жартылай бұталы өсімдіктердің жан-жақты талдауы ұсынылған. Зерттеудің мақсаты – *Arthrophytum* туысы түрлерінің таксономиясы, морфологиялық сипаттамалары, экологиялық бейімделу ерекшеліктері, биogeографиялық таралуы және фармакологиялық әлеуеті туралы қазіргі ғылыми мәліметтерді жүйелеу.

Мәліметтерді жинау үшін заманауи ғылыми дерекқорлар (SciFinder, Google Scholar, ScienceDirect және т.б.), сондай-ақ дәстүрлі көздер (ботаникалық флоралар, гербарийлік коллекциялар, этноботаникалық есептер) пайдаланылды.

Зерттеу барысында ерекше назар экологиялық бейімделгіштігі жоғары және Қазақстан аумағында эндемик түрлерге (мысалы, *A. iliense*, *A. balchaschense*, *A. pulvinatum* және т.б.) аударылды. Шолуға морфологиялық, анатомиялық және молекулалық зерттеулердің нәтижелері енгізіліп, олардың негізінде кейбір түрлердің таксономиялық мәртебесі нақтыланды. Атап айтқанда, *A. balchaschense* түрінің *Haloxylon* туысына қайта жіктелуі қарастырылды.

Сонымен қатар *A. schmittianum* және *A. scorparium* тәрізді түрлердің антиоксиданттық, антимитоздық, нейрорепараторлық және антидиабеттік белсенділігін сипаттайтын

Алынған мәліметтер *Arthrophytum* туысының шөл биоәртүрлілігінің маңызды компоненті әрі биологиялық белсенді табиғи қосылыстардың болашағы зор көзі екенін көрсетеді. Мақалада зерттеулердегі бар олқылықтар анықталып, келешек пәнаралық зерттеулер үшін (соның ішінде сақтау, орнықты пайдалану және фармакологиялық зерттеу) басым бағыттар ұсынылады.

Мақала ботаниктерге, биомедицина зерттеушілеріне, фармакологтарға, экологтарға, дәрілік өсімдіктер мен биоалуантүрлік саласындағы мамандарға, әсіресе құрғақ аймақтардағы өсімдіктердің бейімделу стратегиясын зерттейтіндерге арналған.

**Түйін сөздер:** *Arthrophytum*, аридті экожүйелер, морфологиялық бейімделу, *Amaranthaceae*, биологиялық белсенді қосылыстар, антиоксиданттық белсенділік, этнофармакология, С4 фотосинтез, Орта Азия флорасы, шөл галофиттері.

А.Е. Нұрманбек<sup>1\*</sup>, Н.З. Ахтаева<sup>1</sup>, А.Н. Киекбаева<sup>2</sup>, Т.С. Ибрагимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова, Алматы, Казахстан

\*e-mail: aydyn.nurmanbek@gmail.com

### Устойчивая флора пустыни: комплексный обзор адаптации и терапевтического потенциала *Arthrophytum*

В данной обзорной статье представлен комплексный анализ рода *Arthrophytum* Schrenk (семейство Chenopodiaceae), включающего субкустарниковые виды, адаптированные к аридным регионам Евразии и Северной Африки. Цель исследования – обобщить современные научные знания о таксономии, морфологических характеристиках, экологических адаптациях, биогеографическом распространении и фармакологическом потенциале видов *Arthrophytum*. Для сбора данных использовались как современные научные базы данных (SciFinder, Google Scholar, ScienceDirect и др.), так и традиционные источники (ботанические флоры, гербарные коллекции, этноботанические отчеты).

Особое внимание уделено видам с заметной экологической пластичностью и эндемичным распространением в Казахстане (*A. iliense*, *A. balchaschense*, *A. pulvinatum* и др.). В обзор включены результаты морфологических, анатомических и молекулярных анализов, позволивших уточнить таксономический статус ряда видов, в том числе переклассифицировать *A. balchaschense* в род *Haloxylon*. Также обсуждаются фармакогностические свойства таких видов, как *A. schmittianum* и *A. scoparium*, подчеркивая их антиоксидантную, антимиотическую, нейропротекторную и антидиабетическую активность.

Полученные данные подчеркивают важность *Arthrophytum* как ключевого компонента биоразнообразия пустынь и перспективного источника биологически активных природных соединений. В обзоре выявлены существующие пробелы в исследованиях и намечены приоритеты для будущих междисциплинарных исследований, включая сохранение, устойчивое использование и фармакологическое изучение рода.

Статья предназначена для ботаников, биомедицинских исследователей, фармакологов, экологов, специалистов по лекарственным растениям и биоразнообразию, особенно для тех, кто изучает стратегии растений в засушливых условиях.

**Ключевые слова:** *Arthrophytum*, аридные экосистемы, морфологическая адаптация, *Amaranthaceae*, биологически активные соединения, антиоксидантная активность, этнофармакология, С4 фотосинтез, флора Средней Азии, пустынные галофиты.

## Introduction

The genus *Arthrophytum* (commonly referred to as “saxaulchik”) comprises subshrubs from the family *Amaranthaceae* (formerly *Chenopodiaceae*), well-adapted to the harsh, arid climates of Eurasia and North Africa. These plants thrive in alkaline, gypsum-rich soils and are crucial to desert ecosystems, aiding soil stabilization and supporting biodiversity.

Scientific interest in *Arthrophytum* has grown substantially in recent years due to its ecological plasticity and emerging pharmacological relevance.

Particular species—including *A. scoparium*, *A. schmittianum*, and *A. lehmannianum*—are traditionally used in folk medicine and have demonstrated antioxidant, antidiabetic, and anti-melanogenic activities. Preliminary pharmacognostic studies prove the availability of phenolic compounds, flavonoids, and alkaloids with viable biological activity.

This review aims to consolidate current scientific knowledge on the taxonomy, morphological characteristics, ecological adaptations, and biogeographical distribution of *Arthrophytum* species. Special emphasis is placed on species with applied value, justifying further research and conservation efforts.

## Materials and methods

This work aims to provide a comprehensive overview of existing scientific data on the genus *Arthrophytum*, with a particular focus on its taxonomy, morphology, ecological adaptations, and pharmacological potential. To ensure completeness and reliability, a structured literature search was conducted using both modern scientific databases and traditional sources.

Materials were selected using keyword searches, including «*Arthrophytum*», «*Chenopodiaceae*», «*Amaranthaceae*», «desert halophytes», «biologically active compounds», and «phytochemistry». The search was conducted across several academic databases, such as SciFinder, Google Scholar, ISI Web of Knowledge, and ScienceDirect, which were selected for their extensive coverage of botanical, ecological, and pharmacological literature.

In addition to peer-reviewed scientific articles, information was gathered from local and international botanical monographs, floras, field guides, dissertations, and ethnobotanical reports, especially those addressing underexplored taxa of Central Asia. Traditional medical texts were also examined to trace the cultural and therapeutic use of *Arthrophytum* species by local populations.

Macroscopic investigations of *Arthrophytum longibracteatum* employed classical botanical methods. The analysis was based on herbarium specimens collected during an expedition in June 2024. Plant collection followed the methodology proposed by A.K. Skvortsov (1977). For specimen identification, key botanical references were consulted. (*Flora of Kazakhstan*, 1956–1966; *Illustrated Guide to the Plants of Kazakhstan*, 1969, 1972; *Key to the Plants of Central Asia*, 1968–1993). Nomenclature followed the standards established by S.K. Cherepanov (Cherepanov, 1995). Updated floristic zoning schemes were used to map species distribution in Kazakhstan (Aralbaev, 2002).

The criteria for source selection included:

- Descriptions or revisions of *Arthrophytum* taxonomy;
- Data on morphological features and anatomical adaptations;
- Information on ecological distribution, soil preferences, and plant community structures;
- Results of phytochemical or pharmacological studies;
- Records of ethnomedicinal use and conservation status assessments.

Sources lacking methodological transparency or based solely on unverified data were excluded to maintain scientific rigor. When necessary, Russian- and Kazakh-language publications were translated and evaluated using the same criteria, as a significant portion of the region's botanical knowledge remains unpublished in English. The literature review was written in four thematic areas: taxonomy, interspecific characteristics, morphological characteristics, ecology with adaptive features, and pharmacological potential.

The study of modern and traditional databases gave us a comprehensive and multifaceted picture of the genus *Arthrophytum* and revealed unexplored areas and promising directions for future scientific work.

## Results and discussion

### *Morphological characteristics of the genus Arthrophytum*

The morphological features of the genus *Arthrophytum* are characterised by opposite leaves that are sessile and fused at the base, with a surface covered with curly hairs. Plants of this genus often form loose, cushion-like semi-shrubs with short, twisted woody stems. Their knotty, lignified branches bear numerous annual herbaceous shoots, which may be simple or weakly branched, and almost entirely conceal the flowers.

The genus *Arthrophytum* Schrenk comprises approximately 20 species, eight of which are native to Kazakhstan. The taxonomic classification of the genus is as follows:

- Division: Magnoliophyta
- Class: Magnoliopsida
- Family: Chenopodiaceae

These are low-growing subshrubs or dwarf shrubs exhibiting a wide variety of morphological traits, particularly in the structure of their flowers, leaves, and stems.

The flowers are small and bisexual, located in the axils of bracts that resemble stem leaves. These bracts are longer than the flowers themselves and are accompanied by two smaller bracteoles. The perianth is nearly spherical, consisting of five free, almost rounded sepals. During fruit development, wing-like structures form at the apex of the pericarp, which in some species are replaced by callus-like thickenings. There are five stamens, which are united into a disk surrounding the ovary. The margin of the disk is thickened, glandular or fringed, often with semicircular or bilobed protrusions. The an-

thers bear small appendages on their upper side, and the ovary has two stigmas. The seeds are positioned horizontally and contain a spirally coiled embryo (Stepanova & Safronova, 2019).

### ***Morphological Characteristics of Arthrophytum longibracteatum***

*Arthrophytum longibracteatum* Eug. is a subshrub species that, in some cases, forms loose, cushion-like clumps. The central stem is shortened, thickened, often curved, and displays well-developed branching. The woody branches are knotty, with numerous annual herbaceous shoots developing at the nodes. These shoots are generally simple or weakly branched and are almost entirely covered with flowers.

The leaves at the lower part of the shoots are thickened, needle-shaped, cylindrical, sharp, and slightly curved, measuring 10–12 mm in length. The bracts are lanceolate with an ovate base and are approximately twice as long as the flowers. The flowers are grouped in six pairs per inflorescence; the perianth is nearly spherical, about 1.5 mm in diameter, with ovate, convex segments. The hypogynous disc is shallow, cup-shaped, and lobed. Stamens possess linear-subulate filaments and ovate anthers. There are two styles with dissected, lanceolate stigmas that broaden at the apex.

Flowering and fruiting occur from June to October. The species grows on takyrs (clay flats) and

stony plains of desert type, and is occasionally found on saline sandy areas. It is distributed in the Betpak-Dala region (lower reaches of the Sarysu River), the Balkhash-Alakol region (valleys of the Ili and Charyn rivers), as well as in Western China (Kuldja area).

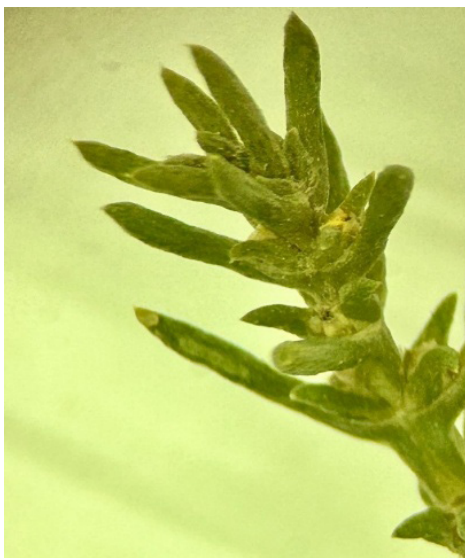
**Figure 1**

General view of *Arthrophytum longibracteatum*

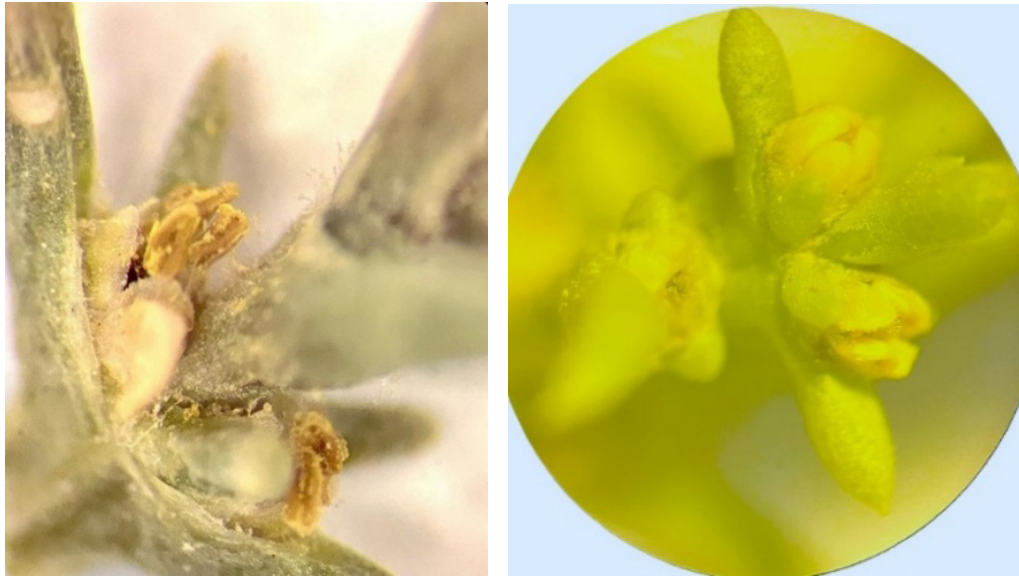


**Figure 2**

Structure of the aerial shoot of *Arthrophytum longibracteatum*



**Figure 3**  
Flower structure of *Arthrophytum longibracteatum*



This species is closely related to *A. subulifolium* Schrenk but differs by having awl-shaped, spiny bracts and leaves, as well as a generally shorter overall height. It is considered a critical taxon and is likely to represent an eastern race of *A. lehmannianum* Bge. ex Litw.

#### **Taxonomic Clarification Through Integrative Evidence**

This study presents a comprehensive comparative analysis of three desert-adapted species—*Arthrophytum longibracteatum*, *Arthrophytum balchaschense*, and *Haloxylon aphyllum*—combining morphological, anatomical, and molecular genetic data to resolve longstanding taxonomic uncertainties. Of particular focus is the ambiguous placement of *A. balchaschense*, whose classification within *Arthrophytum* has historically been based on superficial morphological traits rather than rigorous phylogenetic evidence.

The results are decisive: *A. balchaschense* shows a consistent pattern of alignment with the genus *Haloxylon* across all data streams. Morphologically, its young shoots and fruit structures resemble those of *H. aphyllum* far more than those of *A. longibracteatum*. Anatomically, cross-sections of stem tissue reveal nearly identical features between *A. balchaschense* and *H. aphyllum*, particularly in epidermal thickness and tissue layering. Most conclusively, molecular analyses of nrITS and *rps16* intron sequences place *A. balchaschense* firmly within the

*Haloxylon* clade, prompting its formal reclassification as *Haloxylon balchaschense* (Iljin) Osmonali, Veselova & Kudab.

An intriguing outlier, specimen B62 (*Arthrophytum* sp.), exhibited genetic signatures of both genera, raising the possibility of a hybrid origin. This finding hints at historical gene flow between *Arthrophytum* and *Haloxylon*, warranting further investigation.

*H. balchaschense* is a narrow endemic, restricted to Kazakhstan's central-eastern North Turanian deserts, where it inhabits solonchak and rubbly desert soils—an ecological preference consistent with other *Haloxylon* species. This refined classification not only clarifies phylogenetic relationships within the Amaranthaceae but also contributes to more accurate biodiversity assessment and conservation planning in Central Asia's arid zones (Osmonali et al., 2025).

#### **Ecological Adaptations and Geographic Distribution**

In Kazakhstan, eight species of the genus *Arthrophytum* Schrenk (commonly known as “seksewilche”) are found, five of which are endemic, meaning they occur exclusively within the country. This genus is considered part of the Turanian mesophyte group. One of its most remarkable representatives is the endemic and relict species *Arthrophytum pulvinatum* Litv., a cushion-forming plant first described by botanist D.I. Litvinov in 1913 (Polyakov, 1960; Lavrenko, 1962; Gureeva & Balashova, 2013).

The species *A. iliense*, *A. betpakdalense*, *A. kovinii*, and *A. pulvinatum* are primarily distributed in the Betpak-Dala and Balkhash-Alakol regions. In contrast, *A. lehmannianum* exhibits the broadest distribution range, occurring in seven floristic regions, including the Emba, Mangyshlak, and Aral Sea areas (Vintergoller, 1970). *A. lehmannianum* is a steppe desert halophyte with a fragmented range. Currently, its distribution extends from 52°30' to 83°E longitude, although until recently its northern boundary did not exceed 50°N latitude. This discovery broadens our understanding of the ecological tolerance and distribution potential of *Arthrophytum* species, contributing to general knowledge on plant adaptation to arid environments (Usen et al., 2024).

In the works of Usen S. and co-authors, herbarium data from the period 1935–1960 are cited, during which more than 60% of specimens were collected by expeditions led by prominent Soviet botanists. A significant contribution was made by Z.V. Kubanskaya, who is credited with approximately 20% of the collected specimens.

Herbarium data reveal the highest concentration of *Arthrophytum* species in the Betpak-Dala region (6 species, 27 specimens), followed by the Balkhash-Alakol region (4 species, 48 specimens) and the Dzhungarian Alatau (4 species, 6 specimens) (Vintergoller, 1970).

Ecological studies of *Arthrophytum iliense* have revealed significant adaptations to various types of arid soils and landscapes. This species demonstrates high ecological plasticity, thriving in a wide range of environmental conditions.

Typically, *A. iliense* forms communities on light gypsiferous loamy soils of arid-denudation plateaus. Interestingly, it is also found in association with *Nanophyton erinaceum* on weakly gypsiferous soils. In desert environments, *A. iliense* often dominates monodominant plant communities on gypsiferous soils, growing alongside perennial halophytes such as *Salsola orientalis* and *S. arbusculiformis*. Field observations show the species is well adapted to eroded, gravelly-gypsum loamy soils. *A. iliense* frequently forms mixed thickets with *Arthrophytum longibracteatum* on extremely dry stony plains. These communities are often adjacent to shrub associations (*Caragana balchashensis*, *Atraphaxis replicata*, etc.) that grow on meadow-brown soils along ephemeral watercourses. Such a distribution highlights the remarkable ecological flexibility of *A. iliense*, which is capable of establishing on poorly developed slope soils in canyon systems (Sultanova et al., 2020).

Our study also revealed an important biogeographic anomaly of the Chenopodiaceae family in Central Asia. The localized distribution of three *Arthrophytum* species (*A. balchashense*, *A. iliense*, *A. longibracteatum*) in the Junggar-Turan desert zone west of northern Kashgar suggests a relict distribution pattern. A shared evolutionary background is hypothesized with genera such as *Nanophyton*, *Petrosimonia*, *Londesia*, *Camphorosma*, and *Ceratocarpus*. These findings underscore the importance of continued interdisciplinary research in the region (Grubov, 2000).

#### ***Arthrophytum schmittianum*: A Promising Source of Antioxidant and Antimitotic Activity.**

Among the species of pharmacological interest, *Arthrophytum schmittianum* (family Chenopodiaceae) stands out as a regional endemic of El Bayadh, Algeria, traditionally used in folk medicine. Recent investigations have focused on the methanolic and tannin-rich extracts from various plant parts. These studies assessed total phenolic content, antioxidant activity using the DPPH method, and antimitotic effects on *Allium cepa* L. root tips (Dif et al., 2022). Phytochemical screening revealed considerable variation in phenolic concentrations across plant tissues. The ethyl acetate fraction of the bark demonstrated the highest antioxidant potential ( $IC_{50} = 0.16$  mg/mL). Meanwhile, the methanolic extract from twigs showed significant antimitotic activity, inhibiting root growth by 47%. Importantly, hemolytic assays indicated low toxicity for *A. schmittianum* extracts in concentrations ranging from 50–250 µg/mL ( $p > 0.05$ ). Only at 500 µg/mL was a minor increase in hemolysis (1.42%) observed. These results suggest that *A. schmittianum* is a promising candidate for further study as a natural source of bioactive compounds. In-depth research on its essential oil composition and broader pharmacological spectrum is warranted (Zohra & Fawzia, 2014).

#### ***Arthrophytum scoparium*: A Valuable Target for Phytochemical and Pharmacological Research.**

*Arthrophytum scoparium* – a halophytic species native to the deserts of North Africa, has attracted attention for its remarkable ability to survive in extreme environmental conditions—such as water scarcity and intense solar radiation. As a result, it synthesizes an array of bioactive molecules widely utilized in traditional medicine to treat ailments, including headaches, migraines, and neurological disorders.

Modern studies have identified several biological activities of *A. scoparium* extracts, including antioxidant effects, neuroprotective action, melanogenesis inhibition, and antidiabetic potential. The present review summarizes key findings related to the plant's therapeutic applications. According to the IUCN (2005), traditional preparations combine powdered fruits and stems with fatty bases to produce poultices effective against fungal skin infections, indicating the plant's potential for antifungal therapy (Othman et al., 2021).

High-performance liquid chromatography (HPLC) analysis of *A. scoparium* extracts identified the following main bioactive constituents: p-Coumaric acid, cinnamic acid, chrysoeriol, catechol. In addition, the plant contains cyanidin and caffeoylquinic acid, expanding its pharmacological potential.

Of special interest is the plant's rich alkaloid profile, which includes salsolinol, isosalsolinol, N-Methylisosalsolinol, salsolidine. These compounds suggest possible neuroprotective and psychotropic activities, opening avenues for drug development. *A. scoparium* is, therefore, a compelling candidate for continued phytochemical and pharmacological investigations to develop new pharmaceuticals and nutraceuticals (Belabdelli et al., 2023).

Among its many features, *A. scoparium* is particularly noted for its antioxidant capacity. Studies evaluating various extracts from the aerial parts of the plant identified high levels of phenolics, flavonoids, and tannins. The hydro-methanolic (ASE) and ethyl acetate (EAE) extracts exhibited the most pronounced antioxidant effects. ASE showed intense activity in both DPPH and ABTS assays ( $IC_{50} = 0.045$  and  $0.0017$  mg/mL, respectively), while EAE demonstrated 83.29% inhibition in the  $\beta$ -carotene/linoleic acid leaching test. In vivo results supported these findings: daily administration of ASE reduced lipid peroxidation and increased hepatic glutathione (GSH) levels. These results validate the traditional use of the plant in treating inflammation and oxidative stress-related conditions (Kaddour et al., 2019).

Research by Smach M.A. et al. demonstrated the neuroprotective effects of *A. scoparium* aqueous extract (ASAE) against galactose-induced neurotoxicity in a mouse model. Chronic galactose exposure led to cognitive impairment, increased malondialdehyde (MDA) levels, and elevated acetylcholinesterase (AChE) activity—indicative of oxidative stress. In contrast, administration of ASAE (300 mg/kg) reduced these markers, improved memory performance, and decreased AChE activity. These results

highlight the plant's potential in managing neurodegenerative disorders (Smach et al., 2020).

In a study by Chao H.C. et al. (2013), ethanolic extracts of *A. scoparium* (ASEE) inhibited melanin synthesis in B16 murine melanoma cells by downregulating tyrosinase and other melanogenic genes (Tyr, Trp-1, Mitf, and Mc1R). The active compounds—p-coumaric acid, catechol, and caffeoylquinic acid—support the plant's potential use in cosmeceuticals targeting hyperpigmentation (Chao et al., 2013).

Extracts of *A. scoparium* have shown vigorous inhibitory activity against  $\alpha$ -glucosidase, a key enzyme in carbohydrate metabolism. Boubrima Y. et al. (2018) reported that its phenolic extracts had the lowest  $IC_{50}$  ( $5.02 \mu\text{M}$ ) among the tested Saharan plants, indicating promising applications in the development of antidiabetic agents aimed at managing postprandial blood sugar levels (Boubrima et al., 2018).

The results of this review underscore the ecological, morphological, and pharmacological uniqueness of the genus *Arthrophytum*, particularly in the context of arid and semi-arid ecosystems of Central Asia and North Africa. The adaptive strategies observed across several species—including cushion-forming growth forms, gypsophily, and reduced leaf morphology—highlight a clear evolutionary response to extreme abiotic stressors such as salinity, drought, and high solar radiation. These adaptations are consistent with broader patterns found in desert halophytes of the family Chenopodiaceae.

The endemic status of five *Arthrophytum* species in Kazakhstan and their confinement to specific floristic regions such as Betpak-Dala and Balkhash-Alakol further support the genus as a key indicator of regional biodiversity and environmental stability. The relict nature of species such as *A. pulvinatum* and the fragmented distribution of *A. lehmannianum* reflect a complex evolutionary and biogeographical history shaped by climatic shifts and edaphic specialization. Herbarium records from the Soviet era, validated by recent field data, confirm consistent species distributions and offer a valuable baseline for future monitoring.

The taxonomic clarification of *A. balchaschense* as *Haloxylon balchaschense*, supported by morphological, anatomical, and molecular evidence, marks a significant step in resolving long-standing systematic ambiguities within the Amaranthaceae s.l. This integrative approach underscores the importance of combining classical taxonomy with molecular phylogenetics, particularly for underexplored desert taxa.

Species of the genus *Arthrophytum* belong to halophytes, i.e. plants adapted to growing in high salinity conditions. It is known that in response to stress factors such plants are able to accumulate significant amounts of primary and secondary metabolites. These compounds are of medical interest because of their diverse bioactive properties, including antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory and anti-tumour activity (Custódio et al., 2022; Ksouri et al., 2012).

According to thorough scientific studies, halophytes are considered as promising sources of phenolic compounds with significant potential for medical and pharmacological applications (Lopes et al., 2023).

From a pharmacological perspective, species such as *A. schmittianum* and *A. scoparium* demonstrate substantial therapeutic promise. Documented antioxidant, antimitotic, neuroprotective, and antidiabetic activities—correlated with high levels of phenolics, flavonoids, and specific alkaloids—make these species compelling candidates for the development of novel phytotherapeutics. The bioactivity of ethyl acetate and methanolic fractions, as shown in multiple assays (e.g., DPPH, AChE inhibition, melanogenesis suppression), suggests a chemically diverse metabolome adapted for survival under oxidative stress, which may also be pharmacologically exploitable.

Importantly, the presence of both traditional medicinal uses and scientifically validated bioactivity in these species illustrates the value of ethnobotanical knowledge as a foundation for modern pharmacognostic research. However, the lack of standardized extraction methods, limited in vivo testing, and insufficient toxicity profiling remain obstacles to clinical translation.

According to ecological data, *A. iliense* stands out as an adaptive plant that grows on a wide range of soil types and in various plant communities. Its ability to grow in poorly developed soils and saline environments and to adapt to arid ecosystems demonstrates its ecological significance.

The review data show that the genus *Arthrophytum* is the subject of in-depth interdisciplinary research. Its ecological role, systematics, and pharmacological potential are directing researchers' efforts towards preserving genomic, metabolomic, ecological, and pharmacognostic data for better understanding and practical application.

## Conclusion

The genus *Arthrophytum* is a group of semi-shrubby plants with a high degree of adaptation to

extreme environmental conditions. Their unique morphological and anatomical features demonstrate their adaptation to salty, poorly developed soils and highlight their ecological significance and evolutionary activity. Species with endemic characteristics and relict distributions require special attention, and measures should be taken to preserve them.

A multifaceted analysis of the genus, including herbarium, morphological, anatomical, and molecular data, clarified systematic ambiguities in the case of *A. Balchaschense*, resulting in its phylogenetic reclassification from *Arthrophytum* to the genus *Haloxyton*. This once again proves the need for an integrative approach in taxonomic studies.

In addition, species of the genus *Arthrophytum* are promising subjects for pharmacognostic research. The presence of antioxidant, antimitotic, neuroprotective, and antidiabetic activity and high content of biologically active substances makes it a potential natural source for medicines. Particularly promising are *A. schmittianum* and *A. scoparium*, whose bioactive compounds may serve as a foundation for the development of novel phytopharmaceuticals and nutraceuticals.

Thus, *Arthrophytum* should be regarded not only as a vital component of Central Asian and North African desert biodiversity but also as a valuable source of natural compounds with significant applied potential. Future research should focus on in-depth phytochemical profiling, pharmacological characterization, and elucidation of adaptive mechanisms, alongside the development of strategies for the conservation and sustainable utilization of these plants.

## Conflict of interest – not declared

This material has not been previously submitted for publication in other publications and is not under consideration by other publishers. There has been no funding from outside organisations or medical representations in the conduct of this work.

## Author contributions:

*A.E. Nurmanbek: Investigation, Data curation, Writing – original draft. T.S. Ibragimov: Conceptualization, Methodology, Supervision, Writing – review & editing. L.N. Kiekbayeva: Formal analysis, Validation, Writing – review & editing. N.Z. Akh-taeva: Conceptualization, Supervision, Project administration, Writing – review & editing.*

## References

- Aralbaev, N. K. (2002). A new floristic zoning scheme of Kazakhstan (materials for the second edition of *Flora of Kazakhstan*). *Poisk. Series of Technical and Natural Sciences*, 66–72.
- Belabdelli, F., et al. (2023). Effect of phytoconstituents from traditionally used herbs on dissolution and inhibition of kidney stones (CaOx). *Farmacia*, 71(6), 1224–1231.
- Boubrima, Y., et al. (2018). Inhibitory effect of phenolic extracts from four plants of the Atlas Sahara region of Algeria on  $\alpha$ -glucosidase activity. *Current Enzyme Inhibition*, 14(3), 196–202.
- Chao, H. C., et al. (2013). *Arthrophytum scoparium* inhibits melanogenesis via downregulation of tyrosinase and melanogenic genes in B16 melanoma cells. *Experimental Dermatology*, 22(2), 131–136.
- Cherepanov, S. K. (1995). *Vascular plants of Russia and neighboring countries (within the former USSR)*. St. Petersburg: [Publisher unknown].
- Custódio, L., Garcia-Caparrós, P., Pereira, C. G., & Castelo-Branco, P. (2022). Halophyte plants as potential sources of anticancer agents: A comprehensive review. *Pharmaceutics*, 14(11), 2406. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14112406>
- Dif, M. M., et al. (2022). Phytochemical study of phenolic compounds and biological activity of *Arthrophytum schmittianum*. *Flora of Kazakhstan (Vols. 1–9)*. (1956–1966). Alma-Ata.
- Grubov, V. I. (2000). *Plants of Central Asia: Herbarium collections from China and Mongolia (Vol. 2: Chenopodiaceae)*. Enfield: Science Publishers.
- Gureeva, I. I., & Balashova, V. F. (2013). Type specimens of Chenopodiaceae Vent. in the Krylov Herbarium (TK). *Systematic Notes of the Krylov Herbarium, Tomsk State University*, (108), 3–12.
- Illustrated Guide to the Plants of Kazakhstan (Vols. 1–2). (1969, 1972). Alma-Ata.
- Kaddour, S. M., et al. (2019). Acute, subacute, and antioxidant properties of aerial parts of *Arthrophytum scoparium*. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 10(9), 4167–4175.
- Key to the Plants of Central Asia (Vols. 1–10). (1968–1993). Tashkent.
- Ksouri, R., Ksouri, W. M., Jallali, I., Debez, A., Magné, C., Isoda, H., & Abdelly, C. (2012). Medicinal halophytes: Potent source of health-promoting biomolecules with medical, nutraceutical, and food applications. *Critical Reviews in Biotechnology*, 32(4), 289–326. <https://doi.org/10.3109/07388551.2011.630647>
- Lavrenko, E. M. (1962). *Main features of the botanical geography of the deserts of Eurasia and North Africa*. Moscow–Leningrad: Academy of Sciences of the USSR.
- Lopes, M., Sanches-Silva, A., Castilho, M., Cavaleiro, C., & Ramos, F. (2023). Halophytes as source of bioactive phenolic compounds and their potential applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(8), 1078–1101. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1959295>
- Osmonali, B. B., et al. (2025). Contribution to the flora of Kazakhstan: Genera *Arthrophytum* and *Haloxylon*. *Plant Systematics and Evolution*, 311(2), Article 6.
- Othman, M. B., Neffati, M., & Isoda, H. (2021). Evaluation of anti-stress effects of five Tunisian aromatic and medicinal plants in vitro. *Journal of Herbal Medicine*, 27, Article 100238. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2021.100238>
- Polyakov, P. P. (1960). Genus *Arthrophytum* Schrenk. In *Flora of Kazakhstan (Vol. 3, pp. 299–302)*. Alma-Ata: Academy of Sciences of KazSSR.
- Smach, M. A., et al. (2020). *Arthrophytum scoparium* extract improves memory impairment and acetylcholinesterase activity in mice brains. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 21(6), 480–487.
- Stepanova, N. Y., & Safronova, I. N. (2019). *Arthrophytum lehmannianum* (Chenopodiaceae) – a new species for the flora of Russia. *Botanical Journal*, 104(5), 811–814.
- Sultanova, B. M., et al. (2020). Spatial structure of the vegetation cover in Sharyn National Natural Park. *Eurasian Journal of Ecology*, 65, 38–50.
- Üsen, S., et al. (2024). Species of the genus *Arthrophytum* Schrenk in the herbarium collections (AA). *Spiraeanthus*, 1, 80–85.
- Vintergoller, B. A. (1970). On clarifying the range of *Arthrophytum pulvinatum* Litv. *Bulletin of the Academy of Sciences of KazSSR*, 2(298), 72–74.
- Zohra, M., & Fawzia, A. (2014). Hemolytic activity of various plant extracts used in Algeria. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 5(8), 495–500.

**Information about the authors:**

A.E. Nurmanbek – doctoral student of the 2nd year of study of the Department of Biodiversity and Bioresources of Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aydyn.nurmanbek@gmail.com).

N.Z. Akhtaeva – professor of the Department of Biodiversity and Bioresources of Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: akhtaeva@mail.ru).

L.N. Kiyekbayeva – associate professor of the Department of Pharmaceutical Technology, School of Pharmacy, Asfendiyarov Kazakh National Medical University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: lashynk@mail.ru).

T.S. Ibragimov – associate Professor of the Department of Biodiversity and Bioresources, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan; e-mail: ecopastbish@mail.ru).

**Авторлар туралы мәлімет:**

А.Е. Нұрманбек – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биоәртүрлілік және биоресурстар кафедрасының 2-курс докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: aurdun.nurmanbek@gmail.com).

Н.З. Ахтаева – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биоәртүрлілік және биоресурстар кафедрасының профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: akhtaeva@mail.ru).

Л.Н. Киекбаева – С.Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті Фармация мектебінің фармацевтикалық технология кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: lashynk@mail.ru).

Т.С. Ибрагимов – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биоәртүрлілік және биоресурстар кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: ecorastbish@mail.ru).

**Сведения об авторах:**

А.Е. Нұрманбек – докторант 2 курса обучения кафедры биоразнообразия и биоресурсов КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: aurdun.nurmanbek@gmail.com).

Н.З. Ахтаева – профессор кафедры биоразнообразия и биоресурсов КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: akhtaeva@mail.ru).

Л.Н. Киекбаева – ассоциированный профессор кафедры фармацевтической технологии школы фармации, Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова (Алматы, Казахстан, e-mail: lashynk@mail.ru).

Т.С. Ибрагимов – ассоциированный профессор кафедры биоразнообразия и биоресурсов КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: ecorastbish@mail.ru).

Поступила 13 июля 2025 года

Принята 25 марта 2026 года

**P.V. Vesselova<sup>1</sup>**, **G.M. Kudabayeva<sup>1</sup>**, **D.Sh. Abdildanov<sup>1\*</sup>**,  
**N.V. Friesen<sup>2</sup>**, **A.Kh. Kenesbay<sup>1</sup>**,  
**R.K. Akhmetzhanova<sup>1</sup>**, **O.M. Maslova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Botany and Phytointroduction, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Botanical Garden of the University of Osnabrück, Osnabrück, Germany

<sup>3</sup>Altai State University, Barnaul, Russia

\*e-mail: abdildanov00@mail.ru

## NEW LOCALITIES OF RARE FLORA SPECIES IN THE KAZAKH PART OF THE KYRGYZ ALATAU RANGE

The Kyrgyz Alatau, located at the junction of the Northern and Western Tien Shan ranges, forms an ecotonal zone between the Chuy Valley to the north and the Kochkor, Susamyr, and Talas valleys to the south. Its border position between different orographic and climatic regions determines the mosaic nature of landscapes and, consequently, the high diversity of various geo-elements within the flora. According to recent studies, the flora of the Kyrgyz Alatau (within Kazakhstan) includes 1,473 species of vascular plants, belonging to 504 genera and 94 families, which represents almost 50% of the species of the Northern Tien Shan flora as a whole. To date, between 41 and 46 rare species included in the national Red Book have been recorded in the Kazakh (western) part of the range by various authors, five of which are endemic to the Kyrgyz Alatau. Field research conducted in 2022–2025 led to the identification of 15 new localities of rare species in the Kazakh part of the Kyrgyz Alatau. Most species are threatened; however, some taxa, such as *Allium suworowii*, *Celtis caucasica*, *Pyrus regelii*, and *Zabelia corymbosa*, form stable local populations.

The obtained results supplement the information on the distribution and status of populations of rare species in the flora of the western part of the Kyrgyz Alatau and emphasize the need to continue monitoring in this biogeographically significant ecotonal region.

**Keywords:** Kyrgyz Alatau Range, rare species, flora.

П.В. Веселова<sup>1</sup>, Г.М. Кудобаева<sup>1</sup>, Д.Ш. Абдилданов<sup>1\*</sup>, Н.В. Фризен<sup>2</sup>,  
 А.Х. Кенесбай<sup>1</sup>, Р.К. Ахметжанова<sup>1</sup>, О.М. Маслова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ботаника және фитоинтродукция институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Оснабрюк университетінің Ботаникалық бағы, Оснабрюк, Германия

<sup>3</sup>Алтай мемлекеттік университеті, Барнаул, Ресей

\*e-mail: abdildanov00@mail.ru

### Қазақстан бөлігіндегі Қырғыз Алатауы жотасының сирек кездесетін флора түрлерінің жаңа таралу нүктелері

Қырғыз Алатауы Солтүстік және Батыс Тянь-Шань жоталарының түйіскен тұсында орналасқан және солтүстігінде Шу алқабы мен оңтүстігінде Қоқор, Сұсамыр және Талас алқаптары арасындағы экотондық аймақ болып табылады. Оның әртүрлі орографиялық және климаттық аймақтар шекарасында орналасуы ландшафттардың мозаикалық құрылымын және нәтижесінде флора құрамындағы әртүрлі геоэлементтердің жоғары әртүрлілігін анықтайды. Қазіргі зерттеулерге сәйкес, Қырғыз Алатауының (Қазақстан аумағында) флорасы 504 тұқымдасқа жататын 1 473 жоғары сатылы өсімдік түрін қамтиды, бұл Солтүстік Тянь-Шань флорасының жалпы түрлерінің шамамен 50%-ын құрайды. Қазіргі таңда жотаның Қазақстандағы (батыс) бөлігінде әртүрлі авторлар республикалық Қызыл кітапқа енген 41–46 сирек кездесетін түрді анықтаған, олардың 5-еуі Қырғыз Алатауына эндемик болып табылады. 2022–2025 жылдары жүргізілген дала зерттеулері Қазақстан бөлігінде сирек кездесетін түрлердің 15 жаңа өсіп шығу нүктесін анықтауға мүмкіндік берді. Көптеген түрлер қауіп-қатер астында болса да, *Allium suworowii*, *Celtis caucasica*, *Pyrus regelii* және *Zabelia corymbosa* сияқты кейбір таксондар тұрақты жергілікті популяцияларды қалыптастырады. Алынған нәтижелер Қырғыз Алатауының батыс бөлігінің флорасындағы сирек кездесетін түрлердің таралуы мен популяция жағдайы туралы мәліметтерді толықтырып, биогеографиялық маңызы бар экотондық өңірде мониторингті жалғастыру қажеттігін атап көрсетеді.

**Түйін сөздер:** Қырғыз Алатауы жотасы, сирек кездесетін түр, флора.

П.В. Веселова<sup>1</sup>, Г.М. Кудабаева<sup>1</sup>, Д.Ш. Абдилданов<sup>1\*</sup>, Н.В. Фризен<sup>2</sup>,  
А.Х. Кенесбай<sup>1</sup>, Р.К. Ахметжанова<sup>1</sup>, О.М. Маслова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт ботаники и фитоинтродукции, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Ботанический сад Университета Оснабрюк, Оснабрюк, Германия

<sup>3</sup>Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

\*e-mail: abdildanov00@mail.ru

### Новые местонахождения редких видов флоры казахстанской части хребта Киргизского Алатау

Киргизский Алатау, расположенный на стыке хребтов Северного и Западного Тянь-Шаня, представляет собой экотонную зону между Чуйской долиной на севере и Кочкорской, Сусамырской и Таласской долинами на юге. Его пограничное положение между различными орографическими и климатическими регионами обуславливает мозаичность ландшафтов и как следствие высокое разнообразие различных геоэлементов в составе флоры. Согласно современным исследованиям, флора Киргизского Алатау (в пределах Казахстана) насчитывает 1 473 вида сосудистых растений, относящихся к 504 родам и 94 семействам или почти 50 % от видов флоры Северного Тянь-Шаня в целом. На настоящий момент в казахстанской (западной) части хребта разными авторами отмечено от 41 до 46 редких видов, включённых в республиканскую Красную книгу, 5 из которых являются эндемичными для Киргизского Алатау. Полевые исследования, проведённые в 2022–2025 гг., позволили выявить 15 новых местонахождений редких видов в казахстанской части Киргизского Алатау. Большинство видов находятся под угрозой, однако отдельные таксоны, такие как *Allium suworowii*, *Celtis caucasica*, *Pyrus regelii* и *Zabelia corymbosa* формируют стабильные локальные популяции. Полученные результаты дополняют сведения о распространении и состоянии популяций редких видов флоры западной части Киргизского Алатау и подчёркивают необходимость продолжения мониторинга в этом биогеографически значимом экотонном регионе.

**Ключевые слова:** хребет Киргизский Алатау, редкий вид, флора.

### Introduction

According to the botanical and geographical zoning of Kazakhstan, the Kyrgyz Alatau belongs to the Kyrgyz Mountain subprovince of the Jungar–North Tien Shan province, within the Iran–Turan subregion of the Saharo-Gobi Desert region (Rachkovskaya, 2003). It forms an ecotonal belt that separates the Chuy Valley to the north from the Kochkor, Susamyr, and Talas valleys to the south, situated between the ranges of the Northern and Western Tien Shan.

This border position of the Kyrgyz Alatau between different orographic and climatic regions determines the high mosaic structure of landscapes and the significant diversity of its natural complexes. In turn, this promotes the coexistence in the flora of both distinct geo-elements (desert, steppe, and mountain) and entire floristic complexes, resulting in a high level of botanical diversity and ecotonal character. Therefore, the Kyrgyz Alatau range holds important biogeographical significance, particularly in the context of botanical and geographical zoning.

According to recent data, the flora of the Kyrgyz Alatau comprises at least 1,473 species of vascular plants, belonging to 504 genera and 94 families (Zhaylybayeva, 2024). Of the total number of higher vascular plant species of the Northern Tien Shan

(Baitenov, 1985), 49.9% are represented in the flora of the Kyrgyz Alatau.

Turning to the discussion of the rare species of the Kyrgyz Alatau flora, it should be noted that, according to Mukhtubayeva S.K. (Mukhtubayeva et al., 2017), 41 rare species listed in the Red Book of the Republic of Kazakhstan (Red Data Book of Kazakhstan, 2014) are found in the flora of its Kazakh part. In the dissertation study by T.M. Muratova, “Analysis of the Flora of the Western Part of the Kyrgyz Alatau” (Zhaylybayeva, 2024), information is provided for this territory on 46 rare Red Book species. In addition, the Kyrgyz Alatau hosts five endemic plant species (Kubentayev et al., 2024).

The aim of the present study was to identify new localities of rare plant species in the Kyrgyz Alatau and to clarify information on their status. One of the key motivations for this research was the establishment in 2025 of the regional state nature park (hereinafter RSNP) “Merke” within the study area, which was granted the status of a specially protected natural area. The park covers an area of over 86,000 hectares. Its creation opens new opportunities for the development of ecotourism and sustainable nature management based on enhancing the level of environmental education among the population, including the conservation of rare plant species.

## Materials and methods

The objects of the study were rare plant species identified during field research conducted in 2024–

2025 within the kazakh part of the Kyrgyz Alatau range. In addition, the list of new rare species includes previously unpublished points discovered during expedition trips in 2022.

**Figure 1**

*Rare species of the Kyrgyz Alatau*

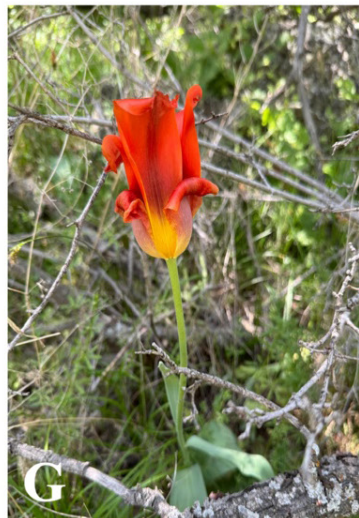
(A – *Armeniaca vulgaris* Lam., B – *Pistacia vera* L., C – *Pyrus regelii* Rehder, D – *Sorbus persica* Hedl)



**Figure 2**

*Rare species of the Kyrgyz Alatau*

(A – *Allium longicuspis* Regel, B – *Allium margaritae* B. Fedtsch., C – *Allium renardii* Regel,  
D – *Allium suworowii* Regel, E – *Arum korolkowii* Regel,  
F – *Juno coerulea* (B. Fedtsch.) Poljakov, G – *Tulipa greigii* Regel)



Standard floristic and cartographic research methods were employed during the fieldwork. The collection and processing of herbarium material followed the methodology of I.I. Guryeva (Guryeva, 2013). Plant species identification was carried out based on the 9-volume edition Flora of Kazakhstan (Pavlov, 1956–1966) and the Illustrated Identification Guide (Goloskokov, 1969–1972). Species names were aligned with current botanical nomenclature data using online resources: Plantarium.ru and Plants of the World Online (POWO) (Plantarium, 2007–2026; POWO, 2026).

For mapping the localities of rare plant species in the kazakh (western) part of the Kyrgyz Alatau range, QGIS 3.40 software was used (accessed on January 16, 2026; <https://qgis.org>).

### Results and discussion

In the course of field research conducted in the fall of 2024 and spring of 2025 as part of the

implementation of grant AR23484591 “Comprehensive research (floristic, molecular genetic and resource) on the *Allium* L. genus of the Kyrgyz Alatau cross-border range – a scientific foundation for the management of the region’s natural resources”, as well as on the basis of our own observations in 2022, new localities of 15 rare species of flora of the Kyrgyz Alatau were identified. Of these, 11 species are included in the Red Book of the Republic of Kazakhstan (Red Data Book of Kazakhstan, 2014) and 13 are included in the Regional Red Book of the Zhambyl region (Red Data Book of Zhambyl region, 2007), which indicates the high local value of these taxa. In addition, the list below includes 2 rare species for the flora of the Kyrgyz Alatau.

Here is a list of new localities of rare (within Kazakhstan) species of the Kyrgyz Alatau with an indication of administrative districts, gorges and altitude. In accordance with the recorded coordinates, maps of their habitats were formed (Figure 3).

**Table 1**  
*Rare species of the Kyrgyz Alatau*

№	Species	Habitats	Is there a threat to the Kyrgyz Alatau?	Note
<i>Species included in the Red Book of the Republic of Kazakhstan (2014)</i>				
1	<i>Armeniaca vulgaris</i> Lam.	29.09.2022 Aktiken Gorge, within the territory of the Merken RSNP, height 1361 m a.s.l.	+	Places of natural growth are limited
		Aktiken Gorge, within the territory of the Merken RSNP, height 1390 m a.s.l.		
		Aktiken gorge, within the territory of the Merken RSNP, height 1462 m a.s.l. T. Ryskulovsky district, Makpal gorge, 1100 m a.s.l.		
2	<i>Allium suworowii</i> Regel	Turar, Ryskulov district, Makpal gorge. 03.05.2025. Altitude 1182 m a.s.l.	–	It has an anthropophilic character
		Turar Ryskulov district, Syugaty gorge. 03.05.2025. Altitude 1270 m a.s.l.		
3	<i>Arum korolkowii</i> Regel	T. Ryskulov district, Makpal gorge (1260 m, 1100m) (2 locations)	+	Narrow stenotopic appearance
4	<i>Celtis caucasica</i> Willd.	01.10.2022 Aktiken gorge, within the territory of the Merken RSNP high. 1260 m	–	It is not uncommon, including on the territory of RSNP
		Zhambyl district, Makpal gorge		

Continuation of the table

№	Species	Habitats	Is there a threat to the Kyrgyz Alatau?	Note
5	<i>Juno coerulea</i> (B. Fedtsch.) Poljakov	04.05.2025 Turar, Ryskulov district, Syugaty gorge (2 locations) (1028 m, 1000 m)	+	Places of natural growth are limited
6	<i>Pistacia vera</i> L.	6.05.2025 Zhambyl district, Uzynbulak gorge (height 1100 m), Syugaty (1021 m)	+	It is found only in the western part of the range
7	<i>Paeonia intermedia</i> C.A.Mey.	29.09.2022 Merke Gorge, within the territory of the Merke RSNP, height 1382 m a.s.l.	+	Gathering by the local population for bouquets
8	<i>Tulipa greigii</i> Regel	06.05.2025 Zhambyl district, Tastambek gorge (1113 m), Karasai gorge (1300 m.)	+	Collection of bulbs by the local population and for bouquets (numerous diggings were found in the Almaly-Sai gorge)
9	<i>Sorbus persica</i> Hedl.	06.05.2025 Zhambyl district, Tastambek gorge (1100 m)	+	Places of natural growth are very limited
10	<i>Malus sieversii</i> (Ledeb.) M. Roem.	29.09.2022 r. Aktiken Gorge, within the territory of the Merke RSNP, height 1375 m a.s.l. Aktiken Gorge, within the territory of the Merke RSNP, height 1390 m a.s.l. Aktiken gorge, within the territory of the Merke RSNP, height 1480 m a.s.l.	+	Places of natural growth are very limited
11	<i>Zabelia corymbosa</i> (Regel & Schmalh.) Makino	21.09.2022 r. Aktiken Gorge, within the territory of the Merken RSNP, height 1390 m a.s.l. Aktiken gorge, within the territory of the Merken RSNP, height 1480 m a.s.l.	–	It is not uncommon, including on the territory of the RSNP
<b>Species also included in the Red Book of Zhambyl region (2014)</b>				
12	<i>Allium longicauspis</i> Regel	Turar Ryskulovsky district, Syugaty gorge. 27.08.2024, altitude 1170 m a.s.l.	+	New location
13	<i>Pyrus regelii</i> Rehder	04.05.2025 Turar Ryskulovsky district, Makpal gorge (1100 m)	–	It is not uncommon, including on the territory of RSNP
<b>Rare species of flora of the Kazakh part of the Kyrgyz Alatau range</b>				
14	<i>Allium margaritae</i> B. Fedtsch.	26.08.2024. Zhambyl region, Zhambyl district, Ulken Almalysay gorge, southern slope. Altitude 1200 m a.s.l.	+	Places of natural growth are limited
15	<i>Allium renardii</i> Regel	21.08.2025. Merke district, south of the village of Aktogan, the valley of the Molaly River, the Molaly Gorge. Altitude 1911 m a.s.l.	+	New location

Note: The symbol «+» indicates that there is a threat to the survival of the species, while the symbol «–» indicates that there is no such threat.

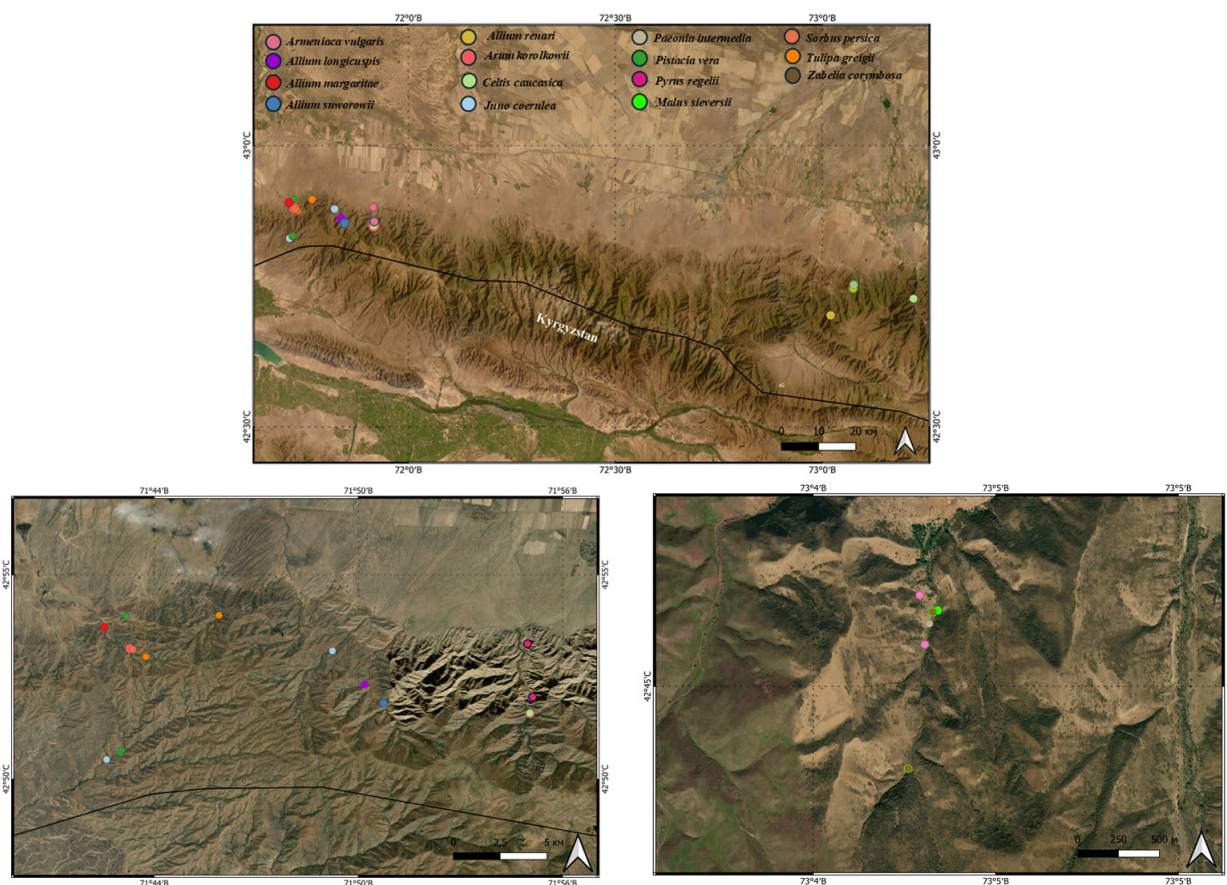
RSNP\* – Regional State Nature Park

Most of the rare species listed in Table 1 are threatened within the Kyrgyz Alatau; therefore, the establishment of the RSNP “Merke” is of great importance for their in situ conservation. At the same time, species such as *Allium suworowii*,

*Celtis caucasica*, *Zabelia corymbosa*, and *Pyrus regelii* do not show immediate threats to their survival in this territory, which may indicate stable local populations or favorable ecological conditions.

**Figure 3**

Map of the location of rare species of the Kyrgyz Alatau



A separate note should be made regarding three representatives of the genus *Allium* L. Firstly, *Allium sativum* L. (*Allium longicuspis* Regel), which is included in the Regional Red Book of the Zhambyl Region (Red Data Book of Zhambyl region, 2007). During the autumn field expeditions of 2024 in the Kyrgyz Alatau, one population of this species was discovered (Table 1). Its small size is largely due to local harvesting of the plant for food purposes. Secondly, during field research conducted under the grant project AR23484591, new localities of two additional onion species were identified in the Kyrgyz Alatau: *Allium margaritae* (autumn 2024) and *Allium renardii* (autumn 2025). The rarity status of

*A. renardii* for this region and for Kazakhstan as a whole requires further clarification (Gemejiyeva et al., 2025; Vesselova et al., 2025).

### Conclusion

In summary, it should be noted that the Kyrgyz Alatau is one of the key transboundary ecological territories for the conservation of rare plant species in Kazakhstan. The significant number of rare species found in the flora of this range demonstrates its high floristic uniqueness and confirms the need for further scientific, including monitoring, research.

## Funding

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant

AP23484591 “Comprehensive research (floristic, molecular genetic and resource) on the *Allium* L. genus of the Kyrgyz Alatau cross-border range – a scientific foundation for the management of the region’s natural resources” (2024–2026)).

## References

- Rachkovskaya, E.I. (2003). Principy i osnovnye edinicy rajonirovaniya // Botanicheskaya geografiya Kazakhstana i Srednej Azii (v predelakh pustynnoj oblasti) [Principles and main units of regionalization // Botanical geography of Kazakhstan and Central Asia (within the desert region)], 172–195. Saint-Petersburg [in Russian].
- Zhaylybayeva, T. M. (2024). Analysis of the flora of the western part of the Kyrgyz Alatau (PhD dissertation). Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan. [in Kazakh].
- Baitenov, M. S. (1985). Vysokogornaya flora Severnogo Tyan'-Shanya [High-mountain flora of the Northern Tien Shan]. Alma-Ata: Nauka KazSSR.
- Mukhtubayeva, S. K., Nelina, N. V., Sitpayeva, G. T., Kudabayeva, G. M., Vesselova, P. V., Bilbayeva, B. K., & Zhumadilova, A. (2017). Redkie, endemichnye, reliktovye i ischezayushchie vidy rastenii Severnogo Tyan'-Shanya (Kungei i Kyrgyzskiy Alatau) [Rare, endemic, relict, and endangered plant species of the Northern Tien Shan (Kungey and Kyrgyz Alatau)]. Kazakhstan Respublikasy, 103 pp. [in Russian].
- Krasnaya kniga Kazakhstana [Red Data Book of Kazakhstan] (2014). Baitulin, I.O. (Ed.), & Sitpayeva, G.T. (Assoc. Ed.). (2nd ed., Vol. 2, Pt. 1: Plants). Astana: ArtPrintXXI., 452 p. [in Russian].
- Kubentayev, S. A., Alibekov, D. T., Perezhogin, Y. V., Lazkov, G. A., Kupriyanov, A. N., Ebel, A. L., & Kubentayeva, B. B. (2024). Revised checklist of endemic vascular plants of Kazakhstan. *PhytoKeys*, 238, 241.
- Guryeva, I. I. (2013). Gerbarnoye delo: Rukovodstvo po organizatsii gerbariya i rabote s gerbarnymi kollektsiyami [Herbarium practice: A guide to herbarium organization and work with herbarium collections] (2nd ed.). Tomsk. 194 pp. [in Russian].
- Pavlov, N.V. (Ed.). (1956–1966). Flora Kazakhstana [Flora of Kazakhstan] (Vols. 1–9). Alma-Ata: Academy of Sciences of the Kazakh SSR [in Russian].
- Goloskokov, V.P. (Ed.). (1969–1972). Illyustrirovannyi opredelitel' rasteniy Kazakhstana [Illustrated guide to plants of Kazakhstan] (Vols. 1–2). Alma-Ata: Nauka [in Russian].
- Plantarium. (2007–2026). Open online atlas and identification guide of plants and lichens of Russia and neighboring countries. Electronic resource. Regime of access: <http://www.plantarium.ru>.
- Plants of the World Online (2026). Royal Botanic Gardens, Kew. Electronic resource. Regime of access: <https://powo.science.kew.org>.
- Krasnaia kniga Zhambylskoi oblasti [Red Data Book of Zhambyl region]. (2007). Almaty [in Russian].
- Gemejiyeva, N., Abdildanov, D., Kudabayeva, G., Vesselova, P., Nelina, N., & Friesen, N. (2025). Виды рода *Allium* L. западной части хребта Киргизский Алатау: современное состояние и перспективы изучения. *Fundamental and Experimental Biology*, 11830(2), 13-25.
- Vesselova, P. V., Kudabayeva, G. M., Abdildanov, D. S., Osmonali, B. B., Ussen, S., Skaptsov, M. V., & Friesen, N. (2025). Integral assessment of species of the genus *Allium* L. (Amaryllidaceae) in the western part of the Kyrgyz Alatau. *Plants*, 14(18), 2890.

### Information about authors:

*P.V. Vesselova* – Candidate of Biological Sciences (c. sc), professor, head of the Laboratory of flora of higher plants RSE REM “Institute of Botany and Phytointroduction” FWC MENR RK (Almaty, Kazakhstan, e-mail [pol\\_ves@mail.ru](mailto:pol_ves@mail.ru). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3903-6276>).

*Kudabayeva G.M.* – Candidate of Biological Sciences (C. Sc), professor, Leading Researcher, Laboratory of Higher Plant Flora, RSE REM “Institute of Botany and Phytointroduction” FWC MENR RK (Almaty, Kazakhstan; e-mail: [kgm\\_anita@mail.ru](mailto:kgm_anita@mail.ru). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7315-4033>).

*Abdildanov D.Sh.* – Researcher at the Laboratory of Higher Plant Flora, RSE REM “Institute of Botany and Phytointroduction” FWC MENR RK (Almaty, Kazakhstan; e-mail: [abdildanov00@mail.ru](mailto:abdildanov00@mail.ru); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0681-5468>).

*Friesen N.V.* – Doctor of biological sciences (D.Sc.), Professor, Botanical Garden, University of Osnabrück (Osnabrück, Germany; e-mail: [nfriesen@uni-osnabrueck.de](mailto:nfriesen@uni-osnabrueck.de). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3547-3257>).

*Kenesbay A.Kh.* – Junior Researcher, Laboratory of Plant World Cadastre RSE REM “Institute of Botany and Phytointroduction” FWC MENR RK (Almaty, Kazakhstan; e-mail: [akerke\\_kenesbai@mail.ru](mailto:akerke_kenesbai@mail.ru). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5053-6722>).

*Akhmetzhanova R.K.* – Junior Researcher at the Laboratory of Higher Plant Flora, RSE REM “Institute of Botany and Phytointroduction” FWC MENR RK (Almaty, Kazakhstan; e-mail: [ramina.akhmetzhanova@bk.ru](mailto:ramina.akhmetzhanova@bk.ru). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1308-1113>).

*Maslova O.M.* – Senior Lecturer, Department for Recreational Geography, Tourism and Regional Marketing, Geographical Faculty, Altai State University, 61 (Barnaul, Russian, e-mail: [maslova@geo.asu.ru](mailto:maslova@geo.asu.ru). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3862-3687>).

**Авторлар туралы мәлімет:**

*П.В. Веселова – биология ғылымдарының кандидаты, профессор Ботаника және фитоинтродукция институты Жогары өсімдіктер флорасы зертханасының меңгерушісі (Алматы, Қазақстан, e-mail: pol\_yes@mail.ru).*

*Г.М. Кудабая – биология ғылымдарының кандидаты, профессор Ботаника және фитоинтродукция институты Жогары өсімдіктер флорасы зертханасының жетекші ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: kgt\_anita@mail.ru).*

*Д.Ш. Абдилданов – Ботаника және фитоинтродукция институты жогары өсімдіктер флорасы зертханасының ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: abdildanov00@mail.ru).*

*Н.В. Фризен – биология ғылымының докторы, профессор, Оснабрюк ботаникалық бағы, Оснабрюк университеті (Оснабрюк, Германия, e-mail: nfriesen@uni-osnabrueck.de).*

*А.Х. Кенесбай – өсімдік дүниесі кадастры зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Ботаника және фитоинтродукция институты (Алматы, Қазақстан, e-mail: akerke\_kenesbai@mail.ru).*

*Р.К. Ахметжанова – жогары өсімдіктер флорасы зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Ботаника және фитоинтродукция институты (Алматы, Қазақстан, e-mail: ramina.akhmetzhanova@bk.ru).*

*О.М. Маслова – рекреациялық география, туризм және аймақтық маркетинг кафедрасының аға оқытушысы, География факультеті, Алтай мемлекеттік университеті (Барнаул, Ресей, e-mail: maslova@geo.asu.ru).*

**Сведения об авторах:**

*Веселова Полина Васильевна – к. б. н., профессор, заведующая лабораторией флоры высших растений Института ботаники и фитоинтродукции (Алматы, Казахстан, e-mail: pol\_yes@mail.ru).*

*Кудабая Гульмира Маулетовна – к. б. н., профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории флоры высших растений Института ботаники и фитоинтродукции (Алматы, Казахстан, e-mail: kgt\_anita@mail.ru).*

*Абдилданов Даулет Шарипханович (автор-корреспондент) – научный сотрудник лаборатории флоры высших растений Института ботаники и фитоинтродукции (Алматы, Казахстан, e-mail: abdildanov00@mail.ru).*

*Фризен Николай Вальтерович – д. б. н., профессор Ботанического сада Оснабрюкского университета (Оснабрюк, Германия, e-mail: nfriesen@uni-osnabrueck.de).*

*Кенесбай Ақерке Хажымуратовна – младший научный сотрудник лаборатории кадастра растительного мира Института ботаники и фитоинтродукции (Алматы, Казахстан, e-mail: akerke\_kenesbai@mail.ru).*

*Ахметжанова Рамина Канатовна – младший научный сотрудник лаборатории флоры высших растений Института ботаники и фитоинтродукции (Алматы, Казахстан, e-mail: ramina.akhmetzhanova@bk.ru).*

*Маслова Ольга Михайловна – ст. преп. кафедры рекреационной географии, туризма и регионального маркетинга, географический факультет, Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия, e-mail: maslova@geo.asu.ru).*

Поступила 17 января 2026 года

Принята 25 марта 2026 года

**ШОЛУ МАҚАЛАЛАР**



**REVIEW ARTICLES**



**ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ**

М.А. Абдулжанова<sup>2\*</sup>, Д.Х. Шокатаева<sup>2</sup>, С.П. Жантлесова<sup>2</sup>,  
А. Балтабай<sup>1</sup>, Ж. Батыкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«Жану проблемалары институты» РМК, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Биология және биотехнология мәселелері ФЗИ, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com

## БАКТЕРИАЛДЫ ЦЕЛЛЮЛОЗА – ТҰРАҚТЫ ТАҒАМДЫҚ ҚАПТАМАҒА АРНАЛҒАН БИОЫДЫРАЙТЫН МАТЕРИАЛ

Бактериалды целлюлоза (БЦ) жоғары тазалығы, нанофибриллярлық құрылымы, биосәйкестігі және функционалдық модификация мүмкіндігі арқасында биоыдырайтын қаптама материалдарын әзірлеу үшін перспективалы биополимер ретінде қарастырылады. Осы шолудың мақсаты – БЦ алу әдістеріне, оның физика-механикалық және тосқауылдық (барьерлік) қасиеттеріне, функционализация тәсілдеріне, сондай-ақ белсенді және интеллектуалды тағамдық қаптамада қолданылуына қатысты заманауи зерттеулерді талдау.

Әдебиеттерді іздеу 2009–2024 жылдар аралығында *Scopus*, *Web of Science* және *Google Scholar* дерекқорларында *bacterial cellulose*, *food packaging*, *active packaging*, *smart packaging*, *biocomposites* кілт сөздері бойынша жүргізілді. Барлығы 120-дан астам жарияланым талданып, олардың ішінен ең өзекті 95 дереккөз іріктеліп алынды.

Зерттеулер нативті БЦ-ның негізгі шектеулері ретінде жоғары гидрофильділігін, ылғалды ортада тұрақтылығының төмендігін және өзіндік антимикробтық белсенділігінің жоқтығын көрсетеді. Бұл кемшіліктерді биополимерлерді, нанобөлшектерді және биоактивті қосылыстарды қолдана отырып, *in situ* және *ex situ* модификациялау арқылы тиімді жоюға болады. БЦ негізіндегі белсенді және интеллектуалды жүйелерге ерекше назар аударылып, олардың антимикробтық қорғауды қамтамасыз ету, антиоксиданттарды біртіндеп босату және өнімдердің балғындығын бақылау қабілеті қарастырылған.

Сонымен қатар масштабтау мәселелері, функционалдық қоспалардың миграциясы және экономикалық тиімділікке қатысты шешілмеген проблемалар атап өтіледі. Қорытындылай келе, БЦ негізіндегі қаптамаларды әрі қарай коммерцияландыру биосинтез үдерісін, композиттердің қасиеттерін кешенді оңтайландыруды және олардың өмірлік циклін жан-жақты бағалауды талап етеді.

**Түйін сөздер:** бактериалды целлюлоза, биоқаптама, азық-түлік қаптама, биополимер, биокөмпазит.

M.A. Abdulzhanova<sup>2\*</sup>, D.H. Shokatayeva<sup>2</sup>, S.D. Zhantlesova<sup>2</sup>,  
A. Baltabai<sup>1</sup>, Zh. Batykova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RSE "Institute of Combustion Problems", Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Research Institute of Biology and Biotechnology Problems, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com

## Bacterial cellulose – a biodegradable material for sustainable food packaging

Bacterial cellulose (BC) is considered a promising biopolymer for the development of biodegradable packaging materials due to its high purity, nanofibrillar structure, biocompatibility, and potential for functional modification. The aim of this review is to analyze current studies focused on BC production, its physicochemical and barrier properties, functionalization methods, as well as its application in active and intelligent food packaging. A literature search was conducted in the Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases for the period 2009–2024 using the keywords "bacterial cellulose," "food packaging," "active packaging," "smart packaging," and "biocomposites." More than 120 publications were analyzed, of which 95 of the most relevant sources were selected.

It has been shown that the main limitations of native BC remain its high hydrophilicity, insufficient stability in humid environments, and lack of intrinsic antimicrobial activity. These drawbacks can be effectively overcome through *in situ* and *ex situ* modifications using biopolymers, nanoparticles, and

bioactive compounds. Particular attention is given to BC-based active and intelligent systems that provide antimicrobial protection, antioxidant release, and monitoring of food freshness. At the same time, unresolved issues related to scale-up, migration of functional additives, and economic feasibility are highlighted. It is concluded that further commercialization of BC-based packaging requires comprehensive optimization of biosynthesis processes, composite properties, and life cycle assessment.

**Keywords:** bacterial cellulose, biopackaging, food packaging, biopolymer, biocomposite.

М.А. Абдулжанова<sup>2\*</sup>, Д.Х. Шокатаева<sup>2</sup>, С.Д. Жантлесова<sup>2</sup>,  
А. Балтабай<sup>1</sup>, Ж. Батыкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РГП «Институт проблем горения», Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>НИИ Проблем биологии и биотехнологии, Алматы, Казахстан

\*e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com

### **Бактериальная целлюлоза – биоразлагаемый материал для устойчивой пищевой упаковки**

Бактериальная целлюлоза (БЦ) рассматривается как перспективный биополимер для разработки биоразлагаемых упаковочных материалов благодаря высокой чистоте, нанофибриллярной структуре, биосовместимости и возможности функциональной модификации. Цель настоящего обзора – проанализировать современные исследования, посвящённые получению БЦ, её физико-механическим и барьерным характеристикам, методам функционализации, а также применению в активной и интеллектуальной пищевой упаковке. Литературный поиск проводился в базах Scopus, Web of Science и Google Scholar за период 2009–2024 гг. с использованием ключевых слов *bacterial cellulose*, *food packaging*, *active packaging*, *smart packaging*, *biocomposites*. Проанализированы более 120 публикаций, из которых отобраны 95 наиболее релевантных источников.

Показано, что ключевыми ограничениями нативной БЦ остаются высокая гидрофильность, недостаточная устойчивость во влажной среде и отсутствие собственной антимикробной активности. Эти недостатки эффективно преодолеваются путём *in situ* и *ex situ* модификаций с использованием биополимеров, наночастиц и биоактивных соединений. Особое внимание уделено активным и интеллектуальным системам на основе БЦ, обеспечивающим антимикробную защиту, антиоксидантное высвобождение и мониторинг свежести продуктов. Вместе с тем подчеркнуты нерешённые проблемы масштабирования, миграции функциональных добавок и экономической эффективности. Сделан вывод, что дальнейшая коммерциализация БЦ-упаковки требует комплексной оптимизации биосинтеза, свойств композитов и оценки жизненного цикла.

**Ключевые слова:** бактериальная целлюлоза, биоупаковка, пищевая упаковка, биополимер, биокompозит.

## **Кіріспе**

Қазіргі орау индустриясы – ғаламдық экономикада маңызды орын алатын және үдемелі даму үстіндегі сала. Оның өркендеуіне жаһандану, заманауи технологияларды кеңінен енгізу және тұтынушылардың өсіп келе жатқан талаптары сияқты бірнеше фактор әсер етеді. Нарық құрылымында азық-түлік пен сусындар сегменті басымдыққа ие болып, жалпы көлемнің шамамен 85%-ын құрайды (Bharimalla et al., 2017).

Бүгінде азық-түлік өнімдерін орауда негізінен мұнай шикізатынан алынатын полиэтилен мен полипропилен сияқты материалдар кеңінен қолданылуда. Алайда олардың кеңінен қолданылуы қоршаған ортаны ластау және экологиялық тепе-теңдікті бұзу сияқты айтарлықтай экологиялық әсерлерге әкеледі. Осыған байланысты биологиялық негіздегі балама материалдарға қызығушылық артып келеді. Биополимерлер биологиялық ыдырағыштығы және адам денсау-

лығына да, қоршаған ортаға да қауіпсіздігі арқасында дәстүрлі пластикалық ораудың перспективалы алмастырғышы ретінде қарастырылады. Олар токсинді қосылыстардың түзілуіне жол бермейді және жою кезінде айқаспалы ластану қаупін төмендетеді (Nagalakshmaiah et al., 2019).

Қоршаған ортаны ластаумен байланысты проблемалардың ушығуы тұрақты және экологиялық қауіпсіз орау шешімдерін әзірлеуге деген қоғам мен ғылымның қызығушылығын арттырды. Соның нәтижесінде салыстырмалы түрде жоғары өзіндік құнына қарамастан, табиғи және жаңартылатын материалдарды өнеркәсіптік өндіріске енгізу белсенді жүріп жатыр (Díez-Pascual, 2019).

Қазіргі зерттеулер жаңа функционалды сипаттамалары бар белсенді және интеллектуалды орау жүйелерін әзірлеуге бағытталған. Бұл табиғи биополимерлерді қажетті қасиеттерге ие ету мақсатында модификациялау қажеттілігін туындатты. Осындай материалдардың ішінде

БЦ – оның табиғи түрінде де, композиттер құрамында да – ерекше көңіл бөлінуде. БЦ өзінің жоғары тазалығы, беріктігі, биосәйкестілігі және функционалды модификация мүмкіндігі арқасында бұрын медицина мен косметикада қолданылған, ал соңғы жылдары орау және электронды өнеркәсіпте перспективалы материал ретінде белсенді зерттеліп, енгізілуде.

БЦ – бастапқыда жоғары тазалыққа ие ерекше биоматериал, ал көптеген басқа биополимерлер күрделі экстракция және тазалау кезеңдерін қажет етеді. Оның талшықтары өсімдік текті целлюлозадан әлдеқайда жіңішке және үшөлшемді, жоғары кеуекті құрылым қалыптастырады. Сонымен қатар, БЦ биологиялық ыдырағыш, улы реакциялар туғызбайды және аллергияға себеп болмайды (Tanprichai et al., 2020).

Бұл жұмыстың мақсаты – БЦ-ның экологиялық қауіпсіз және функционалды биополимер ретінде орау өнеркәсібінде қолданылу әлеуетін зерттеу. Зерттеу барысында БЦ-ның қасиеттері, оны алу және модификациялау әдістері талданады, сондай-ақ белсенді және интеллектуалды жүйелерді қоса алғанда, инновациялық орау материалдарының құрамында оны қолдану мүмкіндіктері қарастырылады. Ерекше назар БЦ-ны дәстүрлі полимерлі ораулармен және басқа да биоматериалдармен салыстыруға аударылады.

Бұл жұмыста азық-түлік өнімдерін орауда БЦ қолдану бойынша соңғы нәтижелерге шолу жасалады. Сондай-ақ бұл мәселе бойынша шектеулер мен болашақ перспективалар қысқаша сипатталады, бұл микробтық полисахаридтің басқа биополимерлер алдындағы артықшылықтарын айқындайды.

### Шолудың әдіснамасы

Әдебиеттерді іздеу 2009–2024 жылдар аралығында Scopus, Web of Science және Google Scholar дерекқорларында жүргізілді. Келесі кілт сөздер пайдаланылды: *bacterial cellulose*, *biodegradable packaging*, *active food packaging*, *smart packaging*, *BC composites*.

Шолуға тек ағылшын және орыс тілдеріндегі рецензияланған мақалалар мен монографиялар енгізілді, оларда БЦ алу, оның физика-механикалық және тосқауылдық (барьерлік) қасиеттері немесе тағамдық қаптамада практикалық қолданылуы бойынша сандық деректер келтірілген.

Эксперименттік деректері жоқ жұмыстар және қаптама технологияларына қатысы жоқ жарияланымдар шолудан шығарылды. Қорытынды іріктеу 95 дереккөзді құрады.

### Әдебиетке шолу

Технологиялардың қарқынды дамуы және жаңа материалдарды кеңінен енгізу жағдайында экологиялық қауіпсіздік пен тұрақты даму мәселелеріне ерекше көңіл бөлінуде. Осы тұрғыда қалдықсыз өндірістер инновациялық технологиялық шешімдердің маңызды элементтері ретінде қарастырылады. Өсімдік текті целлюлоза – жердегі ең көп таралған биополимер, оның жыл сайынғы жалпы өсімдік биомассасынан алынатын көлемі 100–125 Гт шамасында деп бағаланады (Алешина et al., 2001). Жоғары қолжетімділігі мен жаңартылуына байланысты целлюлоза қағаз өндірісінде, биобдырайтын орау материалдарында кеңінен қолданылады және биомедициналық салада да қолданылу аясын кеңейтіп келеді (Mautner, 2020).

Өсімдік көздерінен бөлек, сірке қышқылын түзуші бактерия штаммдарын пайдалана отырып, целлюлозаны микробиологиялық әдіспен де алуға болады. Мұндай микроорганизмдерге *Cetobacter*, *Gluconobacter*, *Gluconacetobacter* және *Komagateibacter* туыстарының өкілдері жатады. Олар аэробты жағдайларда спирттерді, альдегидтерді, моносахаридтерді және қант спирттерін сірке қышқылына дейін тотықтыра алады (Gregory et al., 2021). Бұл бактериялар табиғатта ферменттелген өнімдерде кең таралған, соның ішінде сірке суында, ната-де-кокода, шай саңырауқұлағында және шіріген жемістерде кездеседі.

Әсіресе *Gluconacetobacter* және *Komagateibacter* туыстарының түрлері ерекше қызығушылық тудырады, олар жасушадан тыс матрикс түзе алады, ол жоғары ұйымдасқан кристалды целлюлозадан тұрады. Бұл материал, әдетте, культуралық ортаның бетінде түзіледі және кеуіп кетуден және ультракүлгін сәулеленуден қорғау қызметін атқарады. Ол БЦ деген атпен танымал (Florea et al., 2016). Бұл сірке қышқылын түзуші бактериялар әртүрлі көміртегі көздерін – глюкоза, фруктоза, маннит, ксилоза, глицерин, дигидроксиацетон немесе дикарбон қышқылдарын метаболиздеп,  $\beta$ -(1→4)-глюканның сызықты тізбектерін түзеді және оларды цитоплазмалық мембранадағы көптеген тесіктер арқылы сыртқа шығарады (Gorgieva & Trček, 2019; Wang et al., 2018).

БЦ биосинтезі барысында көміртегі көзі осы биотехнологиялық процестің жалпы құнының 65%-ына дейін үлес қосады (Jedrzejczak-Krzepkowska et al., 2016). Сондықтан БЦ-ны коммерциялық қолдануды шектейтін ең маңыз-

ды және күрделі мәселелердің бірі – экономикалық тұрғыдан тиімді өсу ортасын табу болып табылады.

БЦ өндіруде дәстүрлі түрде Хестрин-Шрамм (ХШ) ортасы қоректік орта ретінде пайдаланылады. Бұл орта құрамында көміртегі мен азоттың негізгі көздері ретінде қызмет ететін глюкоза, пептон және ашытқы экстракты бар (Schramm & Hestrin, 1954). Зерттеулер көрсеткендей, ХШ ортасына метанол қосылған жағдайда БЦ шығымы барынша жоғарылайды (Lu et al., 2011), сондай-ақ инокулятқа аз мөлшерде эндоглюканаза енгізу де оң әсер етеді.

Қазақстандық авторлар да ХШ ортасын модификациялау бойынша зерттеулер жүргізді. Ең жоғары өнімділік 0,5% спирт концентрациясы бар нұсқаларда байқалды. Осылайша, глюкоза мөлшері 1%-ға дейін азайтылып, этанол 0,5% концентрацияда қосылған ХШ ортасының шағын модификациясы ұсынылды. Бұл орта модификацияланған ХШ (МХШ) деп аталды (Савицкая et al., 2017).

Шығындарды азайту және БЦ шығымын арттыру мақсатында ауылшаруашылық қалдық-

тары мен өнеркәсіптік жанама өнімдерді оның өндірісі үшін арзан қоректік орта ретінде қолдану зерттелді (Carreira et al., 2011; Vazquez et al., 2013). Осы саладағы ірі зерттеулердің бірі Скиба Е.А. және әріптестерінің жұмыстары болды. Олар *Medusomyces gisevii* симбиоттық дақылы арқылы ауылшаруашылық қалдығы болып табылатын сұлы қауызынан БЦ алды. Зерттеуде сұлы қауызын алдымен 2–6% концентрациялы азот қышқылы ерітінділерімен өндеп, кейін ферментативтік гидролизге ұшыратты. Нәтижесінде қантқа бай ерітінді алынып, ол БЦ синтезі үшін субстрат ретінде қолданылды. Сұлы қауызын пайдалану арқылы жүргізілген тәжірибелік-өндірістік процесс 100 тонна шикізаттан 98% ылғалдылығы бар 80,5 тонна гидрогель алуға мүмкіндік берді (Skiba et al., 2020).

Соңғы уақытта ХШ ортасының модификациялары әртараптанып келеді. Бұл модификациялардың басты мақсаты – минималды шығындармен максималды өнімділікке қол жеткізу. Төмендегі кестеде БЦ өндіру үшін қолданылатын әртүрлі шикізат көздері және олардың максималды шығымы көрсетілген.

### 1-кесте

БЦ өндіруге арналған әртүрлі шикізат көздері (Богатырёва, 2021)

Тазартылмаған және ауылшаруашылық қалдықтары	БЦ шығымы (құрғақ зат, орта көлеміне), г/л
Хестрин және Шрамм ортасы (ХШ)	2,73
Меласса	1,6
Қызылша мелассасы	3,58
Қамыс мелассасы	7,92-8,87
Апельсин және ананас шырыны	3,58
Ананас шырыны мен қабығы	2,73
Құрма шәрбаты	8,19
Үн гидролизаттары (кондитерлік өнеркәсіп қалдықтарынан)	13
Шикі глицерин және күнбағыс күнжарасының гидролизаты	13,3
Жүгері собығының қышқылдық гидролизаты	4
<i>Amorphophallus konjac</i> түйнектерінен алынған үн	8,19
Ағын суларды биоөндеуден алынған лигноцеллюлоза	20
Үйеңкі шәрбаты	2,73
Бидай сабанының гидролизаты	8,31

Сонымен қатар көптеген зерттеушілер экономикалық және экологиялық тұрғыдан тиімді болуына байланысты көміртегінің баламалы табиғи көздерін, мысалы, жеміс шырындары,

бидай сабаны, патока, үйеңкі шәрбаты, мақта негізіндегі текстиль қалдықтары және басқа да өнеркәсіптік немесе ауылшаруашылық қалдықтарын пайдалануды ұсынады (Kurosuni et al.,

2009; Chen et al., 2013; Çakar et al., 2014; Zeng et al., 2011; Hong et al., 2012; Tsouko et al., 2015; Hussain et al., 2019; Molina-Ramírez et al., 2018). Мысалы, Чжао және әріптестері БЦ өндіру үшін шарап өңдеу қалдықтары сияқты арзан қосалқы өнімдерді қолданған. Зерттеу нәтижелері бұл қалдық түрі ферментация ортасында жақсы субстрат бола алатынын және *Ga. xylinus BC-11* өсуі үшін жеткілікті мөлшерде қоректік заттар қамтамасыз ететінін көрсетті (Zhao et al., 2018). Рани және Аппайя кофейлі жидектердің қауызынан алынған экстрактты көміртегі көзі ретінде пайдаланып, *Ga. hansenii UAC09* микроорганизмімен БЦ өндірді. Бұл агроқалдықтарды қолдану глюкозаға бай қоректік ортамен салыстырғанда БЦ биосинтезінің үш есе артуына әкелді (Rani & Appaia, 2013).

Қазақстанда да осыған ұқсас зерттеулер әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың қолданбалы микробиология зертханасының ғалымдары жүргізді (Shokatayeva et al., 2019; Kistaubayeva et al., 2021). Қазақстан Республикасында сүт және қант өндірісі жақсы дамыған, олардың қалдықтары – сүт сарысуы мен меласса. Бұл қалдықтарды пайдаланудың тиімді тәсілдерінің бірі – олардың негізінде БЦ өндіруге арналған қарапайым әрі арзан қоректік орталарды әзірлеу. Сонымен қатар, соңғы жылдары биоэтанол өндіретін зауыттардың саны тұрақты өсуде. Мұндай биологиялық отынды өндіру процесінде органикалық қалдықтардың маңызды компоненттерінің бірі – глицерин болып табылады. Қалдықтарды тиімді кәдеге жарату экологиялық қауіпсіз және экономикалық тұрғыдан тиімді өндірістерді құрудағы басты басымдықтардың бірі саналады. Осыған байланысты авторлар МХШ ортамен салыстырғанда глюкозаның орнына сүт сарысуын, мелассаны және глицеринді қолданды (Шокатаева et al., 2018). Алынған деректерге сәйкес, БЦ шығымы ең төмен орта сүт сарысуы негізіндегі ортада болды (2,3 г/л). Сүт сарысуында болатын лактоза – глюкоза мен галактозадан тұратын дисахарид. Галактоза целлюлоза түзуші бактериялар үшін ең қолайсыз көміртегі көзі болып саналады (Гладышева & Скиба, 2014). Сонымен қатар, галактоза немесе лактоза бар ортада культивирлеу кезінде целлюлоза синтездеуге қабілетсіз мутанттардың үлесі артады. Cel- жасушаларының көбеюі субстрат үшін целлюлоза түзуші жасушалармен бәсекелестікке әкеледі. Глицерин негізіндегі ортада да штаммның өнімділігі төмен болды. Бұл ортада синтезделген пленканың массасы 4,75 г/л құрады, бұл МХШ ортасына қарағанда 33,19%-ға

аз. БЦ синтезі үшін ең қолайлы орта меласса негізіндегі орта болып шықты (Шокатаева et al., 2018). Ол микробиологиялық өндірісте көміртегінің ең үнемді көздерінің бірі болып табылады. Меласса – қант өндірудің соңғы кристалдану кезеңінің жанама өнімі. Мелассадағы сахарозаның жоғары мөлшеріне байланысты оны қоректік орталар дайындауға арналған шикізат ретінде белсенді қолданады. Мелассаның құрамында шамамен 80% құрғақ заттар бар, оның 57%-ын көмірсулар құрайды. Алайда бұл концентрация микроорганизмдердің өсуіне қолайсыз болғандықтан, мелассаны дистилденген сумен 10 есеге дейін сұйылту қажет болды. Мелассадағы қанттың төмен концентрациясы целлюлозаның тиімді өндірілуінің қажетті шарты болып табылады. Меласса негізіндегі ортада алынған полимер массасы 12,8 г/л құрады, бұл МХШ ортасындағыдан (7,11 г/л) 1,8 есе көп.

Өнеркәсіптік немесе ауылшаруашылық өндірісінің тиісті және арзан қосалқы өнімдерін пайдалану БЦ биосинтезінің тиімділігін арттырып қана қоймай, дәстүрлі глюкоза негізіндегі ортамен салыстырғанда өндіріс құнын да төмендететініне сенімділік бар (Hong & Qiu, 2008; Goelzer et al., 2009).

Өсімдік текті целлюлозамен салыстырғанда, БЦ айтарлықтай жоғары кристалдылықпен (84–89%), керемет химиялық тазалығымен (гемицеллюлоза, лигнин немесе пектин сияқты қоспалардың болмауы), басқа биоматериалдармен салыстырғанда жоғары созылу беріктігімен және жақсы қалыптау қабілетімен ерекшеленеді (Gorgieva & Trček, 2019). Сонымен қатар, БЦ талшықтарының көлденең қимасы әлдеқайда кіші, бұл материалдың жоғары кеуектілігін қамтамасыз етеді (Chawla et al., 2009; Moniri et al., 2017). Бұдан бөлек, БЦ өндіру процесінде целлюлозаны бөліп алу және тазарту үшін қатаң химиялық өңдеуді қажет етпейді (Shi et al., 2014).

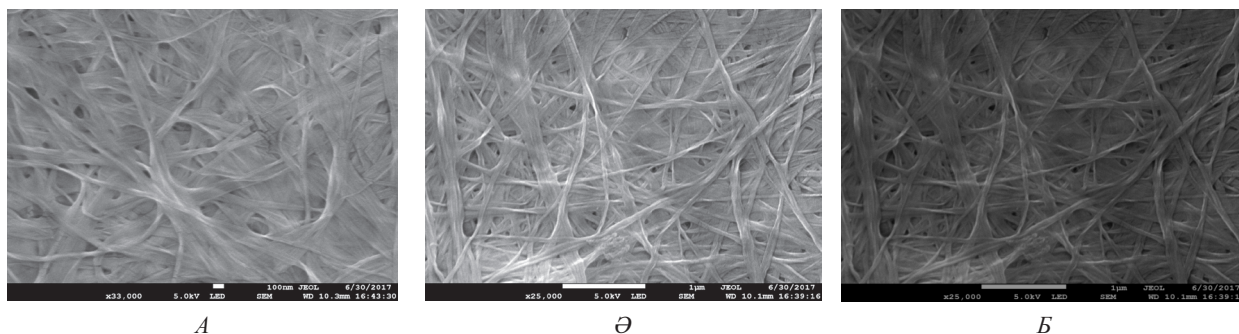
БЦ гидрогелі суды сіңіру және газдарды өткізу қабілетінің жоғары болуымен сипатталады, бұл бактериялардың тіршілік әрекеті үшін қоректік заттар мен қажетті элементтердің тиімді алмасуын қамтамасыз етеді. Tanpichai et al. Авторларының зерттеуі бойынша БЦ құрғақ заттың 1 грамына 309 граммға дейін ылғал ұстай алады және 150 °C дейінгі температураға, ал химиялық өңдеуден кейін 275 °C дейінгі температураға төтеп бере алады (Tanpichai et al., 2020). Бұл материалды құрылымын бұзбай кептіруге мүмкіндік береді. Жоғары беріктілігіне қарамастан, БЦ жақсы серпімділік, иілгіштік және пластикалық қасиеттерін сақтайды.

Сонымен қатар, БЦ наноталшықты биоматериал болып табылады. Оның микроталшықтары  $\beta$ -1,4-гликозидті байланыстармен жалғанған мономерлік бірліктерден тұратын анық құрылымдалған үш өлшемді торға ұйымдасқан. Мұндай

құрылым өсімдік текті целлюлозамен салыстырғанда жоғары механикалық беріктікке, полимерлену деңгейінің жоғарылығына, кристалдылық индексінің жоғары болуына және созылуға төзімділікке мүмкіндік береді (1-сурет).

### 1-сурет

*Komagataeibacter xylinus* C-3 штамымен синтезделген БЦ пленкаларының СЭМ кескіндері: А – ХШ қоректік ортасы; Ә – МХШ қоректік ортасы; Б – Меласса қосылған қоректік орта (үлкейту  $\times 25\,000$ ) (Shokatayeva et al., 2019)



БЦ – бұл өзінің жоғары биологиялық үйлесімділік және цитоуыттылықтың болмауы арқасында коммерциялық қызығушылық тудырып отырған әмбебап биоматериал.

БЦ-ның химиялық қасиеттері, ең алдымен, қайталанатын құрылымдық бірлік – целлобиозаға байланысты, оның құрамында үш бос гидроксил топтары бар: С2 және С3 позицияларында (екіншілік спирттер) және С6 позициясында (біріншілік спирт). Осы гидроксил топтарының болуына байланысты БЦ химиялық белсенді бетке ие және салыстырмалы түрде оңай этерификация және ацилирлеу реакцияларына түседі. Сонымен қатар, БЦ уытсыз және табиғи кеуекті биоматериал болып табылады және ерекше қасиеттерімен ерекшеленеді, олардың ішінде биоыдырағыштық, жоғары гидратация және тамаша ылғал ұстау қабілеті бар (өз салмағынан 100 есе артық су ұстай алады) (Gorgieva & Trček, 2019; Moniri et al., 2017).

БЦ-ның барлық қасиеттері көптеген факторларға – ортаның рН деңгейі, қоректік ортаның құрамы, өсіру уақыты мен жағдайлары, сондай-ақ продуцент микроорганизмнің түріне тікелей тәуелді. Соған қарамастан, БЦ мембранасы кенінен қолданылады: ол медицинада және косметологияда белсенді қолданылып қана қоймай, тағам өнеркәсібінде де Филиппиндік десерт – Nata de coco ретінде көп жылдан бері белгілі (Azeredo et al., 2019). Соңғы жылдары БЦ-ны тағамдық өнімдерге арналған табиғи, бактериялармен өндіретін

орау материалы ретінде арнайы модификациялап қолдану белсенді зерттелуде (Gama et al., 2016).

Тауарлар мен қызметтер нарығының көлемі адамның белсенділігінің артуымен және халық санының тез өсуімен қатар ұлғайып келеді. Бұл мұнай-химиялық және синтетикалық пластмассалардың кеңінен қолданылуы салдарынан экологиялық проблемаларға әкелді. Осыған жауап ретінде көптеген елдер пластикалық қаптаманы қолданудың теріс салдарын азайтуға бағытталған заңнамалық шаралар қабылдады. Ыдырамайтын қатты қалдықтардың қоршаған ортаға әсері – әсіресе мұхиттар мен қоқыс полигондарын ластау – орау саласында тұрақты және экологиялық қауіпсіз баламаларды іздеуге түрткі болды. Мұнай негізіндегі пластмассалар коммуналдық қалдықтардың шамамен үштен бірін құрайды, олардың тек 2,2%-ы ғана қауіпсіз өңдеуден өтеді (V poiskakh plastika, 2020). Мұндай қалдықтардың жиналуы мен жағылуынан пайда болатын уыттылық, сондай-ақ тағамдық қаптаманың қауіпсіздігіне қойылатын қатаң талаптар биоыдырайтын материалдар мен биопластиктерге назар аудартады. Экономикалық тұрғыдан тиімді және экологиялық таза орау материалдары тағам қалдықтарының көлемін азайтуға (Schmidt-Traub et al., 2019) және көмірқышқыл газының шығарындыларын төмендетуге (Zheng & Suh, 2019) мүмкіндік береді.

Қаптама – тағам өнеркәсібінің ажырамас бөлігі және өнімдерді қоршаған ортадан оқшаулап,

оларды химиялық, биологиялық және физикалық әсерлерден қорғауда шешуші рөл атқарады. Оның функциялары алуан түрлі: өнімнің бұзылуына жол бермеу, ылғал, оттегі, көмірқышқыл газы, радиация/жарық, иістер мен дәмдердің өтуін шектеу сияқты тосқауылдық қасиеттерді қамтамасыз ету. Бұдан бөлек, қаптама тағам өнімдерінің микробиологиялық қауіпсіздігін сақтауға және олардың сақтау мерзімін ұзартуға бағытталған.

Қазіргі таңда қаптама өнеркәсібінде негізгі шикізат ретінде мұнайдан алынатын пластиктің түрлі түрлері, шыны, металл, қағаз, алюминий және барған сайын жиі қолданылып жүрген биополимерлер пайдаланылады (Bandyopadhyay et al., 2018). Синтетикалық полимерлер бұл секторда өздерінің керемет механикалық қасиеттері, мөлдірлігі, икемділігі, термопластикалығы, жеңілдігі және өндірісінің төмен құны арқасында үлкен үлеске ие болды. Алайда осы артықшылықтарға қарамастан, мұнайдан алынған материалдардың кеңінен қолданылуы күрделі экологиялық мәселелер тудыруда. Дәстүрлі тағамдық ораулардың ыдырауға төзімділігі пластикалық қалдықтардың жиналуына және экожүйенің ластануына әкеледі. Синтетикалық полимерлердің басқа да кемшіліктеріне өндіріс кезінде CO<sub>2</sub> деңгейінің жоғары шығарындылары, қатерлі ісік ауруларының қаупі (пластмассалардағы кейбір қоспалар уытты болуы мүм-

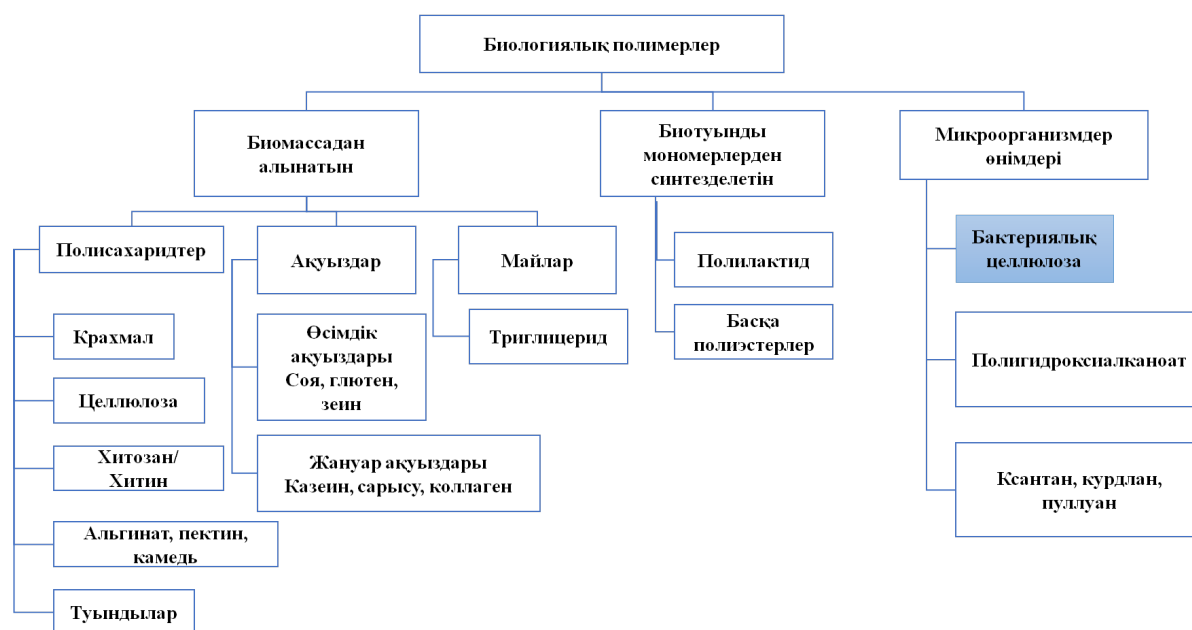
кін) және қайта өңдеудің жоғары құны жатады (Nagalakshmaiah et al., 2019).

Еуропалық комиссияның бағалауы бойынша, Еуропада жыл сайын шамамен 25,8 млн тонна пластикалық қалдықтар түзіледі, олардың тек 30%-дан азы қайта өңделеді (European Commission, 2018). Осыған байланысты Еуропалық жасыл келісім 2050 жылға қарай климаттық бейтараптыққа қол жеткізуге бағытталған келісілген стратегияны іске қосты. ЕС-тің экономиканың түйік цикліне арналған пластик стратегиясы, атап айтқанда, қайта қолдануға және қайта өңдеуге болатын қаптама тұжырымдамасын әзірлеуді, экологиялық таза баламаларды немесе көп реттік жүйелерді енгізуді қарастырады. Еуропалық комиссияның экологиялық қалдықтарға қатысты қабылдаған шешімдері биоыдырайтын орау материалдарына, соның ішінде бактериалды наноцеллюлозаға деген қызығушылықты арттырды (European Commission, 2020).

Биологиялық орау материалдары жаңартылатын көздерден алынған және толықтай ыдырайтын қасиетке ие. Олар тікелей биологиялық жүйелер (мысалы, өсімдіктер, жануарлар, балдырлар, микроорганизмдер) арқылы синтезделуі немесе биологиялық негіздегі мономерлерді полимерлеу нәтижесінде алынуы мүмкін (мысалы, полимолекулалық қышқыл). Осыған сәйкес, бұл полимерлерді олардың шығу тегі мен өндіріс тәсіліне қарай үш негізгі топқа бөлуге болады (2-сурет).

## 2-сурет

Биоқаптама өндірісінде қолданылатын биополимерлер (DeGruson, 2016; Ramos et al., 2018; Kumar et al., 2017)



Биологиялық пленкалар мен жабындар негізінен макромолекулалық матрица мен пластификаторлардан немесе қосымша компоненттерден тұратын мембраналар болып табылады. Мұндай қоспалар әдетте биопластиктерге тән сынғыштықты азайтуға, сондай-ақ олардың механикалық және тосқауылдық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді (Okuyama et al., 1992; Глазков et al., 2018).

Джунг және соавторларының жұмысында бірнеше микрометр қалыңдықтағы жеуге жарамды және жуылатын жабын жасалды (Jung et al., 2020). Ол 54% тауық альбуминінен және өсімдік текті целлюлозаның нанокристалдарынан тұрды және жемістердің сақтау мерзімін арттыра алды. Папайя, авокадо, банан және құлпынайды осы жабынмен өңдеу олардың дәмдік қасиеттерін сақтай отырып, балғындығын ұзартуға мүмкіндік берді. Ақуызды жабын оттегіге тосқауыл болды, бұл жемістерді сақтауға септігін тигізді. Механикалық беріктікті арттыру үшін құрамға целлюлоза нанокристалдары қосылды, бұл материалдың су мен газдарға өткізгіштігін қосымша төмендетті. Пленка икемді болып қала берді және бірнеше рет бүктелгенде де зақымдалмады. Шағын мөлшерде жұмыртқа сарысын қосу жабынның ылғалға сезімталдығын азайтты. Сонымен қатар, куркуминді қосу жабынға антибактериалды, саңырауқұлақтарға қарсы және бактерияға қарсы қасиеттер берді (Okuyama et al., 1992; Jung et al., 2020). Зерттеуде қолданылған целлюлозаның нанокристалдары БЦ-дан алынған.

Тағамдық қаптама бөгде ластаушылардың, микроорганизмдердің және бөгде иістердің енуіне жол бермей, өнімнің сақтау мерзімін арттыруға ықпал ететін қорғаныс контейнері ретінде қызмет етеді.

Жанартылатын көздерден алынған мұндай материалдар әдетте тағам өнімдерін орауда қолданылады және құрамына полисахаридтер (целлюлоза, крахмал, хитозан), ақуыздар (коллаген, казеин, глютен), биомассадан алынған мономерлерді полимерлеу арқылы алынған полимерлер (полилактик қышқыл – PLA), сондай-ақ микроорганизмдер тікелей синтездейтін полимерлер (полигидроксиалканоаттар – PHA, БЦ, пуллулан, курдлан, ксантан) жатады (Grujić et al., 2017).

Табиғи полисахаридтер, ақуыздар және олардың туындылары орау өнеркәсібінде қолданылатын биополимерлердің бірі болып табылады (Pellicer et al., 2017). Бұл биоматериалдар

салыстырмалы түрде жақсы тосқауылдық қасиеттерге ие және қалыпты төмен шығындармен үлкен өнеркәсіптік масштабта өндірілуі мүмкін, бұл оларды мұнайдан алынатын пластмассаларға тартымды балама етеді. Дегенмен, биомассадан алынған полимерлердің коммерциялануы әлі де шектеулі, себебі олар пластиктермен салыстырғанда нашар созылу беріктігі, морттылығы, жылу тұрақсыздығы және судың әсеріне сезімталдығы сияқты кемшіліктерге ие (Zhong et al., 2020; Jabeen et al., 2015; Milani & Tirgarian, 2020; Chen et al., 2019).

Сондықтан сапасы жақсартылған жеуге жарамды пленкалар мен жабындарды алу үшін оларды әртүрлі арматуралық материалдармен және қоспалармен, мысалы, пластификаторлармен (глицерин, гликоль, сорбит) араластырады (Borges et al., 2015; Jeyasubramanian & Balachander, 2016; Zakaria et al., 2018; Rahman, 2019; Shendurse, 2018; Wagh, 2014).

Қаптама өнеркәсібінде қолданылатын ең қызықты материалдар санатына микроорганизмдер тікелей өндіретін биополимерлер жатады. Бұған, мысалы, алифатты полиэфирлер – полигидроксиалканоаттар (PHA), сондай-ақ пуллулан, курдлан, ксантан және БЦ сияқты микробтық полисахаридтер кіреді. Бұл материалдардың негізгі артықшылықтарына уыттылықтың болмауы, биоыдырағыштық, пластикалық және газдарға таңдамалы өткізгіштік жатады (Bugnicourt et al., 2014; Ferreira et al., 2016).

Сонымен қатар, микробтық полимерлердің негізгі кемшіліктері – жоғары өндірістік шығындар және салыстырмалы түрде төмен механикалық қасиеттер, бұл олардың тағамдық өнімдерге арналған коммерциялық орау саласында бәсекеге қабілеттілігін шектейді (Ferreira et al., 2016; Mitra et al., 2020). Қазіргі уақытта полигидроксиалканоаттар негізінен майлылығы жоғары тағамдарды (мысалы, зәйтүндер, ірімшік, жанғақтар), мұздатылған, оттекке сезімтал және органикалық өнімдерді орау үшін қолданылады (Grujić et al., 2017; Arrieta et al., 2014; Lin et al., 2018; Shen et al., 2009). Пуллулан, курдлан және ксантан сияқты микробтық полисахаридтердің жеуге жарамды пленкалар мен жабындар ретінде қолдану әлеуеті жоғары. Алайда олардың физика-химиялық және механикалық қасиеттерін жақсарту үшін көбінесе басқа полимерлермен және арматуралық қоспалармен біріктіріледі (Wu J et al., 2013; Zhang et al., 2013; Kraśniewska et al., 2019; Mohsin et al., 2020; Nur Hazirah et al.,

2016). Солардың ішінде БЦ, қажетті пішіндерде, қалыңдықта және өлшемде үздіксіз мембрана ретінде синтезделетін, орау өнеркәсібінде кеңінен қолданылатын жоғары бәсекеге қабілетті материалға айналып отыр.

БЦ қолданылу аясы өте ауқымды – ол тағам өнімдеріне арналған жеуге жарамды орау материалдарынан бастап, белсенді және интеллектуалды қаптама жүйелеріне дейін кеңінен пайдаланылады. Әдетте, биоматериалдар негізіндегі орау өнімге химиялық, биологиялық және механикалық қорғаныс қамтамасыз етуі тиіс. Осы тұрғыда БЦ-ны тағам өнеркәсібінде қолдандың негізгі артықшылықтары – оның жеуге жарамдылығы, биоыдырайтындығы, уыттылықтың болмауы, жақсы тосқауылдық селективтілігі және жоғары механикалық беріктігі. АҚШ-тың Азық-түлік және дәрі-дәрмекті бақылау басқармасы (FDA) БЦ-ны қауіпсіз деп таныған (GRAS – жалпы танылған қауіпсіздік мәртебесі), сондықтан ол қауіпсіз тағамдық ингредиент ретінде кеңінен қолданылуы мүмкін (Azeredo et al., 2019).

Бұл материалдың басқа биополимерлермен салыстырғандағы басты артықшылығы – стационарлық бактериалды культура толық өлшемді, салыстырмалы түрде қалың мембрана түзеді. Бұл мембрана өте жақсы механикалық қасиеттерге және қалыптау қабілетіне ие, және оны тазалау мен кептіруден кейін тікелей бастапқы орау материалы ретінде қолдануға болады. Дегенмен, табиғи микробтық целлюлозаны қолдандың кейбір кемшіліктері бар, мысалы, оның мембраналарының гидрофильді сипаты немесе антимикробтық және антиоксиданттық белсенділіктің болмауы. Осы шектеулерді жеңу үшін БЦ үнемі модификациялануда. Ең көп қолданылатын әдістердің бірі – БЦ матрицасының табиғи қасиеттерін әртүрлі арматуралық қосылыстардың физика-химиялық және биологиялық ерекшеліктерімен үйлестіру. Бұл тәсіл БЦ-ның бастапқы сипаттамаларын жақсартып қана қоймай, сонымен бірге нақты қолдану салаларына қажетті жаңа, арнайы қасиеттерге ие микробтық целлюлоза пленкаларын алуға мүмкіндік береді.

Композитті материалдар БЦ матрицасынан (қаңқалық құрылым қызметін атқарады) және оған ерекше физика-химиялық әрі биологиялық қасиеттер беретін арматуралық қосылыстардан тұрады. Әдетте, БЦ композиттерін синтездеу оның функционалдық мүмкіндіктерін кеңейтуге және қаптама материалдарын жасауға бағытталған. Бұл тәсіл БЦ-ның табиғи қасиеттерін жетілдіруге немесе оған қосымша пайдалы си-

паттамалар беруге мүмкіндік береді. БЦ модификациясы, негізінен, оның физика-химиялық көрсеткіштерін (ыдырау қабілеті, механикалық, термиялық, химиялық және беткі қасиеттері, реологиялық сипаттамалары) жақсартуға, сондай-ақ тағам өнімдерінің сапасын сақтау, сақтау мерзімін ұзарту және сапасын бақылау үшін биоактивті қосылыстар енгізуге бағытталған (Azeredo et al., 2019; Ramos et al., 2018).

Белсенді және/немесе интеллектуалды қаптама материалдарын жасау мақсатында БЦ-ны модификациялау үшін антимикробтық және антиоксиданттық агенттер, қоректік заттар, пластификаторлар, тұрақтандырғыштар, оттегі сіңіргіштер және антистатиктер сияқты әртүрлі функционалдық қоспаларды қолдануға болады (Ramos et al., 2018).

БЦ негізіндегі композиттер салыстырмалы түрде жаңа материалдар қатарына жатады. Олар бастапқыда медициналық мақсаттарда қолдануға ұсынылғанымен, қазіргі уақытта тағамдық орау өнеркәсібінде де сәтті қолданылуда. Қажетті функционалдық топтарды енгізу және БЦ матрицасына белгілі бір қасиеттер беру осы полисахаридті химиялық және физикалық модификациялау арқылы жүзеге асырылады.

Әдебиеттерде БЦ функционалдандырудың екі негізгі тәсілі атап көрсетіледі: *in situ* және *ex situ* әдістері (Cacicedo et al., 2016).

Биополимерлі композиттерді синтездеу үшін ең жиі қолданылатын стратегия – *in situ* әдісі, ол БЦ өндірісінің басында культуралық ортаға арматуралық материалдарды (мысалы, натрий альгинаты, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), поливинилспирт (ПВС), желатин, агар, пектин, крахмал) қосуды қамтиды (Cheng et al., 2011; Lin et al., 2016; Osorio et al., 2014; Andriani et al., 2020).

Модификацияның артықшылықтары – қарапайымдылығы және қосылған қосылыстардың БЦ-ның өсіп келе жатқан фибриллалық желісінің бөлігіне айналуы, бұл қажетті қасиеттері бар тұрақты композиттер алуға мүмкіндік береді. Алайда *in situ* әдісінің басты шектеулері – кейбір қоспалардың культуралық ортада ерімейуі және жекелеген арматуралық қосылыстардың бактериялардың өсуін тежейтін қасиеті (Cheng et al., 2011).

Ал *ex situ* модификациясы, керісінше, БЦ өндірісі аяқталғаннан кейін жүзеге асырылады. Бұл постсинтетикалық әдіс негізінен БЦ-ның кеуекті нанофибрилалық матрицасын биоактивті материалдармен қанықтыруға бағытталған. *Ex situ* әдісінің негізгі артықшылықтары – антимикроб-

тық агенттерді қолдану мүмкіндігі және БЦ-ның бастапқы құрылымдық ерекшеліктерін сақтау. Бұл модификация түрінің басты кемшілігі – гидрофобты арматуралық қосылыстарды қолдану мүмкін еместігі. Сонымен қатар, БЦ порларына тек субмикрондық немесе наноөлшемді бөлшектер ене алады (Andriani et al., 2020). Дегенмен, осы функционалдандыру әдістері БЦ-ның табиғи пленкаларының физика-химиялық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік беріп, оларды тағам өнімдерін орау нарығында қолданудың жаңа мүмкіндіктерін ашты.

Табиғи күйінде БЦ тағамдық өнім ретінде (Филиппиндік Nata de coco десерті ретінде белгілі) биоыдырайтын жеуге жарамды орау материалы ретінде қолданылуы мүмкін және тағаммен бірге тұтынуға жарамды (Vilela et al., 2018; Chunyan et al., 2012). Нативті БЦ өздігінен айқын антимикробтық және антиоксиданттық белсенділік көрсетпейді, алайда оның құрылымында химиялық модификацияға қолайлы жоғары реакцияға қабілетті гидроксил топтары (–ОН) бар. Бұл қоспаларға биоактивті агенттер (антимикробтық препараттар, антиоксиданттар, өсімдік экстракттары, эфир майлары, органикалық қышқылдар, ферменттер және т.б.), табиғи пигменттер, металл иондары, бейорганикалық және органикалық нанобөлшектер, пластификаторлар, УФ-стабилизаторлар, биополимерлер (мысалы, хитозан, крахмал, пектин) немесе арматуралық қоспалар (мысалы, КМЦ, ПВС, поливинилпирролидон (ПВП), монтмориллонит (ММТ)) жатады (Cacicedo et al., 2016).

Бұл әрекеттердің нәтижесінде тағам өнімдерін ластанудан және сыртқы ортаның әсерінен (тосқауылдық және антимикробтық қасиеттер), сондай-ақ сақтау және тасымалдау кезінде механикалық зақымданудан қорғауға қабілетті биоматериалдар алынады. Мысалы, БЦ-ны ПВП және КМЦ-пен біріктіру арқылы нативті БЦ мембраналарымен салыстырғанда жақсартылған механикалық, оптикалық және биоыдырайтын қасиеттерге ие композициялар алынған (Bandyopadhyay et al., 2018). Бұл пленкалар экологиялық таза балама ретінде қолданылуы мүмкін. **БЦ/ПВП/КМЦ биокөпозиттері** жоғары созылу беріктігінің арқасында механикалық зақымдануға жақсы төзімділік көрсетеді және осылайша көкөністер мен ет өнімдерінің сақтау мерзімін ұзартады (Bandyopadhyay et al., 2018). БЦ-ның гидроксил топтары қамтамасыз ететін химиялық реактивтілігі оны орау өнеркәсібінің нақты талаптарын орындау үшін (*in situ* және *ex situ*) түрлі модификацияларды

жүргізуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жоғары кеуектілік пен үлкен беттік аудан БЦ-ны белсенді қосылыстармен физикалық өзара әрекеттесу үшін қолайлы материал етеді (Azeredo et al., 2019).

БЦ негізіндегі белсенді/интеллектуалды орауды өндіруге арналған негізгі тәсілдерге сіңдіру, иммобилизация әдістері немесе БЦ матрицасын жабындармен қаптау жатады (Andriani et al., 2020). Мысалы, тағамдық патогендерден туындаған бұзылудың алдын алатын антимикробтық мембраналар БЦ пленкаларын низин, лактоферрин немесе  $\epsilon$ -полилизин сияқты бактериястатикалық ерітінділерге батыру арқылы алынды (Nguyen et al., 2008; Padrao et al., 2016; Wahid et al., 2019). Иммобилизацияны қолданатын әдістерге, мысалы, белсенді заттарды (грибтік лакказан немесе лизоцим сияқты) БЦ бетіне физикалық адсорбциялау немесе глутар альдегидін қолдану арқылы химиялық байланыстыру кіреді (Chen et al., 2015; Bayazidi et al., 2018; Buguaga-Ramiro et al., 2020). *Ex situ* модификациясының тағы бір мысалы – БЦ мембраналарына күміс нанобөлшектері мен молибден триоксидінің альгинатын жоғары қарқынды ультрадыбыстық ванна арқылы енгізу. Бұл кейіннен сутегі сульфидімен ( $H_2S$ ) қолданылатын гибриді пленкалар ретінде пайдаланылды (Sukhavattanakul & Manuspiya, 2020). Жалпы, осы технология арқылы өндірілген орау материалдары тағам өнімдерінің сапасын сақтау үшін арналған.

Соңғы уақытта БЦ және оның модификацияларын тағам өнімдерін бүлінуден қорғау үшін антимикробтық қасиеттері бар қосымша функциялары бар орау материалдары ретінде қолдану мүмкіндіктерін зерттеуге көбірек назар аударылуда. Көптеген зерттеулер табиғи антимикробтық агенттерді тағамдық орау жүйелеріне енгізу өнімдердің сақтау мерзімін ұзартуға және олардың сапасын сақтауға ықпал ететінін растады (Jafarzadeh et al., 2021). Мысалы, авторлар (Stroescu et al., 2019) БЦ және оның модификациялары негізінде суперабсорбент материалдардан жасалған антимикробтық тағамдық төсемдерді әзірледі. Олар жемістердің, көкөністердің және ет өнімдерінің дәмдік қасиеттерін тиімді сақтауға мүмкіндік берді (Okuyama et al., 1992).

БЦ-ның жеуге жарамдылығы оның негізінде бірегей тағамдық және физика-механикалық сипаттамалары бар жеуге жарамды орау материалдарын жасауға жол ашады (Zahan et al., 2020). Дегенмен, биополимерлі ораулардың кең ауқымды коммерциялық қолданылуына кедергі

келтіретін шектеулердің бірі – олардың синтетикалық полимерлерге қарағанда әмбебаптығының төмендігі (Ludwicka et al., 2020). Осыған байланысты қазіргі зерттеулер әртүрлі композициялар мен полимерлі композиттерді әзірлеуге бағытталған, олар синтетикалық пластмассалардың әмбебап қасиеттерін белгілі бір талаптарға сай имитациялай алады.

Айта кету керек, кейбір биопленкалар мен жабындар гигиеналық нормаларға сай болу үшін қосымша сыртқы орауды қажет етеді. Осыған байланысты авторлар (Azeredo et al., 2019) термопластикалық жүгері крахмалы және БЦ талшықтары негізінде жаңа композиттік материал әзірледі. Бұл материалдағы БЦ талшықтарының ең жоғары мөлшері 15%-дан аспайды. Зерттеулер көрсеткендей, талшықтардың қосылуы композиттің тосқауылдық қасиеттерін жақсартып, қаттылығын арттырады, бұл оның серпімділік модулінің ұлғаюына әкеледі.

Зерттеуде БЦ талшықтарын пайдаланып композиттер алу қарастырылады, ерекше қызығушылық тудырған жұмыстың бірі – Салариа М. және әріптестері (Salaria et al., 2019) әзірлеген нанокompозит. Ол хитозаннан, қышқылдық гидролиз арқылы алынған БЦ нанокристалдарынан және күміс нанобөлшектерінен тұрады. Бұл модификациялаушы компоненттерді енгізу хитозан пленкаларының түсі мен мөлдірлігіне айтарлықтай әсер етіп, олардың механикалық қасиеттерін, бу өткізгіштігін және суға сезімталдығын жақсартады. Сонымен қатар, бұл нанокompозит тағамдық патогендерге қарсы айқын антимикробтық белсенділік көрсетеді, бұл оны өнімнің сақтау мерзімін ұзартуға бағытталған белсенді тағамдық орау материалы ретінде перспективалы етеді.

БЦ құрамына әртүрлі модификаторларды енгізу ерекше қасиеттері бар жаңа материалдарды жасауға мүмкіндік береді. Мысалы, БЦ пленкаларына лаурин қышқылын қосу тағам, медицина және фармацевтика салаларында қолдануға болатын биоыдырайтын және антимикробтық материал алуға мүмкіндік берді. Зерттеулер лаурин қышқылы *Bacillus subtilis* өсуін тиімді түрде тежейтінін көрсетті, бұл мұндай пленканы орауда синтетикалық пластмассаларға лайықты балама етеді (Skiba et al., 2021).

Осылайша, БЦ-ны антимикробтық және басқа да функционалдық заттармен модификациялау әртүрлі қасиеттері бар орау материалдарын жасау үшін кең мүмкіндіктер ашады. Бүгінгі таңда бұл БЦ қолданудың ең перспективалы бағыттарының бірі болып саналады.

## Қорытынды

Әдеби дереккөздерді талдау бактериалды целлюлозаның (БЦ) құрылымы, қасиеттері, қолдану салалары және оны өндіру процесінде пайдаланылатын субстраттардың түрлері сияқты негізгі аспектілерін жүйелеуге мүмкіндік берді. БЦ алғаш рет шамамен жүз жыл бұрын сипатталғанымен, оның практикалық қолданылуы соңғы онжылдықтарда ғана айтарлықтай кеңейе бастады. Ерекше физика-химиялық және құрылымдық қасиеттерінің арқасында БЦ әртүрлі салаларда зерттеліп келеді, соның ішінде сорбенттік материалдарда, қағаз және тоқыма өндірісінде, тағам өнеркәсібінде қоспа ретінде, сондай-ақ сүзгілеуші және орау материалдары ретінде қолдану мүмкіндігі қарастырылуда.

Тағам өнімдерін орау сақтау және тасымалдау процесінің маңызды элементі болып табылады және өнімдердің сапасына, қауіпсіздігіне, сақтау мерзіміне және экономикалық тиімділігіне әсер етуі мүмкін. Қазіргі уақытта мұнай негізіндегі полимерлерден жасалған дәстүрлі орау материалдары кеңінен қолданылады, себебі олар өндірісінің салыстырмалы түрде қарапайымдылығымен, төмен бағасымен және жақсы механикалық қасиеттерімен ерекшеленеді. Алайда олардың көпшілігі биологиялық жолмен ыдырамайды және қоршаған ортада жиналуы белгілі бір экологиялық мәселелер туындатуы мүмкін. Осыған байланысты соңғы жылдары жаңартылатын шикізат көздерінен алынатын биоыдырайтын материалдарды зерттеуге қызығушылық артып келеді.

Бактериалды целлюлоза мұндай материалдардың бірі ретінде қарастырылады. Ол жоғары кристалдылық, химиялық тазалық, үш өлшемді наноталшықты құрылым және салыстырмалы түрде жақсы механикалық қасиеттерімен сипатталады. Сонымен қатар, БЦ-ның биоыдырағыштығы мен биосәйкестігі оны тағамдық орау материалдарына арналған әлеуетті биополимерлер қатарына жатқызуға мүмкіндік береді. БЦ-ны әртүрлі арматуралық қосылыстармен немесе биоактивті компоненттермен біріктіру оның физика-химиялық және функционалдық қасиеттерін өзгертуге және белсенді немесе интеллектуалды орау жүйелерін әзірлеуге мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, БЦ негізіндегі материалдарды кең ауқымды өндірісте қолдану бірқатар шектеулермен байланысты болуы мүмкін. Олардың қатарына продуцент микроорганизмдердің салыстырмалы түрде төмен өнімділігі, сондай-

ақ өндірістік процестің экономикалық тиімділігіне әсер ететін қоректік орталардың және кейбір функционалдық қоспалардың жоғары құны жатады. Осыған байланысты қазіргі зерттеулердің едәуір бөлігі өндірістік шығындарды төмендету тәсілдерін қарастыруға бағытталған. Атап айтқанда, қоректік орталардың құрамын оңтайландыру, сондай-ақ дәстүрлі Хестрин–Шрамм (ХШ) ортасын ауыл шаруашылығы немесе өнеркәсіптік биомассалық қалдықтарға негізделген баламалармен алмастыру мүмкіндіктері зерттелуде.

Жалпы алғанда, БЦ синтезі мен модификациялау әдістерін жетілдіру бұл материалды тағамдық орау саласында қолдану мүмкіндіктерін кеңейтуі мүмкін. Алдағы зерттеулер БЦ өндірісінің экономикалық тиімділігін арттыруға және оның функционалдық қасиеттерін мақсатты түрде реттеуге бағытталуы тиіс. Бұл бағыттағы ғылыми жұмыстардың нәтижелері БЦ-ны экологиялық тұрғыдан қолайлы орау материалдарының бірі ретінде қарастыруға негіз болуы мүмкін.

### Қаржыландыру көзі

Жұмыс 2025–2027 жылдарға арналған Қазақстан Республикасының Ұлттық гранттар бағдарламасының қолдауымен жүзеге асырылды. Қар-

жыландыру Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің 217 «Ғылымды дамыту» бюджеттік бағдарламасы және 102 «Ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру» қосымша бағдарламасы аясында берілді, келісім-шарт №371, 2025 жылғы 06 қазан, ИРН АР26103429 «Инновациялық тағамдық қаптама жасауға арналған биоыдырайтын функционалды целлюлоза пленкасын алудың биотехнологиялық тәсілі» орындалды.

### Мүдделер қақтығысы туралы мәлімдеме

Авторлар осы жұмыста ұсынылған нәтижелерге ықпал етуі мүмкін қандай да бір белгілі бәсекелес қаржылық мүдделердің немесе жеке қатынастардың жоқ екенін мәлімдейді.

### Авторлардың үлесі

*М.А. Абдулжанова: концептуализация, әдіснама, жазу – бастапқы нұсқа, формалдық талдау. Д.Х. Шокатаева: деректерді жинау және басқару, ғылыми жетекшілік, жобаны жалпы басқару. С.Д. Жантлесова: әдіснама, деректерді талдау, жазу – рецензиялау және редакциялау. А. Балтабай: ресурстар, зерттеуге техникалық қолдау. Ж. Батыкова: зерттеуді жүргізу, визуализация.*

### Әдебиеттер

- Aleshina, L. A., Glazkova, S. V., Lugovskaya, L. A., Podoinikova, M. V., Fofanov, A. D., & Silina, E. V. (2001). *Sovremennyye predstavleniya o stroenii tsellyuloz (obzor). Khimiya rastitel'noy syr'ya*, (1), 5–36. (In Russian)
- Andriani, D., Apriyana, A. Y., & Karina, M. (2020). The optimization of bacterial cellulose production and its applications: A review. *Cellulose*, 27, 1–20 <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03273-9>
- Arrieta, M. P., Castro-López, M. D. M., Rayón, E., Barral-Losada, L. F., López-Vilariño, J. M., López, J., & González-Rodríguez, M. V. (2014). Plasticized poly(lactic acid)-poly(hydroxybutyrate) (PLA-PHB) blends incorporated with catechin intended for active food-packaging applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62, 10170–10180 <https://doi.org/10.1021/jf5029812>
- Azeredo, H. M. C., Barud, H., Farinas, C. S., Vasconcellos, V. M., & Claro, A. M. (2019). Bacterial cellulose as a raw material for food and food packaging applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00007>
- Bandyopadhyay, S., Saha, N., Brodnjak, U. V., & Saha, P. (2018). Bacterial cellulose based greener packaging material: A bioadhesive polymeric film. *Materials Research Express*, 5, 115405. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aadb01>
- Bayazidi, P., Almasi, H., & Asl, A. K. (2018). Immobilization of lysozyme on bacterial cellulose nanofibers: Characteristics, antimicrobial activity and morphological properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 2544–2551. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.137>
- Bharimalla, A. K., Deshmukh, S. P., Vigneshwaran, N., Patil, P. G., & Prasad, V. (2017). Nanocellulose-polymer composites for applications in food packaging: Current status, future prospects and challenges. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56, 805–823. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1233281>
- Bogatyeva, A. O. (2021). *Optimizatsiya uslovii biosinteza bakterial'noy tsellyulozyi poluchenie na ee osnove biokompozitsionnykh materialov s antibakterial'nymi svoystvami* (PhD thesis). Saransk. (In Russian)
- Borges, J. A., Romani, V. P., Cortez-Vega, W. R., & Martins, V. G. (2015). Influence of different starch sources and plasticizers on properties of biodegradable films. *International Food Research Journal*, 22, 2346–2351.
- Bugnicourt, E., Cinelli, P., Lazzeri, A., & Alvarez, V. (2014). Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. *Express Polymer Letters*, 8, 791–808. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2014.82>

- Buruaga-Ramiro, C., Valenzuela, S. V., Valls, C., Roncero, M. B., Pastor, F. I. J., Díaz, P., & Martínez, J. (2020). Development of an antimicrobial bioactive paper made from bacterial cellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*, *158*, 587–594. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.234>
- Cacicedo, M. L., Castro, M. C., Servetas, I., Bosnea, L., Boura, K., Tsafrakidou, P., Dima, A., Terpou, A., Koutinas, A., & Castro, G. R. (2016). Progress in bacterial cellulose matrices for biotechnological applications. *Bioresource Technology*, *213*, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.071>
- Carreira, P., Mendes, J. A. S., Trovatti, E., Serafim, L. S., Freire, C. S. R., Silvestre, A. J. D., & Neto, C. P. (2011). Utilization of residues from agro-forest industries in the production of high value bacterial cellulose. *Bioresource Technology*, *102*, 7354–7360. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.081>
- Chawla, P. R., Bajaj, I. B., Survase, S. A., & Singhal, R. S. (2009). Microbial cellulose: Fermentative production and applications. *Food Technology and Biotechnology*, *47*, 107–124.
- Chen, H., Wang, J., Cheng, Y., Wang, C., Liu, H., Bian, H., Pan, Y., Sun, J., & Han, W. (2019). Application of protein-based films and coatings for food packaging: A review. *Polymers*, *11*, 2039. <https://doi.org/10.3390/polym11122039>
- Chen, L., Hong, F., Yang, X.-X., & Han, S.-F. (2013). Biotransformation of wheat straw to bacterial cellulose and its mechanism. *Bioresource Technology*, *135*, 464–468. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.029>
- Chen, L., Zou, M., & Hong, F. F. (2015). Evaluation of fungal laccase immobilized on natural nanostructured bacterial cellulose. *Frontiers in Microbiology*, *6*, 1245. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01245>
- Cheng, K. C., Catchmark, J. M., & Demirci, A. (2011). Effects of CMC addition on bacterial cellulose production in a biofilm reactor. *Biomacromolecules*, *12*, 730–736. <https://doi.org/10.1021/bm101363t>
- Chunyan, Z., & Yuguang, Z. (2012). Edible food packaging film. CN Patent CN102145779B.
- Çakar, F., Özer, I., Aytekin, A. Ö., & Şahin, F. (2014). Improved production of bacterial cellulose by semi-continuous process in molasses medium. *Carbohydrate Polymers*, *106*, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.103>
- DeGruson, M. L. (2016). Biobased polymer packaging. In G. Smithers (Ed.), *Reference module in food science* (pp. 1–10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03373-4>
- Diez-Pascual, A. M. (2019). Synthesis and applications of biopolymer composites. *International Journal of Molecular Sciences*, *20*, 2321. <https://doi.org/10.3390/ijms20092321>
- European Commission. (2018). *A European strategy for plastics in a circular economy* (Document 52018DC0028). Publications Office of the European Union.
- European Commission. (2020). *A new circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe* (Document 52020DC0098). Publications Office of the European Union.
- Ferreira, A. R. V., Alves, V. D., & Coelho, I. M. (2016). Polysaccharide-based membranes in food packaging applications. *Membranes*, *6*, 22. <https://doi.org/10.3390/membranes6010022>
- Florea, M., Hagemann, H., Santosa, G., et al. (2016). Engineering control of bacterial cellulose production using a genetic toolkit and a new cellulose-producing strain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(24), E3431–E3440. <https://doi.org/10.1073/pnas.1522985113>
- Gama, M., Dourado, F., & Bielecki, S. (2016). *Bacterial nanocellulose: From biotechnology to bio-economy*. Elsevier. ISBN: 9780444634580
- Gladysheva, E. K., & Skiba, E. A. (2014). Vliyanie uglerodnogo sostava pitatel'nykh sred na produktivnost' tsellyulozozinteziruyushchikh bakterii (obzor). *Polzunovskii vestnik*, (3), 168–173. (In Russian) [https://journal.altstu.ru/media/old2/pv2014\\_03/pdf/168gladysheva.pdf](https://journal.altstu.ru/media/old2/pv2014_03/pdf/168gladysheva.pdf)
- Glazkov, S. V., Koptsev, S. V., Lesnikova, N. A., Bogdanova, V. V., & Volodarskaya, T. K. (2018). Sovremennye innovatsionnye tekhnologii khraneniya svezhikh fruktov i ovoshchei i produktov ikh pererabotki (obzor). *Ovoshchi Rossii*, (5), 84–89. (In Russian) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-5-84-89>
- Goelzer, F. D. E., Faria-Tischer, P. C. S., Vitorino, J. C., Sierakowski, M. R., & Tischer, C. A. (2009). Production and characterization of nanospheres of bacterial cellulose from *Acetobacter xylinum* from processed rice bark. *Materials Science and Engineering C*, *29*, 546–551. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.10.013>
- Gorgieva, S., & Trček, J. (2019). Bacterial cellulose: Production, modification and perspectives in biomedical applications. *Nanomaterials*, *9*, 1352. <https://doi.org/10.3390/nano9101352>
- Gregory, D. A., Tripathi, L., Fricker, A. T. R., Asare, E., Orlando, I., Raghavendran, V., & Roy, I. (2021). Bacterial cellulose: A smart biomaterial with diverse applications. *Materials Science and Engineering R*, *145*, 100623. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100623>
- Grujić, R., Vujadinović, D., & Savanović, D. (2017). Biopolymers as food packaging materials. In E. Pellicer et al. (Eds.), *Advances in applications of industrial biomaterials* (pp. 139–160). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62767-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62767-0_6)
- Hong, F., Guo, X., Zhang, S., Han, S.-F., Yang, G., & Jönsson, L. J. (2012). Bacterial cellulose production from cotton-based waste textiles. *Bioresource Technology*, *104*, 503–508. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.028>
- Hong, F., & Qiu, K. (2008). An alternative carbon source from konjac powder for enhancing bacterial cellulose production. *Carbohydrate Polymers*, *72*, 545–549. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.09.015>
- Hussain, Z., Sajjad, W., Khan, T., & Wahid, F. (2019). Production of bacterial cellulose from industrial wastes: A review. *Cellulose*, *26*, 2895–2911. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02307-1>
- Jabeen, N., Majid, I., & Nayik, G. A. (2015). Bioplastics and food packaging: A review. *Cogent Food & Agriculture*, *1*, 1117749. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1117749>
- Jafarzadeh, S., Nafchi, A. M., Salehabadi, A., & Oladzad-Abbasabadi, N. (2021). Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending shelf life. *Advances in Colloid and Interface Science*, *291*, 102405. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102405>

- Jedrzejczak-Krzepkowska, M., Kubiak, K., Ludwicka, K., & Bielecki, S. (2016). Bacterial nanocellulose synthesis: Recent findings. In M. Gama et al. (Eds.), *Bacterial nanocellulose* (pp. 19–46). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63458-0.00002-0>
- Jeyasubramanian, K., & Balachander, R. (2016). Starch bioplastic film as an alternative food-packaging material. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 75, 78–84. <https://doi.org/10.5604/17348412.1228383>
- Jung, S., Cui, Y., Barnes, M., Satam, C., et al. (2020). Multifunctional bio-nanocomposite coatings for perishable fruits. *Advanced Materials*, 32, 1908291. <https://doi.org/10.1002/adma.201908291>
- Kistaubayeva, A., Savitskaya, I., & Shokatayeva, D. H. (2021). Isolation and identification of a new bacterial cellulose producing strain. In *Proceedings of the 5th Symposium on EuroAsian Biodiversity* (p. 230).
- Kraśniewska, K., Pobięga, K., & Gniewosz, M. (2019). Pullulan biopolymer with potential for food packaging. *International Journal of Food Engineering*, 15, 20190030. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0030>
- Kumar, N., Kaur, P., & Bhatia, S. (2017). Advances in bio-nanocomposite materials for food packaging. *Nutrition & Food Science*, 47, 591–606. <https://doi.org/10.1108/NFS-11-2016-0176>
- Kurosumi, A., Sasaki, C., Yamashita, Y., & Nakamura, Y. (2009). Utilization of fruit juices as carbon source for bacterial cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 76, 333–335. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.11.009>
- Lin, S.-P., Liu, C.-T., Hsu, K.-D., Hung, Y.-T., Shih, T.-Y., & Cheng, K.-C. (2016). Production of bacterial cellulose with additives. *Cellulose*, 23, 367–377. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0855-0>
- Lin, X., Fan, X., Li, R., Li, Z., Ren, T., Ren, X., & Huang, T. S. (2018). Preparation of biodegradable antibacterial nanofibrous membranes. *Polymer Advanced Technologies*, 29, 481–489. <http://dx.doi.org/10.1002/pat.4137>
- Lu, Z., Zhang, Y., Chi, Y., Xu, N., Yao, W., & Sun, B. (2011). Effects of alcohols on bacterial cellulose production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27, 2281–2285. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0692-8>
- Ludwicka, K., Kaczmarek, M., & Białkowska, A. (2020). Bacterial nanocellulose—a biobased polymer for active packaging. *Polymers*, 12, 2209. <https://doi.org/10.3390/polym12102209>
- Mautner, A. (2020). Nanocellulose water treatment membranes and filters: A review. *Polymer International*, 69, 741–751. <https://doi.org/10.1002/pi.5993>
- Milani, J. M., & Tirgarian, B. (2020). Edible protein-based packaging overview. *Journal of Packaging Technology and Research*, 4, 103–115. <https://doi.org/10.1007/s41783-020-00086-w>
- Mitra, R., Xu, T., Xiang, H., & Han, J. (2020). Polyhydroxyalkanoates synthesis by halophiles. *Microbial Cell Factories*, 19, 1–30.
- Mohsin, A., Zaman, W. Q., Guo, M., Ahmed, W., Khan, I. M., Niazi, S., Rehman, A., Hang, H., & Zhuang, Y. (2020). Xanthan-curdlan nexus for synthesizing edible food packaging films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.008>
- Molina-Ramírez, C., Castro, C., Zuluaga, R., & Gañán, P. (2018). Physical characterization of bacterial cellulose produced by *Komagataeibacter medellinensis* using food supply chain waste and agricultural by-products as alternative low-cost feedstocks. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 830–837. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-0993-6>
- Moniri, M., Boroumand Moghaddam, A., Azizi, S., Abdul Rahim, R., Bin Ari, A., Zuhainis Saad, W., Navaderi, M., & Mohamad, R. (2017). Production and status of bacterial cellulose in biomedical engineering. *Nanomaterials*, 7, 257. <https://doi.org/10.3390/nano7090257>
- Nagalakshmaiah, M., Afrin, S., Malladi, R. P., Elkoun, S., Robert, M., Ansari, M. A., Svedberg, A., & Karim, Z. (2019). Biocomposites: Present trends and challenges for the future. In G. Koronis & A. Silva (Eds.), *Green composites for automotive applications* (pp. 197–215). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102177-4.00009-4>
- Nguyen, V. T., Gidley, M. J., & Dykes, G. A. (2008). Potential of a nisin-containing bacterial cellulose film to inhibit *Listeria monocytogenes* on processed meats. *Food Microbiology*, 25, 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.01.004>
- Nur Hazirah, M. A. S. P., Isa, M. I. N., & Sarbon, N. M. (2016). Effect of xanthan gum on the physical and mechanical properties of gelatin-carboxymethyl cellulose film blends. *Food Packaging and Shelf Life*, 9, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.foodpsl.2016.05.008>
- Okiyama, A., Motoki, M., & Yamanaka, S. (1992). Bacterial cellulose II. Processing of the gelatinous cellulose for food materials. *Food Hydrocolloids*, 6, 479–487. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(09\)80033-7](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(09)80033-7)
- Osorio, M. A., Restrepo, D., Velásquez-Cock, J. A., Zuluaga, R. O., Montoya, U., Rojas, O., Gañán, P. F., Marin, D., & Castro, C. I. (2014). Synthesis of thermoplastic starch-bacterial cellulose nanocomposites via *in situ* fermentation. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 25, 1607–1613. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20140146>
- Padrão, J., Gonçalves, S., Silva, J. P., Sencadas, V., Lanceros-Méndez, S., Pinheiro, A. C., Vicente, A. A., Rodrigues, L. R., & Dourado, F. (2016). Bacterial cellulose-lactoferrin as an antimicrobial edible packaging. *Food Hydrocolloids*, 58, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.019>
- Pellicer, E., Nikolic, D., Sort, J., Baró, M. D., Zivic, F., Grujovic, N., Grujic, R., & Pelemis, S. (2017). *Advances in applications of industrial biomaterials*. Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-62766-3 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62767-0>
- Rahman, R. (2019). Bioplastics for food packaging: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, 2311–2321. <https://doi.org/10.20546/ijcm.2019.803.274>
- Ramos, Ó. L., Pereira, R. N., Cerqueira, M. A., Martins, J. R., Teixeira, J. A., Malcata, F. X., & Vicente, A. A. (2018). Bio-based nanocomposites for food packaging and their effect in food quality and safety. In A. M. Grumezescu & A. M. Holban (Eds.), *Food packaging and preservation* (pp. 271–306). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811516-9.00008-7>
- Rani, M. U., & Appaiah, K. A. A. (2013). Production of bacterial cellulose by *Gluconacetobacter hansenii* UAC09 using coffee cherry husk. *Journal of Food Science and Technology*, 50, 755–762. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0401-5>

Salaria, M., Khiabani, M. S., Mokarram, R. R., Ghanbarzadeh, B., & Kafil, H. S. (2018). Development and evaluation of chitosan based active nanocomposite films containing bacterial cellulose nanocrystals and silver nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 84, 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.037>

Savitskaya, I. S., Kistaubaeva, A. S., Zhantlesova, S. D., & Kurmangali, A. K. (2017). Podbor optimal'nykh uslovii dlya rosta produktov biosinteza gel'-plenki bakterial'noi tsellyulozy. In *Materialy IV Mezhdunarodnykh Farabievskikh chtenii* (p. 82). Almaty. (In Russian)

Schmidt-Traub, G., Obersteiner, M., & Mosnier, A. (2019). The urgency of agriculture green development. *Nature*, 181–183. <https://doi.org/10.15302/j-fase-2019313>

Schramm, M., & Hestrin, S. (1954). Factors affecting production of cellulose at the air/liquid interface of a culture of *Acetobacter xylinum*. *Microbiology*, 11, 123–129. <https://doi.org/10.1099/00221287-11-1-123>.

Shen, L., Haufe, J., & Patel, M. K. (2009). *Product overview and market projection of emerging bio-based plastics*. Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, Utrecht University. [https://doi.org/https://www.uu.nl/sites/default/files/copernicus\\_probip2009\\_final\\_june\\_2009\\_revised\\_in\\_november\\_09.pdf](https://doi.org/https://www.uu.nl/sites/default/files/copernicus_probip2009_final_june_2009_revised_in_november_09.pdf)

Shendurse, A. (2018). Milk protein based edible films and coatings—Preparation, properties and food applications. *Journal of Nutrition and Health Food Engineering*, 8, 219–226. <https://doi.org/10.15406/jnhfe.2018.08.00273>

Shi, Z., Zhang, Y., Phillips, G. O., & Yang, G. (2014). Utilization of bacterial cellulose in food. *Food Hydrocolloids*, 35, 539–545. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.012>

Shokatayeva, D. Kh., Savitskaya, I. S., Kistaubaeva, A. S., Abdulzhanova, M. A., & Talipova, A. B. (2018). Strukturnye i mekhanicheskie svoystva bakterial'noi tsellyulozy. *Vestnik KazNU. Ekologicheskaya seriya*, 55(2), 80–91. (In Russian) <https://bulletin-ecology.kaznu.kz/index.php/1-eco/article/view/818>

Shokatayeva, D. Kh., Savitskaya, I. S., Kistaubaeva, A. S., & Talipova, A. B. (2018). Izolirovanie bakterii vida *Komagataeibacter*. In *Materialy XV Mezhdunarodnoi konferentsii* (pp. 23–26). Belgorod. (In Russian) <https://pps.kaznu.kz/kz/Main/FileShow2/129946/76/359/924/%D0%A1%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D1%86%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%98%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B0%20%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B0/2020/2>

Shokatayeva, D., Ignatova, L., Savitskaya, I., Kistaubaeva, A., Talipova, A., Asylbekova, A., Abdulzhanova, M., & Mashzhan, A. (2019). Bacterial cellulose and pullulan from simple and low cost production media. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 21, 247–258. <https://doi.org/10.18321/ectj866>

Skiba, E. A., Budaeva, V. V., Ovchinnikova, E. V., Gladysheva, E. K., Kashcheyeva, E. I., Pavlov, I. N., & Sakovich, G. V. (2020). A technology for pilot production of bacterial cellulose from oat hulls. *Chemical Engineering Journal*, 383, 123128. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123128>

Skiba, E. A., Gladysheva, E. K., Golubev, D. S., & Budaeva, V. V. (2021). Self-standardization of quality of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* in nutrient media derived from *Miscanthus* biomass. *Carbohydrate Polymers*, 252, 117178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117178>

Stroescu, M., Isopencu, G., Busuioc, C., & Stoica-Guzun, A. (2019). Antimicrobial food pads containing bacterial cellulose and polysaccharides. In *Cellulose-based superabsorbent hydrogels* (pp. 1303–1338). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-77830-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77830-3_3)

Sukhavattanakul, P., & Manuspiya, H. (2020). Fabrication of hybrid thin film based on bacterial cellulose nanocrystals and metal nanoparticles with hydrogen sulfide gas sensor ability. *Carbohydrate Polymers*, 230, 115566. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115566>.

Tanpichai, S., Witayakran, S., Wootthikanokkhan, J., Srmarut, Y., Woraprayote, W., & Malila, Y. (2020). Mechanical and antibacterial properties of the chitosan coated cellulose paper for packaging applications: Effects of molecular weight types and concentrations of chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 1510–1519. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.128>

Tsouko, E., Kourmentza, C., Ladakis, D., Kopsahelis, N., Mandala, I., Papanikolaou, S., Paloukis, F., Alves, V., & Koutinas, A. (2015). Bacterial cellulose production from industrial waste and by-product streams. *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 14832–14849. <https://doi.org/10.3390/ijms1607148322>

V poiskakh plastika: kak Greenpeace v Rossii i lyudi po vsei strane izuchali plastikovyi musor na beregakh morei, rek i ozer. (2020). Moscow. (In Russian)

Vazquez, A., Foresti, M. L., Cerrutti, P., & Galvagno, M. (2013). Bacterial cellulose from simple and low cost production media by *Gluconacetobacter xylinus*. *Journal of Polymers and the Environment*, 21, 545–554. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0541-3>

Vilela, C., Kurek, M., Hayouka, Z., Röcker, B., Yildirim, S., Antunes, M. D. C., Nilsen-Nygaard, J., Pettersen, M. K., & Freire, C. S. R. (2018). A concise guide to active agents for active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.006>

Wagh, Y. R., Pushpadass, H. A., Emerald, F. M. E., & Nath, B. S. (2014). Preparation and characterization of milk protein films and their application for packaging of Cheddar cheese. *Journal of Food Science and Technology*, 51, 3767–3775. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0916-4>

Wahid, F., Wang, F. P., Xie, Y. Y., Chu, L. Q., Jia, S. R., Duan, Y. X., Zhang, L., & Zhong, C. (2019). Reusable ternary PVA films containing bacterial cellulose fibers and polylysine with improved mechanical and antibacterial properties. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 183, 110486. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110486>

Wang, S. S., Han, Y. H., Chen, J. L., Zhang, D. C., Shi, X. X., Ye, Y. X., Chen, D. L., & Li, M. (2018). Insights into bacterial cellulose biosynthesis from different carbon sources and the associated biochemical transformation pathways in *Komagataeibacter* sp. W1. *Polymers*, 10, 963. <https://doi.org/10.3390/polym10090963>

Wu, J., Zhong, F., Li, Y., Shoemaker, C. F., & Xia, W. (2013). Preparation and characterization of pullulan-chitosan and pullulan-carboxymethyl chitosan blended films. *Food Hydrocolloids*, 30, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.04.002>.

Zahan, K. A., Azizul, N. M., Mustapha, M., Tong, W. Y., Abdul Rahman, M. S., & Sahuri, I. S. (2020). Application of bacterial cellulose film as a biodegradable and antimicrobial packaging material. *Materials Today: Proceedings*, 31, 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.201>

Zakaria, N. H., Muhammad, N., Sandu, A. V., & Abdullah, M. M. A. B. (2018). Effect of mixing temperature on characteristics of thermoplastic potato starch film. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 374, 012083. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012083>

Zeng, X., Small, D. P., & Wan, W. (2011). Statistical optimization of culture conditions for bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* BPR 2001 from maple syrup. *Carbohydrate Polymers*, 85, 506–513. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.02.034>

Zhang, C., Gao, D., Ma, Y., & Zhao, X. (2013). Effect of gelatin addition on properties of pullulan films. *Journal of Food Science*, 78, C805–C810. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02925.x>

Zhao, H., Li, J., & Zhu, K. (2018). Bacterial cellulose production from waste products and fermentation conditions optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 394, 022041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/2/022041>

Zheng, J., & Suh, S. (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. *Nature Climate Change*, 9, 374–378. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0459-z>

Zhong, Y., Godwin, P., Jin, Y., & Xiao, H. (2020). Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.002>

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

Абдулжанова Малика Анварбеговна (хат-хабарға жауапты автор) – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com).

Шокатаева Дина Хабдулманатовна – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: dina\_ibrayeva\_91@mail.ru).

Жантлесова Сирина Дүйсеновна – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: sirina.zhantlesova@mail.ru).

Балтабай Ақниет – магистр, ғылыми қызметкер, «Жану проблемалары институты» РМК (Алматы, Қазақстан, e-mail: bakniyet@gmail.com).

Батықова Жұлдыз – магистр, ғылыми қызметкер, Биология және биотехнология проблемалары ФЗИ (Алматы, Қазақстан, e-mail: batyqova@gmail.com).

#### **Information about authors:**

Abdulzhanova Malika Anvarbegovna (corresponding author) – PhD, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com).

Shokatayeva Dina Khabdulmanatovna – PhD, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: dina\_ibrayeva\_91@mail.ru).

Zhantlesova Sirina Duisenovna – PhD, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sirina.zhantlesova@mail.ru).

Baltabay Akniyet – MSc, Researcher, RSE “Institute of Combustion Problems” (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bakniyet@gmail.com).

Batykova Zhuldyz – MSc, Researcher, Research Institute of Biology and Biotechnology Problems (Almaty, Kazakhstan, e-mail: batyqova@gmail.com).

#### **Сведения об авторах:**

Абдулжанова Малика Анварбеговна (корреспондентный автор) – PhD, старший преподаватель КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com).

Шокатаева Дина Хабдулманатовна – PhD, старший преподаватель КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: dina\_ibrayeva\_91@mail.ru).

Жантлесова Сирина Дүйсеновна – PhD, старший преподаватель КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: sirina.zhantlesova@mail.ru).

Балтабай Ақниет – магистр, ИС, РГП «Институт проблем горения» (Алматы, Казахстан, e-mail: bakniyet@gmail.com).

Батықова Жұлдыз – магистр, ИС, НИИ Проблем биологии и биотехнологии (Алматы, Казахстан, e-mail: batyqova@gmail.com).

Поступила 9 июля 2025 года  
Принята 25 марта 2026 года

**A.S. Nurmahanova<sup>1</sup>** , **S.D. Atabayeva<sup>1\*</sup>** ,  
**A.B. Rakhymgozhina<sup>1,2</sup>** , **S.S. Kenzhebayeva<sup>1</sup>** , **S.Sh. Asrandina<sup>1</sup>** ,  
**A.Zh. Beisenova<sup>3</sup>** , **A.B. Myltykbayeva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kenzhegali Sagadiev University of International Business, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: sauleat@yandex.ru

## SIGNIFICANCE AND APPLICATION OF PLANT GROWTH REGULATORS

Plant growth regulators (PGRs) are natural or synthetic compounds that modulate plant growth, development, and stress responses by adjusting endogenous hormone concentrations and influencing signaling pathways. This review examines the roles of key phytohormones which regulate physiological processes and tolerance mechanisms to abiotic stress. Abscisic acid emerges as the principal stress-responsive hormone, governing stomatal closure, water balance maintenance, and osmotic adjustment under adverse conditions. Auxins regulate cell elongation, vascular differentiation, and root architecture, with their homeostasis being significantly altered under environmental stress. Cytokinins promote photosynthetic efficiency and delay senescence, while gibberellins control stem elongation, seed germination, and flowering induction. Jasmonates contribute to both biotic and abiotic stress defense through activation of antioxidant systems and stomatal regulation. The review also examines how humic substances function helping plants better tolerate stress by improving nutrient absorption, activating antioxidant systems, and influencing auxin-like activity. Humic acids interact with root cells, influence ion absorption, and mitigate oxidative damage caused by reactive oxygen species under stress conditions. Practical applications of PGRs in agriculture are discussed, including their use in promoting flowering, fruit development, vegetative propagation, and yield enhancement. The integration of PGRs with biostimulants and microbial inoculants represents a promising strategy for sustainable crop production under increasingly challenging environmental conditions. Future research directions emphasize molecular approaches for optimizing hormonal manipulation and developing stress-resilient crop varieties.

**Keywords:** plants, growth regulators, phytohormones, humic substances.

А.С. Нурмаханова<sup>1</sup>, С.Д. Атабаева<sup>1\*</sup>, А.Б. Рахымгожина<sup>1,2</sup>, С.С. Кенжебаева<sup>1</sup>,  
С.Ш. Асрандина<sup>1</sup>, А.Ж. Бейсенова<sup>3</sup>, А.Б. Мылтыкбаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ал-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Кенжеғали Сағадиев атындағы Халықаралық Бизнес Университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>С.Д. Асфендиярова атындағы Қазақ ұлттық медициналық университеті, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: sauleat@yandex.ru

### Өсу реттегіштердің маңызы және оларды қолдану

Өсімдіктердің өсу реттегіштері (ӨР) – эндогендік гормондардың концентрациясын реттеу және сигнал беру жолдарына әсер ету арқылы өсімдіктердің өсуін, дамуын және стресске реакциясын модуляциялайтын табиғи немесе синтетикалық қосылыстар. Бұл шолуда негізгі фитогормондардың – абсциз қышқылының, ауксиндердің, цитокининдердің, гиббереллиндердің, жасмонаттардың – өсімдіктердің өсу процестерін реттеудегі және абиотикалық стресстерге, соның ішінде құрғақшылыққа, тұздылыққа, экстремалды температураға және ауыр металдардың ластануына төзімділікті қамтамасыз етудегі рөлі қарастырылады. Абсциз қышқылы леп тесіктердің жабылуын, су балансын сақтауды және қолайсыз жағдайларда осмостық реттеуді реттейтін стресске жауап беретін негізгі гормон ретінде пайда болады. Ауксиндер жасушалардың созылуын, тамырлардың дифференциациясын және тамыр архитектурасын реттейді, олардың гомеостаздары қоршаған ортаның күйзелісі кезінде айтарлықтай өзгереді. Цитокининдер фотосинтездің тиімділігіне ықпал етеді және қартаюды кешіктіреді, ал гиббереллиндер сабақтың ұзаруын, тұқымның өнуін және гүлдену индукциясын бақылайды. Жасмонаттар антиоксидантты жүйелерді белсендіру және стоматологиялық реттеу арқылы биотикалық және абиотикалық стресстен қорғауға ықпал етеді. Шолу гуминді заттардың қоректік заттардың

антиоксиданттық ферменттерді белсендіру және ауксинге ұқсас дабыл беру жолдарын модуляциялау арқылы өсімдіктердің стресске төзімділігін арттыруға қабілетті табиғи биостимуляторлар ретіндегі рөлін одан әрі зерттейді. Гумин қышқылдары тамыр жасушаларымен әрекеттеседі, иондардың сіңуіне әсер етеді және стресс жағдайында реактивті оттегі түрлерінің тотығу зақымдануын азайтады. Ауыл шаруашылығындағы ӨР-дің практикалық қолданылуы, оның ішінде гүлденуді, жемістердің дамуын, вегетативті көбеюін және өнімділікті арттыруда қолданылуы талқыланады. ӨР-ді биостимуляторлармен және микробтық егу құралдарымен біріктіру барған сайын күрделі экологиялық жағдайларда тұрақты өсімдік шаруашылығының перспективасын білдіреді. Болашақ зерттеу бағыттары гормоналды манипуляцияны оңтайландырудың және стресске төзімді дақылдардың сорттарын дамытудың молекулалық тәсілдеріне баса назар аударады.

**Түйін сөздер:** өсімдіктер, өсу реттегіштер, фитогормондар, гуминдік заттар.

А.С. Нурмаханова<sup>1</sup>, С.Д. Атабаева<sup>1\*</sup>, А.Б. Рахымгожина<sup>1, 2</sup>, С.С. Кенжебаева<sup>1</sup>,  
С.Ш. Асрандина<sup>1</sup>, А.Ж. Бейсенова<sup>3</sup>, А.Б. Мылтыкбаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Университет международного бизнеса имени К. Сагадиева, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова, Алматы, Казахстан

\*e-mail: sauleat@yandex.ru

### Значение рост регуляторов и их применение

Регуляторы роста растений (PGR) – это природные или синтетические соединения, которые модулируют рост, развитие растений и реакцию на стресс, регулируя концентрацию эндогенных гормонов и влияя на сигнальные пути. В этом обзоре рассматривается роль ключевых фитогормонов – абсцизовой кислоты, ауксинов, цитокининов, гиббереллинов и жасмонатов – в регуляции процессов роста растений и обеспечении устойчивости к абиотическим стрессам, включая засуху, засоление, экстремальные температуры и загрязнение тяжелыми металлами. Абсцизовая кислота выступает в качестве основного гормона, реагирующего на стресс, регулирующего закрытие устьиц, поддержание водного баланса и осмотическую регуляцию в неблагоприятных условиях. Ауксины регулируют удлинение клеток, дифференцировку сосудов и архитектуру корней, при этом их гомеостаз значительно изменяется в условиях воздействия окружающей среды. Цитокинины повышают эффективность фотосинтеза, замедляют старение, гиббереллины контролируют удлинение стебля, прорастание семян, индукцию цветения. Жасмонаты способствуют защите как от биотического, так и от абиотического стресса за счет активации антиоксидантных систем и устьичной регуляции. В обзоре также рассматривается роль гуминовых веществ как природных биостимуляторов, способных повышать устойчивость растений к стрессу за счет улучшения усвоения питательных веществ, активации антиоксидантных ферментов и модуляции ауксиноподобных сигнальных путей. Гуминовые кислоты взаимодействуют с клетками корней, влияют на поглощение ионов и смягчают окислительные повреждения, вызванные активными формами кислорода в условиях стресса. Обсуждается практическое применение PGR в сельском хозяйстве, включая их использование для стимулирования цветения, развития плодов, вегетативного размножения и повышения урожайности. Интеграция PGR с биостимуляторами и микробиологическими инокулянтами представляет собой многообещающую стратегию устойчивого растениеводства во все более сложных условиях окружающей среды. В будущих направлениях исследований особое внимание уделяется молекулярным подходам к оптимизации гормональных манипуляций и выведению устойчивых к стрессам сортов сельскохозяйственных культур.

**Ключевые слова:** растения, рост регуляторы, фитогормоны, гуминовые вещества.

### Introduction

Plant growth regulators (PGRs) are synthetic substances widely used in agriculture to protect against diseases, stimulate growth, and increase crop yields. Despite their diversity, their action is based on a common principle: they regulate the levels of natural plant hormones by influencing various signaling pathways. GRs are applied in agriculture to support growth under unfavorable conditions, boost

productivity, and alter plant development (Peleg et al., 2011; Small, Degenhardt, 2018).

PGRs are agents capable of modifying the processes governing plant growth and maturation. Endogenous PGRs are synthesized naturally within plants in trace amounts. Growth stimulating phytohormones (auxins, cytokinins, gibberellins, brassinosteroids) promote cellular elongation and proliferation, ethylene and abscisic acid serve as suppressors of these activities. They are small dif-

fusing molecules, and brassinosteroids, jasmonic acid, and salicylic acid are distinguished among the newer classes, which also play an important role in regulating growth and development (Choudhary, A. Kumari. 2021).

Auxins are the main hormones responsible for stretching cells during tropisms (photo- and gravitropism), while also regulating differentiation of meristem. They play an important role in cell expansion, formation of vascular tissue and lateral roots, and also the maintenance of apical dominance.

Cytokinins were first identified by their ability to stimulate cytokinesis, promote cellular division, bud initiation, the expansion of lateral shoot buds. Gibberellins promote the release from dormancy across diverse plant species, accelerate seed germination, drive stem elongation, and induce flowering. Gibberellins trigger germination in certain seeds, promote the development of parthenocarpic fruits,

Synthetic counterparts of naturally occurring growth regulators hold the greatest value for practical applications. These include artificial versions of auxins and cytokinins, engineered brassinolides, and compounds that exert a retarding influence on development. Most commercial plant growth regulators are compounds that reduce the longitudinal growth of shoots (retardants). Growth retardation can be caused by ethephone, a compound that releases ethylene, as well as compounds such as chlorometachloride and mepiquate chloride, which block the early stages of gibberellin biosynthesis (Rademacher, 2000). New structurally related compounds are constantly being synthesized, as well as chemically unrelated compounds with similar hormone-like activity, including substances that inhibit the synthesis, transport, and action of hormones.

The practical application of growth regulators enables researchers and farmers to induce metabolic changes comparable to those triggered by specific environmental factors (such as photoperiod duration and temperature). They can hasten the development of reproductive structures or either enhance or suppress vegetative growth. Growth regulators (stimulators) contribute to boosting crop productivity and enhancing product quality to a degree comparable with the effects of fertilizer application or crop protection measures. This outcome is made possible by their capacity to direct plant growth and developmental processes toward the full expression of a plant's biological potential (Peleg et al., 2011). Growth regulators and biostimulators have significant potential to increase crop yields, allowing farmers to increase productivity and profitability.

Their use helps to reduce dependence on synthetic fertilizers and pesticides, increasing nutrient absorption and improving soil quality (Gupta, 2023).

### **1. Endogenous hormones and related bioactive compounds**

Abscisic acid (ABA) is a key plant hormone that regulates growth and development. Initially identified as two separate compounds (dormin and abscisin II), it was later recognized as a single molecule and named ABA. It is mainly produced in leaf chloroplasts, especially under stress conditions (Bhattacharya, 2019).

ABA plays a central role in helping plants tolerate abiotic stresses such as drought, extreme temperatures, and salinity. Under these conditions, its levels increase, activating protective responses. It is also involved in normal plant development. Studies show that ABA accumulation rises in many crops during drought and cold stress, and many ABA-regulated genes are linked to stress responses, particularly to drought and salinity (Sah et al., 2019).

In rice, stress-responsive genes were characterized, with 43 of them being ABA-inducible. These findings point to a substantial degree of interaction between ABA-mediated signaling and abiotic stress response pathways, particularly under conditions of moisture deficit and elevated salinity. ABA facilitates water movement and ion transport through root tissues, suggesting that it plays a role in turgor regulation by decreasing transpiration rates while simultaneously enhancing water uptake by the root system. When ABA is present under low water potential conditions, root growth is proportionally greater relative to shoot growth compared to situations where ABA is absent. Research has demonstrated that under reduced water potential, ABA accumulation sustains primary root elongation in maize by limiting ethylene biosynthesis, and it has been shown that ethylene serves as a major inhibitor of root extension (Sah et al., 2019).

Studies have shown that heavy metals increase ABA levels in plants (Vishwakarma et al., 2017).

Abscisic acid (ABA) regulates many plant processes, including seed maturation and dormancy, the transition to flowering, stomatal control, and stress responses. Under unfavorable conditions ABA levels increase to enhance plant tolerance (Pompeu et al., 2019).

In this way, ABA serves a critical function in plants exposed to adverse environmental conditions by decelerating growth rates and reducing

metabolic activity. Furthermore, under water-deficit conditions, ABA helps sustain internal water equilibrium, enabling the plant to withstand temperature extremes.

Auxin is a phytohormone responsible for modulating plant growth and development, as well as governing bud formation and the initiation of root systems (Kazan, 2023). Auxins fulfill a central regulatory function in plant growth, regulating cell elongation, vascular differentiation, and apical dominance, while also guiding development under stress conditions. They are involved in responses to salinity, with clear links between auxin signaling and salt stress. (Fahad et al., 2013; Bhattacharya, 2019).

Auxins promote cellular elongation by altering the plasticity of the cell wall structure. They stimulate the division of cambial cells and induce the differentiation of secondary xylem within stem tissues.

Auxin redistribution in response to light or gravity causes uneven growth in plant tissues and shapes overall plant morphology; at certain levels, it can also inhibit growth. Auxin metabolism, transport, and signaling are closely linked to stress responses, and disruptions in auxin balance can lead to developmental abnormalities. Environmental stresses can alter auxin homeostasis, while controlled changes in auxin levels, especially in genetically modified plants—have been shown to improve stress tolerance, including drought resistance. Overall, auxin regulation is strongly connected to how plants adapt to adverse conditions (Derfling et al., 1985; Park et al., 2007; Tognetti et al., 2010; Remy et al., 2013; Bhattacharya, 2019).

Cytokinins are hormones that promote cell division, shoot formation, delay aging, and regulate leaf growth and internode length. They interact with auxins by reducing apical dominance and, together with ethylene, contribute to organ abscission.

Higher cytokinin levels can enhance photosynthesis and metabolism under drought or salinity, though their effects depend on regulation and localization. Under heat stress, cytokinin levels often rise temporarily, supporting stress responses such as antioxidant activity and heat shock protein accumulation, indicating their role in temperature adaptation (Du et al., 2007; Bhattacharya, 2016; Vojta et al., 2016; Pavlů et al., 2018).

Gibberellins (GAs) constitute a large family of tetracyclic diterpenoid phytohormones that play a multifaceted role in regulating nearly every stage of the plant life cycle. Among more than 130 identified gibberellin forms, only a few – most notably GA<sub>1</sub>, GA<sub>3</sub>, GA<sub>4</sub>, and GA<sub>7</sub> – are biologically active

and directly participate in growth regulation. One of the most well-characterized functions of gibberellins is the promotion of stem and internode elongation through the stimulation of both cell division and cell expansion. Gibberellins are indispensable for the process of seed germination. During this stage, GAs stimulate the synthesis of hydrolytic enzymes, particularly  $\alpha$ -amylase, in the aleurone layer of cereal grains. These enzymes mobilize stored starch reserves in the endosperm, providing the developing embryo with the energy and nutrients required for successful seedling emergence. Beyond germination, gibberellins play a pivotal role in the transition from vegetative to reproductive development. They promote flowering, particularly in long-day and rosette-forming plants, by activating floral meristem identity genes. Gibberellins also contribute to the development of parthenocarpic (seedless) fruits and are essential for normal pollen maturation and fertility (Bhattacharya et al., 2019).

Gibberellic acid (GA) is involved in plant growth as well as responses to abiotic stress. While GA alone does not significantly affect root elongation, it can promote root growth under cadmium stress by reducing Cd accumulation in tissues. It also lowers cadmium-induced nitric oxide (NO) levels, helping to mitigate toxicity (Zhu et al., 2016).

Jasmonates (JAs) are a class of lipid-derived phytohormones that originate from the oxidative metabolism of polyunsaturated fatty acids, primarily  $\alpha$ -linolenic acid, through the octadecanoid biosynthetic pathway. The most prominent members of this group include jasmonic acid (JA), its methyl ester methyl jasmonate (MeJA), and the biologically active conjugate jasmonoyl-isoleucine (JA-Ile). Initially identified as fragrant components of jasmine oil (*Jasminum grandiflorum*), jasmonates have since been recognized as critical signaling molecules governing a wide spectrum of physiological and developmental processes in plants (Bhattacharya et al., 2019).

Jasmonic acid (JA) involved in plant defense against abiotic stress. It activates physiological and molecular responses, including antioxidant enzymes, accumulation of amino acids and sugars, and regulation of stomatal movement. JA also helps reduce water loss by controlling stomatal closure (Acharya et al., 2009; Wasternack et al., 2014).

Jasmonates play a significant role in plant responses to abiotic stresses such as drought, salinity, heavy metal contamination, and extreme temperatures. Under drought conditions, endogenous JA concentrations rise rapidly, activating downstream

signaling pathways that promote the accumulation of osmoprotectants, enhance antioxidant enzyme activity, and regulate stomatal closure to minimize water loss. In *Arabidopsis thaliana*, exogenous application of JA has been shown to modulate stomatal aperture, thereby reducing transpiration rates under water-deficit conditions. Furthermore, jasmonates facilitate plant adaptation to heavy metal toxicity by upregulating genes involved in detoxification and metal chelation processes. It was compared cadmium-induced stress responses between wild-type tomato plants and spr2 JA-deficient mutants and found that Cd concentrations in both roots and leaves increased more substantially at higher CdCl<sub>2</sub> doses. The findings indicated that the absence of endogenous JA can heighten the susceptibility of tomato seedlings to Cd toxicity (Savchenko et al., 2014; Zhao et al., 2016; Fu et al., 2017).

## 2. Humic compounds and their role in mitigating abiotic stress

Humic substances (HS) make up about 60% of soil organic matter and consist of complex molecular assemblies that drive many soil chemical processes. They include humic and fulvic acids, differ in solubility, and form stable complexes with metals and pollutants, which can reduce toxicity and influence their movement in soil (Bollag et al., 2019).

Humic acids (HA) are resistant to decomposition and can promote plant growth by improving nutrient uptake, membrane permeability, and metabolic activity. Their structure is highly complex and still debated, but they are considered multifunctional compounds with potential signaling roles in plant–soil systems. HA can enhance root and shoot growth, biomass, and germination, although effects depend on concentration, plant species, and environmental conditions. They also influence respiration, protein synthesis, enzyme activity, and mineral uptake—particularly improving availability of nutrients like nitrogen, phosphorus, and iron (Thomas et al., 1978; Nardi et al., 2002; Alvarez-Puebla et al., 2005; Bollag et al., 2019).

Application of various HAs to *Arabidopsis* and wild-type tomato seedlings prompted the researchers to propose that these organic substances contain compounds exhibiting auxin-like properties. Nevertheless, these same substances proved unable to trigger lateral root development in a tomato mutant harboring a dysfunctional auxin signaling gene. Based on these observations, the investigators suggested that HA most likely function as a “buffer-

ing system,” capable of sequestering or liberating signaling molecules in accordance with shifts in the rhizosphere environment, such as acidification driven by plasma membrane activity, thus serving as a modulator of hormonal equilibrium with respect to lateral root initiation (Dobbss et al., 2007).

Owing to the inherently complex and heterogeneous character of HA, the question of whether they possess genuine auxin-like biological activity continues to be a matter of scientific discussion. The hormonal responses observed in experimental settings did not consistently correlate with the actual concentrations of IAA identified within HA preparations, leaving open the possibility that other members of the auxin family or structurally related molecules may be present that either replicate auxin function or activate the endogenous auxin biosynthetic machinery in plants. Approaches rooted in functional genomics, transcriptomic profiling, and proteomic analyses could serve as promising strategies for clarifying the mechanisms underlying the biological effects of HAs (Trevisan et al., 2010).

Alleviating the adverse impacts of abiotic stresses on plant growth throughout ontogenetic development can substantially enhance the productivity of cultivated crops (Van et al., 2017; Zhang et al., 2008). Various studies demonstrate that HA possess the capacity to strengthen plant tolerance to environmental stress. Application of HA to bent grass and tall fescue resulted in improved leaf water retention, greater antioxidant potential, and enhanced growth of both roots and shoots under water-limited conditions. The simultaneous use of HA together with seaweed extract bolstered resistance to water deficit and raised the levels of endogenous cytokinins. In bell pepper, HA treatment led to elevated concentrations of vital mineral elements in root and shoot tissues, pointing to a protective role against salt-induced damage.

Humic acids (HA) improve plant tolerance to salinity by increasing proline levels while reducing membrane damage and reactive oxygen species (ROS). They also enhance antioxidant enzyme activity, especially when applied via vermicompost, helping plants cope with drought and salt stress. HA influence membrane proton pumps, improving nutrient uptake and root development, likely through auxin-related pathways. They can also reduce the toxicity of heavy metals by limiting ROS damage and supporting protective systems such as glutathione production. Additionally, HA help maintain redox balance, boost antioxidant defenses, and im-

prove plant recovery under stress conditions like drought and osmotic stress (García et al., 2012; Guridi-Izquierdo et al., 2017; Van et al., 2017; Aguiar et al., 2018; Shah et al., 2018; Zandonadi et al., 2018).

It was shown enhanced peroxidase function, lower hydrogen peroxide levels, and heightened proline accumulation in cells, collectively resulting in diminished ROS production and the re-establishment of redox balance in the cytosol (García et al., 2018; García et al., 2016). Seedlings that received prior HA treatment exhibited greater resilience when subjected to osmotic stress induced by polyethylene glycol (PEG 6000) (Guridi-Izquierdo et al., 2017). In a comparable manner, sugar cane plants previously exposed to HA displayed superior recovery following water-deficit conditions, characterized by an upregulation of key antioxidant enzymes (Aguiar et al., 2018).

### 3. The practical use of plant growth-regulating compounds

Plant growth regulators (PGRs) play a central role in coordinating these processes, including both classical hormones and other bioactive compounds (Peleg et al., 2011).

Contemporary research has revealed that phytohormones participate in a multitude of biological processes. The interplay among different plant hormones gives rise to synergistic or antagonistic interactions that serve an essential function in mediating plant responses to abiotic stress. The targeted manipulation of molecular mechanisms governing hormone biosynthesis, intracellular signal transduction, and downstream hormonal actions facilitates the engineering of hormone biosynthetic pathways, enabling the development of transgenic crop varieties exhibiting superior abiotic stress tolerance under field conditions (Sajid et al., 2009; Alcázar et al., 2010).

The commercial application of auxins aimed to prevent premature leaf and fruit drop, promote flowering, thin fruits, induce seedless fruit formation, and stimulate rooting in cuttings. Growth regulators are applied throughout plant development -from flowering to post-harvest- to improve yield and quality, including in crops like lilies. In the case of the tropical evergreen mango tree, low temperature is the sole recognized factor capable of triggering the flowering process; however, it does not ensure that floral initiation will take place, as complex interactions involving phytohormones associated with

vegetative growth also play a determining role (Dias et al., 2019).

Forthcoming investigations in rhizosphere biology will depend on advances in molecular and biotechnological methodologies to deepen our understanding of rhizosphere processes, microbial diversity, and the multifunctional properties that underpin sustainable agricultural practices, as well as to achieve integrated management of soil microbial communities.

New approaches to using bioinoculants in high-value crops—such as vegetables, fruits, and ornamentals—should be further developed. Combining multiple stress-tolerant bacterial strains may be more effective than single-strain inoculation in reducing stress effects on plants. Future research should focus on optimizing growth conditions and developing safe, resilient plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to enable affordable and efficient agricultural applications (Davies et al., 2010).

### Conclusion

The comprehensive analysis presented in this review underscores the indispensable role of plant growth regulators in governing fundamental physiological processes and conferring tolerance to abiotic stress factors in cultivated crops. The evidence clearly demonstrates that phytohormones do not function in isolation but rather operate through an intricate network of synergistic and antagonistic interactions that collectively determine plant adaptive capacity under adverse environmental conditions. Abscisic acid, auxins, cytokinins, gibberellins, and jasmonates each contribute distinct yet interconnected regulatory functions, ranging from stomatal control and osmotic adjustment to antioxidant defense activation and root architecture modification.

The role of humic substances as natural mediators of stress tolerance represents a particularly promising area of agricultural biotechnology. Their capacity to enhance nutrient bioavailability, stimulate antioxidant enzyme systems, modulate auxin-like signaling, and buffer rhizosphere conditions positions humic acids as valuable complementary tools alongside conventional plant growth regulators. The documented ability of humic acids to reduce the genotoxic effects of heavy metals and restore cellular redox homeostasis further highlights their potential in remediating contaminated agricultural soils.

From a practical standpoint, the strategic application of growth regulators – both synthetic and natural – offers farmers effective means to opti-

mize crop productivity and quality while reducing dependence on chemical fertilizers and pesticides. The development of transgenic crop varieties with modified hormonal pathways and enhanced stress tolerance continues to expand the possibilities for sustainable agriculture.

Future research should prioritize the integration of functional genomics, transcriptomics, and proteomics to elucidate the precise molecular mechanisms underlying PGR-mediated stress responses. Additionally, the exploration of multi-stress bacterial consortia combined with humic biostimulants may yield innovative, cost-effective solutions for maintaining agricultural productivity under the increasingly unpredictable environmental conditions driven by global climate change.

### Funding

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan. Grant No. AP26196039 “Cadmium toxicity for rice plants and the use of physico-chemical methods to increase resistance” (2025-2027).

### Author contribution

*A.S. Nurmahanova: Conceptualization, writing – original draft (Introduction), writing – review and editing*

*S.D. Atabayeva: Literature analysis, writing – original draft (Introduction; Hormones and hormone-like substances), supervision, project administration*

*A.B. Rakhymgozhina: Literature analysis, writing – original draft (Hormones and hormone-like substances; Humic substances and regulation of abiotic stress).*

*S.S. Kenzhebayeva: Writing – original draft (Humic substances and regulation of abiotic stress; Application of plant growth regulators).*

*S.Sh. Asrandina: Writing – original draft (Application of plant growth regulators), visualization.*

*A.Zh. Beisenova: Writing – original draft (Conclusion), review and editing*

*A.B. Myltykbayeva – Writing – original draft (Application of plant growth regulators), visualization*

*All authors contributed to discussion of the literature and approved the final manuscript.*

### References

- Acharya, B. R., & Assmann, S. M. (2009). Hormone interactions in stomatal function. *Plant Molecular Biology*, 69, 451–462. <https://doi.org/10.1007/s11103-008-9427-0>
- Aguiar, N. O., Olivares, F. L., Novotny, E. H., & Canellas, L. P. (2018). Changes in metabolic profiling of sugarcane leaves induced by endophytic diazotrophic bacteria and humic acids. *PeerJ*, 6, e5445.
- Alcázar, R., Altabella, T., Marco, F., Bortolotti, C., Reymond, M., Koncz, C., & Tiburcio, A. F. (2010). Polyamines: Molecules with regulatory functions in plant abiotic stress tolerance. *Planta*, 231(6), 1237–1249. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1130-0>
- Alvarez-Puebla, R. A., Goulet, P. J. G., & Garrido, J. J. (2005). Characterization of the porous structure of different humic colloids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 256, 129–135.
- Bhattacharya, A. (2019). Effect of high-temperature stress on the metabolism of plant growth regulators. In A. Bhattacharya (Ed.), *Effect of high temperature on crop productivity and metabolism of macromolecules* (pp. 485–591). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817562-0.00006-9>
- Bollag, J. M., Myers, C., Pal, S., & Huang, P. M. (1995). The role of abiotic and biotic catalysts in the transformation of phenolic compounds. In P. M. Huang et al. (Eds.), *Environmental impacts of soil component interactions* (pp. 297–308). Lewis Publisher.
- Choudhary, M., Kumari, A. (2021) “Understanding plant hormones: Mechanisms and functions in growth and development”. *Plant Science Archives*. V. 6(1) <https://doi.org/10.51470/PSA.2021.6.1.14>
- Davies, P. J. (2010). The plant hormones: Their nature, occurrence, and functions. In P. J. Davies (Ed.), *Plant hormones* (pp. 1–15). Springer.
- Derfling, K. (1985). *Gormony rastenii. Sistemnyi podhod* [Plant hormones: Systemic approach]. Mir.
- Dias, J. P. T. (2019). Plant growth regulators in horticulture: Practices and perspectives. *Biocologia Vegetal*, 19(1), 3–14.
- Dobbss, L. B., Medici, L. O., Peres, L. E. P., Pino-Nunes, L. E., Rumjanek, V. M., Façanha, A. R., & Canellas, L. P. (2007). Changes in root development of *Arabidopsis* promoted by organic matter. *Annals of Applied Biology*, 151, 199–211.
- Du, H., Liu, H., & Xiong, L. (2013). Endogenous auxin and jasmonic acid levels are differentially modulated by abiotic stresses in rice. *Frontiers in Plant Science*, 4, 397. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00397>
- Fahad, S., Hussain, S., Matloob, A., Khan, F. A., Khaliq, A., Saud, S., & Huang, J. (2014). Phytohormones and plant responses to salinity stress: A review. *Plant Growth Regulation*, 75(2), 391–404. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-0013-y>
- Fu, J., Wu, H., Ma, S. Q., Xiang, D. H., Liu, R. Y., & Xiong, L. Z. (2017). OsJAZ1 attenuates drought resistance by regulating JA and ABA signaling in rice. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2108. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02108>

- García, A. C., Santos, L. A., Izquierdo, F. G., Sperandio, M. V. L., Castro, R. N., & Berbara, R. L. L. (2012). Vermicompost humic acids as an ecological pathway to protect rice plants against oxidative stress. *Ecological Engineering*, *47*, 203–208.
- García, A. C., Santos, L. A., Ambrósio de Souza, L. G., Tavares, O. C. H., Zonta, E., Gomes, E. T. M., García-Mina, J. M., & Berbara, R. L. (2016). Vermicompost humic acids modulate ROS metabolism in rice plants. *Journal of Plant Physiology*, *192*, 56–63.
- Guminski, S. (1998). Present-day views on physiological effects induced in plant organisms by humic compounds. *Soviet Soil Science*, *9*, 1250–1256.
- Gupta, S, Bhattacharyya, P, Kulkarni, MG, Doležal, K. (2023) “Growth regulators and biostimulants: upcoming opportunities”. *Front Plant Sci*. V.14:1209499. doi: 10.3389/fpls.2023.1209499.
- Guridi-Izquierdo, F., García, A. C., Berbara, R. L. L., Martínez-Balmori, D., & Bassó, M. R. (2017). Humic acids protect rice plants from drought stress. *Cultivos Tropicales*, *38*, 53–60.
- Kazan, K. (2013). Auxin and the integration of environmental signals into plant root development. *Annals of Botany*, *112*(9), 1655–1665. <https://doi.org/10.1093/aob/mct229>
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, *34*, 1527–1536.
- Naser, V., & Shani, E. (2016). Auxin response under osmotic stress. *Plant Molecular Biology*, *91*, 661–672. <https://doi.org/10.1007/s11103-016-0476-5>
- Park, J. E., Park, J. Y., Kim, Y. S., Staswick, P. E., Jeon, J., & Yun, J. (2007). GH3-mediated auxin homeostasis links growth regulation with stress adaptation in *Arabidopsis*. *Journal of Biological Chemistry*, *282*, 10036–10046. <https://doi.org/10.1074/jbc.M610524200>
- Pavlů, J., Novák, J., Koukalová, V., Luklová, M., Brzobohatý, B., & Černý, M. (2018). Cytokinin at the crossroads of abiotic stress signalling pathways. *International Journal of Molecular Sciences*, *19*(8), 2450. <https://doi.org/10.3390/ijms19082450>
- Peleg, Z., & Blumwald, E. (2011). Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants. *Current Opinion in Plant Biology*, *14*(3), 290–295.
- Pompeu, G. B., Ambrosano, G. B., Vilhena, M. B., Carvalho, R. F., Gratão, P. L., Andrino, F. G., Lira, S. P., & Azevedo, R. A. (2019). pH modulates cadmium stress response in tomato mutant. *Bragantia*, *78*(3), 317–327. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2018326>
- Rademacher, W. (2016). “Growth retardants: Effects on gibberellin biosynthesis and other metabolic pathways”. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*. *51*. 501-531 <https://doi: 10.1146/annurev.arplant.51.1.501>
- Remy, E., Cabrito, T. R., Batista, R. A., Teixeira, M. C., & Friml, J. (2013). Transporter role in auxin transport and drought tolerance. *The Plant Cell*, *25*, 901–926. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.110353>
- Sah, S. K., Reddy, K. R., & Li, J. (2016). Abscisic acid and abiotic stress tolerance in crop plants. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 571.
- Sah, S.K., Reddy, K.R., Li, J. (2016). “Abscisic acid and abiotic stress tolerance in crop plants.” *Front. Plant Sci*. V. *7*, 571–578. PMID: 27200044. <https://doi: 10.3389/fpls.2016.00571>
- Sajid, G.M., Kaukab, M., Ahmad, Z. (2009). “Foliar application of plant growth regulators (PGRs) and nutrients for improvement of lily flowers.” *Pak J Bot*. V. *41*(1), 233-237.
- Savchenko, T., Kolla, V.A., Wang, C.Q., Nasafi, Z., Hicks, D.R., (2014). Phadungchob, B., Chehab, W.E., Brandizzi, F., Froehlich, J., Dehesh, K. “Functional convergence of oxylipin and abscisic acid pathways controls stomatal closure in response to drought.” *Plant Physiol*. V. *164*, P.1151–1160. <https://doi: 10.1104/pp.113.234310>.
- Shah, Z.H., Rehman, H.M., Akhtar, T., Alsamadany, H., Hamooh, B.T., Mujtaba, T., Daur, I., Al-Zahrani, Y., Alzahrani, H.A.S., Ali, S., Yang, S.H., Chung, G. (2018). “Humic substances: Determining potential molecular regulatory processes.” *Plants. Front. Plant Sci*. V. *9*. 263. doi: 10.3389/fpls.2018.00263
- Small, C.C., Degenhardt, D. (2018). “Plant growth regulators for enhancing revegetation success in reclamation: A review”. *Ecological Engineering*. V.11843–51.
- Thomas, S.M., Thorne, G.N., Pearman, I. (1978). “Effect of nitrogen on growth, yield and photorespiratory activity in spring wheat.” *Ann Bot*. V. *42*, 827–837.
- Tognetti, V.B., van Aken, O., Morreel, K., Vandenbroucke, K., Van de Cotte, B., De Clercq, I. (2010). Perturbation of indole-3-butyric acid homeostasis by the UDP-glucosyltransferase UGT74E2 modulates *Arabidopsis* architecture and water stress tolerance. *Plant Cell*. V. *22*, 2660–2679. <https://doi: 10.1105/tpc.109.071316>
- Trevisan, S., Francioso, O., Quaggiotti, S., Nardi S. (2010). Humic substances biological activity at the plant-soil interface from environmental aspects to molecular factors. *Plant Signal Behav*. V.5(6), 635-643. <https://doi:10.4161/psb.5.6.11211>
- Van Osten, M. J., Pepe, O., De Pascale, S., Silletti, S., Maggio, A. (2017). The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants.” *Chem. Biol. Technol. Agric*. V.4. 1-12. <https://doi: 10.1186/s40538-017-0089-5>
- Vishwakarma, K., Upadhyay, N., Kumar, N., Yadav, G., Singh, J., Mishra, R.K., Kumar, V., Verma, R.G., Pandey, M., Sharma, S. (2017). Abscisic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: A review on current knowledge and future prospects”. *Front. Plant Sci*. V. *8*, 161-171. doi: 10.3389/fpls.2017.00161
- Vojta, P., Kokáš F., Husičková, A., Grúz, J., Bergognoux, V., Marchetti, C.F., Jiskrová, E., Ježilová, E., Mik, V., Ikeda, Y., Galuszka, P. (2016). Whole transcriptome analysis of transgenic barley with altered cytokinin homeostasis and increased tolerance to drought stress. *New Biotechnol*. V. *33*, 676–691. <https://doi: 10.1016/j.nbt.2016.01.010>.
- Wasternack, C. (2014). Action of jasmonates in plant stress responses and development – applied aspects.” *Biotechnol. Adv.*. V. *32*, 31–39. <https://doi: 10.1016/j.biotechadv.2013.09.009>.

Zandonadi, D. B., Santos, M. P., Caixeta, L. S., Marinho, E. B., Peres, L.E.P., Façanha, A.R. (2016). Plant proton pumps as markers of biostimulant action *Sci. Agric.* V. 73, 24–28.

Zhang, X., Ervin, E. H. (2008). “Impact of seaweed extract-based cytokinins and zeatin riboside on creeping bentgrass heat tolerance.” *Crop Sci.* V. 48, 364–370.

Zhao, S.Y., Ma, Q.F., Xu, X., Li, G.Z., Hao, L. (2016). “Tomato jasmonic acid-deficient mutant spr2 seedling response to cadmium stress.” *J. Plant Growth Regul.* V. 35, 603–610. [https://doi: 10.1007/s00344](https://doi.org/10.1007/s00344)

Zhao, Y., Christensen, S.K., Fankhauser, C., Cashman, J.R., Cohen, J.D., Weigel, D. (2001). A role for flavin monooxygenase-like enzymes in auxin biosynthesis. *Science.* V.291, 306–309. [https://doi: 10.1126/science.291.5502.306](https://doi.org/10.1126/science.291.5502.306)

Zhu, X. F., Jiang, T., Wang, Z. W., Lei, G. J., Shi, Y. Z., Li, G. X., Zheng, S. J. (2012). Gibberellic acid alleviates cadmium toxicity by reducing nitric oxide accumulation and expression of IRT1 in *Arabidopsis thaliana* .” *Journal of Hazardous Materials.* V. 239/240, 302–307. doi:10.1016/j.jhazmat.2012.08.077

#### **Information about authors:**

A.S. Nurmahanova – Associate Professor, Department of Botany and Agroecology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

S.D. Atabayeva – Professor, Department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan).

A.B. Rakhymgozhina – Researcher, Scientific Research Institute of Sustainability of Ecology and Bioresources Al-Farabi Kazakh National University; Head of the Department International Medical School, Kenzhegali Sagadiyev University of International Business, UIB (Almaty, Kazakhstan).

S.S. Kenzhebayeva – Professor, Department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

S.Sh. Asrandina – Professor, Department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)

A. Zh. Beisenova – Senior Lecturer, Asfendiyarov Kazakh National Medical University (Almaty, Kazakhstan).

A.B. Myltykbaeva – PhD student of EP “8D05108 – Geobotany”, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

A.C. Нурмаханова – Ботаника және агроэкология кафедрасының доценті, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан).

С.Д. Атабаева – Биотехнология кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан).

А.Б. Рахымгожина – Ғылыми қызметкер, Экология және биоресурстардың тұрақтылығы ФЗИ; Кафедра меңгерушісі, Халықаралық Медицина мектебі, Кенжегали Сагадиев атындағы Халықаралық бизнес университеті (Алматы, Қазақстан).

С.С. Кенжебаева – Биотехнология кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан).

С.Ш. Асрандина – Биотехнология кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан).

А.Ж. Бейсенова – Аға оқытушы, С.Д. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті (Алматы, Қазақстан).

А.Б. Мылтыкбаева – «8D05108 – Геоботаника» білім беру бағдарламасының докторанты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан).

#### **Сведения об авторах:**

A.C. Нурмаханова – доцент кафедры ботаники и агроэкологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

С.Д. Атабаева – профессор кафедры биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

А.Б. Рахымгожина – научный сотрудник, Научно-исследовательский институт устойчивости экологии и биоресурсов; заведующая кафедрой, Международная школа медицины, Университет международного бизнеса имени К. Сагадиева (Алматы, Казахстан).

С.С. Кенжебаева – профессор кафедры биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

С.Ш. Асрандина – профессор кафедры биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

А.Ж. Бейсенова – старший преподаватель, Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова (Алматы, Казахстан).

А.Б. Мылтыкбаева – докторант ОП «8D05108 – Геоботаника», Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

Поступила 25 апреля 2025 года

Принята 25 марта 2026 года

## АВТОРЛАРҒА АРНАЛҒАН АҚПАРАТ

«ҚазҰУ хабаршысы. Экология сериясы» журналы 1992 жылы құрылған. Журналдың құрылтайшысы және шығарушысы Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті болып табылады. Журналдың жоғары оқу орны көрсетілген мұқабасы мен титулдық парақтары, шығыс деректері, ISSN, eISSN, редакциялық алқа құрамы, редакциялық саясаты, жарияланымдық этикасы және веб-сайты бар.

Журнал жылына 4 рет шығарылады.

Журнал авторлардың жарияланымдарының ақпараттық ашықтығы және қол жетімділігі саясатына сәйкес келеді, мақалалар журналдың сайтында орналастырылады <https://bulletin-ecology.kaznu.kz> үш тілде толық мәтінді қолжетімділікте

**Журналдың мақсаты** – экология және табиғи ресурстар саласындағы алдыңғы қатарлы зерттеулердің нәтижелері мен жан-жақты көрсетілімін қамтамасыз ету. Журнал экологиялық проблемалар мен қоршаған ортаны қорғауға ғылыми қызығушылық танытатын ғылыми қызметкерлерге, оқытушыларға, докторанттар мен түрлі мамандықтағы студенттерге арналған.

### Журнал міндеттері:

- Экология және қоршаған ортаны қорғау бойынша фундаменталды және қолданбалы ғылымның түрлі салаларында маңызды мәнге ие жаңа ғылыми нәтижелерді жариялау.

- Диссертацияларды қорғауға және ғылыми мамандықтар бойынша ғылыми дәрежелер алуға үміткер магистранттар мен докторанттардың ғылыми жұмыстарының нәтижелерін кең жариялаудың ашықтығы мен қол жетімділігі ортасын құру.

- Ғылыми қоғамдастықтың, сондай-ақ жас және жаңа бастаған ғалымдардың журналға деген тұрақты қызығушылығын қалыптастыру, оның экология мәселелерін зерттейтін мамандардың кәсіби ортасында өсіп келе жатқан қажеттілігін қалыптастыру.

Журнал материалдары экология және қоршаған ортаның ластануы саласындағы проблемалардың кең ауқымын қамтиды. Мақалалар **экологияның келесі тақырыптық бөлімдері** бойынша жарияланады:

- Жер туралы ғалым;
- Қоршаған ортаны ластау және қорғау;
- Экологиялық биотехнология;
- Адам, өсімдіктер, жануарлар және микроорганизмдер экологиясы;
- Климаттың ғаламдық өзгеруі, су ресурстарын басқару;
- Бұзылған экожүйелерді қалпына келтіру;
- Қоршаған орта және көші-қон;
- Қалалар және климаттың өзгеруі;
- Экологиялық ойлау және адамзат стратегиясы.

«ҚазҰУ хабаршысы. Экология сериясы» журналының тақырыптық бағыттарына сәйкес келетін және қолжазбаны ресімдеу талаптары бойынша қатаң ресімделген, автордың (авторлардың) қазақ, орыс немесе ағылшын тілдерінде бұрын жарияланбаған мақалалары қабылданады.

«ҚазҰУ хабаршысы. Экология сериясы» журналы авторлардың ғылыми жұмысқа құқығын сақтайды және журналға бірінші жариялау құқығын жұмыспен бірге береді, оны бір уақытта Creative Commons Attribution License (CC BY-NC-ND 4.0) бойынша лицензиялайды.

Жариялау процесінің барлық қатысушылары, атап айтқанда, әрбір автор, ғылыми редактор, рецензент, жауапты хатшы, «ҚазҰУ хабаршысы. Экология сериясы» ғылыми журналының редакциялық алқасының мүшелері міндетті түрде жариялау этикасының қағидаларын, нормалары мен стандарттарын ұстануға міндетті. Этикалық қағидаларды сақтау ғылыми журналдың сапасын қамтамасыз ету және сақтау үшін де, жариялау процесіне қатысушылар арасында сенімді және құрметті қарым-қатынас құру үшін де маңызды.

Мақаланы жариялау төлемі тек редакцияның мақаланы қабылданған шешімі хабарламасынан кейін ғана жүргізіледі. Жарияланым құны – 2000 теңге/бет WORD форматында (шрифт 12, Times New Roman).

### Реквизиттер:

«Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ» коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Индекс 050040

Мекенжайы: Алматы қаласы, Әл-Фараби даңғылы, 71

БИН 990140001154

КВЕ 16 «Бірінші Heartland Jusan Bank» АҚ

ИИК KZ19998СТВ0000567141 – теңге

ИИК KZ40998СТВ0000567151 – АҚШ доллары

БИК TSESZKZKA

---

## INFORMATION FOR AUTHORS

Journal «Vestnik KazNU. Ecological Series» was founded in 1992. In 2007 was renamed as «**Eurasian Journal of Ecology**» (in the English version). The founder and publisher of the journal are the Al-Farabi Kazakh National University. The journal has a developed and approved cover and title pages with an indication of the institution, imprint of the issue, ISSN, eISSN, editorial board, editorial policy, publication ethics, and website. The journal is published 4 times a year.

The journal follows the policy of information openness and accessibility of authors' publications, articles are posted on the journal's website <https://bulletin-ecology.kaznu.kz> in three languages in full-text access.

**The aim of the journal** is to provide a comprehensive presentation and results of cutting-edge research in the field of ecology and natural resources. The journal is intended for researchers, teachers, doctoral students, and students of various specialties who show scientific interest in environmental problems and environmental protection.

### **Journal objectives:**

- To highlight new scientific results of significant importance in various fields of fundamental and applied science in ecology and environmental protection.
- To create an environment of openness and accessibility of wide coverage of the results of scientific work of undergraduates and doctoral students applying for the defense of dissertations and obtaining academic degrees in scientific specialties of dissertation councils in various fields of ecology.
- To form a constant stable interest among the scientific community, as well as among young and novice scientists in the journal, its growing demand in professional circles of specialists researching environmental issues.

The journal's materials cover a wide range of problems in the field of ecology and environmental pollution. Articles are published in the following thematic sections of ecology:

- Earth Science;
- Pollution and environmental protection;
- Environmental biotechnology;
- Ecology of humans, plants, animals and microorganisms;
- Global climate change, water resources management,
- Restoration of damaged ecosystems;
- Environment and migration;
- Cities and climate change;
- Environmental thinking and human strategy.

For publication in the «Eurasian Journal of Ecology» articles previously unpublished by the author (authors) are accepted – in Kazakh, Russian or English, which correspond to the thematic areas of the journal and are designed strictly according to the requirements of the manuscript format.

Authors of articles in the «Eurasian Journal of Ecology» retain the author's right to scientific work and transfer to the journal the right of first publication along with the work, licensing it at a time under the Creative Commons Attribution License (CC BY-NC-ND 4.0).

All participants in the publication process, namely, each author, scientific editor, reviewer, executive secretary, members of the editorial board of the scientific «Eurasian Journal of Ecology» are obliged to unconditionally adhere to the principles, norms and standards of publication ethics. Compliance with ethical principles is important both to ensure and maintain the quality of a scientific journal, and also to create trust and respect between participants in the publication process.

Payment is made only after the article is accepted for publication and the editors have notified it. Publication cost – 2000 tenge/ page in WORD format (font 12, Times New Roman)

### **Requisites:**

Non-profit joint-stock company «Al-Farabi Kazakh National University»

Index 050040

Address: Almaty, Al-Farabi Ave. 71

BIN 990140001154

KBE 16 JSC «First Heartland Jusan Bank»

ИК KZ19998CTB0000567141 – tenge

ИК KZ40998CTB0000567151 – USD

BIC TSESKZKA

---

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал «Вестник КазНУ. Серия экологическая» был основан в 1992 году. Учредителем и издателем журнала является Казахский национальный университет имени аль-Фараби. Журнал имеет разработанные и утвержденные обложку и титульные листы с указанием вуза, выходные данные номера, ISSN, eISSN, состав редколлегии, редакционную политику, публикационную этику и веб-сайт. Журнал выпускается периодичностью 4 раза в год.

Журнал следует политике информационной открытости и доступности публикаций авторов, статьи размещаются на сайте журнала <https://bulletin-ecology.kaznu.kz> на трех языках в полнотекстовом доступе.

**Цель журнала** – обеспечить всестороннее представление и результаты передовых исследований в области экологии и природных ресурсов. Журнал предназначен для научных сотрудников, преподавателей, докторантов и студентов различных специальностей, проявляющих научный интерес к экологическим проблемам и охране окружающей среды.

### Задачи журнала:

- Освещать новые научные результаты, имеющие существенное значение в различных областях фундаментальной и прикладной науки по экологии и охране окружающей среды.
- Создавать среду открытости и доступности широкого освещения результатов научных работ магистрантов и докторантов, претендующих на защиту диссертаций и получение ученых степеней по научным специальностям диссертационных советов в различных областях экологии.
- Формировать постоянный устойчивый интерес у научной общественности, а также у молодых и начинающих ученых к журналу, его растущую востребованность в профессиональных кругах специалистов, исследующих вопросы экологии.

Материалы журнала освещают широкий круг проблем в области экологии и загрязнения окружающей среды. Статьи публикуются по следующим **тематическим разделам экологии:**

- Наука о земле;
- Загрязнение и охрана окружающей среды;
- Экологическая биотехнология;
- Экология человека, растений, животных и микроорганизмов;
- Глобальное изменение климата, управление водными ресурсами;
- Восстановление нарушенных экосистем;
- Окружающая среда и миграция;
- Экологическое мышление и стратегия человечества.

Для публикации в журнале «Вестник КазНУ. Серия экологическая» принимаются ранее не опубликованные автором (авторами) статьи на русском, казахском или английском языке, которые соответствуют тематическим направлениям журнала и оформлены строго по требованиям оформления рукописи.

Авторы статей журнала «Вестник КазНУ. Серия экологическая» сохраняют за собой право автора на научную работу и передают журналу право первой публикации вместе с работой, одновременно лицензируя ее по лицензии Creative Commons Attribution License (CC BY-NC-ND 4.0).

Все участники процесса публикации, а именно, каждый автор, научный редактор, рецензент, ответственный секретарь, члены редакционной коллегии научного журнала «Вестник КазНУ. Серия экологическая» обязаны безусловно придерживаться принципов, норм и стандартов публикационной этики. Соблюдение этических принципов является важным как для обеспечения и поддержания качества научного журнала, также и для создания доверительных и уважительных отношении между участниками процесса публикации.

Оплата производится только после принятия статьи к публикации и сообщения редакции. Стоимость публикации – 2000 тенге/страница в формате WORD (шрифт 12, Times New Roman).

### Реквизиты:

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный университет имени аль-Фараби»

Индекс 050040

Адрес: г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71

БИН 990140001154

КБЕ 16 АО «First Heartland Jýsan Bank»

ИИК KZ19998CTB0000567141 – тенге

ИИК KZ40998CTB0000567151 – USD

БИК TSESKZKA

## МАЗМҰНЫ – CONTENTS – СОДЕРЖАНИЕ

<b>1-бөлім</b> <b>Қоршаған ортаны қорғау және</b> <b>қоршаған ортаға антропогендік</b> <b>факторлардың әсері</b>	<b>Section 1</b> <b>Environmental impact of</b> <b>anthropogenic factors and</b> <b>environmental protection</b>	<b>Раздел 1</b> <b>Воздействие на окружающую</b> <b>среду антропогенных факторов и</b> <b>защита окружающей среды</b>
Р.Ж. Бержанова, Т.Д. Мукашева, Н.К. Бектилеуова, Г. Абай, Е.С. Сатыбалды, Р.К. Сыдыкбекова Отбор и характеристика многофункциональных микробных штаммов для разработки стратегий фиторемедиации ..... 4		
С.М. Романова, А.С. Серикова, Р.Е. Махмутова Режим и динамика ионно-солевого состава воды водохранилища Тасоткель и его притоков (2014–2023 гг.) ..... 15		
М.М. Юсифова, Ш.Н. Ализаде Перспективы производства биоэнергии из растительных отходов в Восточно-Зангезурском экономическом районе Азербайджана ..... 29		
А. Kabdulmazhituly, A.A. Rysmagambetova, Zh. Rakhimzhan, A.K. Murzalimova, R.M. Tazitdinova Comparative assessment of heavy metal content in soils of industrial zones in Ust-Kamenogorsk ..... 42		
G.G. Ormanova, A.A. Rakhimberdina, A.A. Alexeyev, K. Kassym, Dh. Shah, N. Nuraje Influence of meteorological parameters on PM <sub>2.5</sub> and associated air pollution episodes in Karaganda, Central Kazakhstan (2017–2024) ..... 53		
<b>2-бөлім</b> <b>Қоршаған орта</b> <b>ластаушыларының биотаға</b> <b>және тұрғындар денсаулығына</b> <b>әсерін бағалау</b>	<b>Section 2</b> <b>Assessment of</b> <b>environmental pollution</b> <b>on biota and</b> <b>health</b>	<b>Раздел 2</b> <b>Оценка действия</b> <b>загрязнителей окружающей</b> <b>среды на биоту и</b> <b>здоровье населения</b>
Д.К. Аденова, Н.Е. Сабурова, Е.В. Сотников Гидрогеологические условия формирования и распространения линз пресных подземных вод с целью обоснования создания водопойных пунктов на участках отгонного животноводства ..... 70		
<b>3-бөлім</b> <b>Биологиялық</b> <b>алуантүрлілікті сақтаудың</b> <b>өзекті мәселелері</b>	<b>Section 3</b> <b>Actual problems</b> <b>of biodiversity</b> <b>conservation</b>	<b>Раздел 3</b> <b>Актуальные проблемы</b> <b>сохранения биологического</b> <b>разнообразия</b>
А.К. Тоқтыбай, Д. Салауат, К. Болатхан, С.К. Сандыбаева, Г.А. Ахметова, Ә.Қ. Құрметхан, С.С. Санатов, Р. Hrouzek, Б.К. Заядан Балқаш көлінің тұзды бөлігінің альгофлора құрамын зерттеу және фототрофты микроорганизмдердің аксеникалық дақылдарын бөліп алу ..... 80		
К.А. Daulet, В.В. Osmonali, S.T. Nazarbekova, M.B. Skaptsov Comparative anatomical analysis of Eremurus robustus and E. Tianschanicus growing in the Zailiyskiy Alatau ..... 98		
А.Е. Nurmanbek, N. Akhtayeva, L.N. Kiyekbayeva, T.S. Ibragimov Resilient flora of the desert: a comprehensive analysis of Arthrophytum’s adaptation and thera-peutic potential ..... 108		
P.V. Vesselova, G.M. Kudabayeva, D.Sh. Abdildanov, N.V. Friesen, A.Kh. Kenesbay, R.K. Akhmetzhanova, O.M. Maslova New localities of rare flora species in the kazakh part of the Kyrgyz Alatau range ..... 118		

---

**Шолу мақалалар – Review articles – Обзорные статьи**

М.А. Абдулжанова, Д.Х. Шокатаева, С.Д. Жантлесова, А. Балтабай, Ж. Батыкова Бактериалды целлюлоза – тұрақты тағамдық қаптамаға арналған биобдырайтын материал.....	128
A.S. Nurmahanova, S.D. Atabayeva, A.B. Rakhymgozhina, S.S. Kenzhebayeva, S.Sh. Asrandina, A.Zh. Beisenova, A.B. Myltykbayeva Significance and application of plant growth regulators.....	144
Авторларға арналған ақпарат.....	153